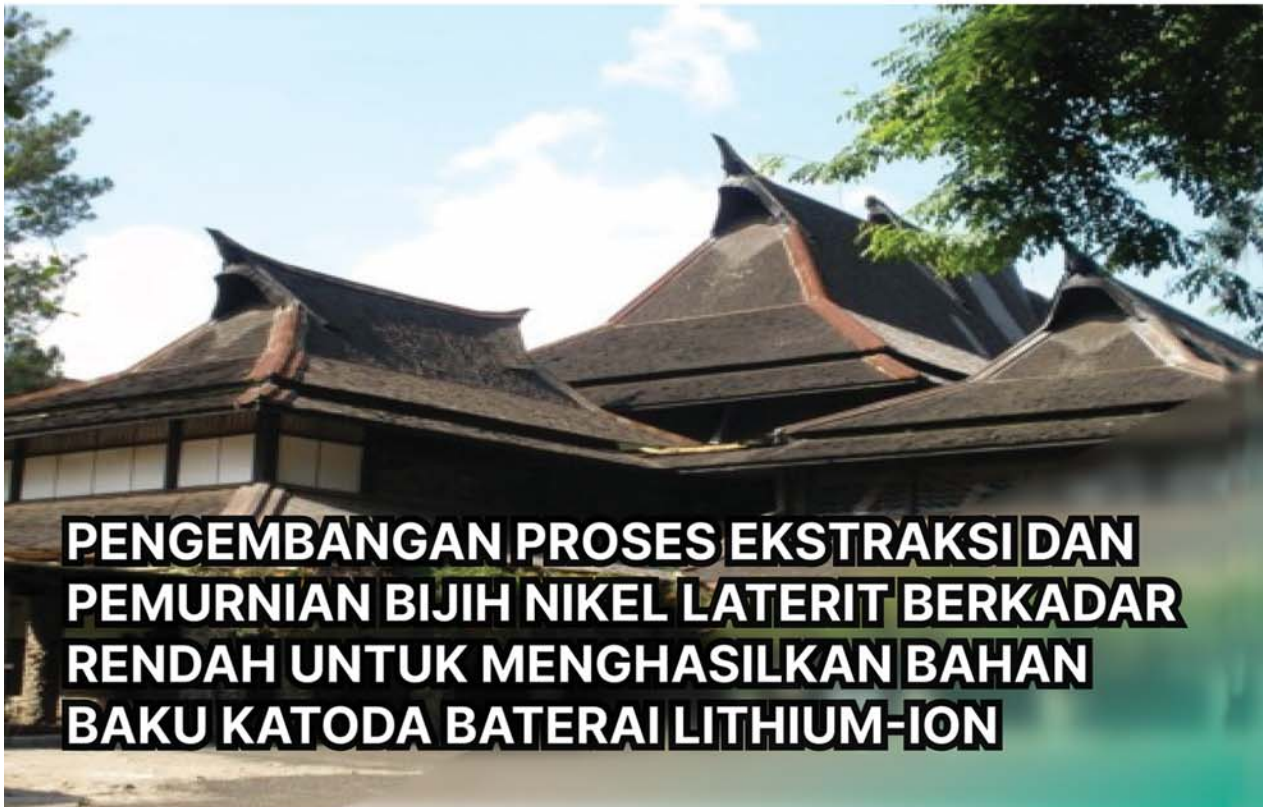




FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



**PENGEMBANGAN PROSES EKSTRAKSI DAN
PEMURNIAN BIJIH NIKEL LATERIT BERKADAR
RENDAH UNTUK MENGHASILKAN BAHAN
BAKU KATODA BATERAI LITHIUM-ION**

Profesor Mohammad Zaki Mubarak
Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan
Institut Teknologi Bandung

**Aula Barat ITB
18 Juni 2022**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung
18 Juni 2022

Profesor Mohammad Zaki Mubarak

**PENGEMBANGAN PROSES EKSTRAKSI DAN
PEMURNIAN BIJIH NIKEL LATERIT
BERKADAR RENDAH UNTUK MENGHASILKAN
BAHAN BAKU KATODA BATERAI LITHIUM-ION**



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: PENGEMBANGAN PROSES EKSTRAKSI DAN PEMURNIAN
BIJIH NIKEL LATERIT BERKADAR RENDAH UNTUK
MENGHASILKAN BAHAN BAKU KATODA BATERAI LITHIUM-ION
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 18 Juni 2022.

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA
1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah). 2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Hak Cipta ada pada penulis

Mohammad Zaki Mubarak

PENGEMBANGAN PROSES EKSTRAKSI DAN PEMURNIAN
BIJIH NIKEL LATERIT BERKADAR RENDAH UNTUK MENGHASILKAN
BAHAN BAKU KATODA BATERAI LITHIUM-ION
Disunting oleh Mohammad Zaki Mubarak

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2022
vi+78 h., 17,5 x 25 cm

ISBN 978-602-6624-53-6

1. Teknologi Pemrosesan 1. Mohammad Zaki Mubarak

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT. yang telah memberikan begitu banyak rahmat dan karuniaNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah dan menyampaikan orasi ilmiah ini. Penghargaan, rasa hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis haturkan kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menyampaikan orasi ilmiah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar ITB ini.

Orasi ilmiah ini memaparkan hasil-hasil penelitian yang menjadi fokus penulis dalam beberapa tahun terakhir ini yaitu proses ekstraksi dan pemurnian bijih nikel laterit berkadar rendah dengan jalur hidrometalurgi. Sebagai negara yang diberkahi dengan sumber daya mineral, khususnya nikel yang melimpah, banyak tugas yang masih harus dilakukan agar sumberdaya mineral tersebut dapat memberikan manfaat yang setinggi-tingginya bagi kesejahteraan masyarakat dan bangsa. Semoga tulisan ini dapat memberikan wawasan, dan inspirasi yang bermanfaat bagi para pembaca.

Bandung, 18 Juni 2022

Prof. Mohammad Zaki Mubarak

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
1 PENDAHULUAN	1
2 POTENSI NIKEL INDONESIA	4
3 PROSES EKSTRAKSI DAN PEMURNIAN BIJIH NIKEL LATERIT DAN PENGGUNAAN NIKEL PADA BATERAI	9
4 RISET YANG TELAH DILAKUKAN PENULIS DI ITB	16
4.1 Pelindian dan Pemurnian Larutan Hasil Pelindian	17
4.2 Sintesis Nikel-Kobalt Hidroksida sebagai Produk Antara	26
4.3 Pemurnian Larutan Hasil Pelindian MHP dan Sintesis Nikel Sulfat	28
4.4 Sintesis Material Prekursor Katoda NMC 811, Preparasi Sel Baterai NMC 811 dan Pengujian Performa Elektrokimianya ..	39
5 RINGKASAN	49
DAFTAR PUSTAKA	51
UCAPAN TERIMA KASIH	53
CURRICULUM VITAE	55

PENGEMBANGAN PROSES EKSTRAKSI DAN PEMURNIAN BIJIH NIKEL LATERIT BERKADAR RENDAH UNTUK MENGHASILKAN BAHAN BAKU KATODA BATERAI LITHIUM-ION

1. PENDAHULUAN

Komitmen global untuk menggunakan energi yang lebih ramah lingkungan dan menurunkan dampak negatif dari emisi gas rumah kaca telah mendorong penggunaan kendaraan listrik sebagai sarana transportasi. Industri kendaraan listrik diprediksi akan tumbuh cepat pada tahun-tahun yang akan datang. Indonesia dapat memainkan peranan yang strategis ke depan karena memiliki bahan baku primer untuk baterai kendaraan listrik, khususnya nikel, kobalt, aluminium, tembaga dan mangan serta pasar domestik mobil dan kendaraan bermotor yang cukup besar. Penelitian dan pengembangan baterai lithium untuk aplikasi kendaraan listrik telah dilakukan oleh berbagai institusi di dalam negeri, namun belum ada atau masih sangat terbatas yang berbasiskan pada material-material yang dibuat dari bahan baku yang ada di dalam negeri. Salahsatu jenis baterai mobil listrik yang banyak dikembangkan saat ini dan ke depan adalah baterai lithium-ion tipe *nickel-manganese-cobalt-oxide* (disingkat NMC) yang mempunyai energi spesifik tinggi, umur pakai yang lama, dan keamanan yang baik dengan material penyusun katodanya adalah oksida lithium-nikel-mangan-kobalt.

Dengan tuntutan harga baterai yang lebih murah, proporsi penggunaan kobalt semakin dikurangi dengan menambah proporsi massa nikel.

Rute proses pengolahan dan pemurnian bijih nikel laterit berkadar rendah untuk menghasilkan material penyusun katoda baterai lithium-ion umumnya dilakukan melalui jalur hidrometalurgi yang meliputi tahap-tahap *leaching* (pelindian) bijih atau *matte*, pemurnian larutan hasil pelindian, dan *recovery* nikel dan kobalt dari larutan hasil pelindian yang sudah dimurnikan dalam bentuk garam sulfat murninya. Pada orasi ilmiah guru besar ini dibahas potensi nikel Indonesia, pertumbuhan industri kendaraan listrik dan baterai untuk kendaraan listrik, proses ekstraksi dan pemurnian bijih nikel laterit berkadar rendah dan hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan oleh penulis untuk mensintesis nikel sulfat murni dari bijih nikel laterit berkadar rendah, dimulai dari proses pelindian (*leaching*), pemurnian larutan hasil pelindian, presipitasi campuran nikel-kobalt hidroksida, pemurnian larutan hasil pelindian nikel-kobalt hidroksida melalui ekstraksi pelarut dan oksidasi-presipitasi selektif serta kristalisasi nikel sulfat murni yang dilakukan di ITB. Produk nikel sulfat yang dihasilkan kemudian dipreparasi menjadi material prekursor katoda, dilakukan karakterisasi dan dirakit menjadi beberapa sel baterai tipe NMC 811 serta diuji kinerja elektrokimianya. Performa elektrokimia sel baterai NMC 811 ini dibandingkan dengan performa sel baterai NMC 811 dengan material prekursor katoda komersial dan material prekursor katoda dengan sumber nikel dari nikel sulfat komersial dan campuran nikel-kobalt hidroksida yang belum murni.

Hasil pengujian sel baterai NMC 811 yang dipreparasi katodanya dengan nikel sulfat produk sintesis dari bijih nikel laterit asal Pulau Halmahera melalui rute pelindian MHP, SX 3 tahap dan kristalisasi menghasilkan performa yang sedikit lebih baik dibandingkan dengan sel baterai NMC 811 yang katodanya dibuat dari prekursor komersial dan nikel sulfat komersial. Hasil pengujian *charge-discharge* sel baterai NMC 811 yang dipreparasi katodanya dengan nikel sulfat produk sintesis dari bijih menghasilkan nilai kapasitas spesifik *charge-discharge* 189,71 mAh/g dan 178,93 mAh/g, efisiensi awal 94,32%, sementara sel baterai NMC 811 yang katodanya dari prekursor komersial mempunyai kapasitas spesifik *charge-discharge* 158,28 mAh/g dan 149,05 mAh/g dengan efisiensi awal 94,17%. Performa sel baterai NMC 811 yang dipreparasi katodanya dengan nikel sulfat produk sintesis sedikit di atas rata-rata baterai NMC 811 komersial yaitu pada level 160-180 mAh/g. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kemurnian material bahan baku prekursor katoda mempunyai pengaruh signifikan terhadap performa baterai. Hal ini terlihat dari hasil pengujian sel baterai NMC 811 yang sumber nikel dalam bahan baku prekursor katodanya dari MHP yang mempunyai kapasitas *discharge* dan efisiensi awal yang signifikan lebih rendah (*discharge capacity* 60,97 mAh/g, efisiensi awal hanya 37%) dibandingkan sel baterai NMC 811 yang sumber nikelnya dari nikel sulfat yang lebih murni, baik produk sintesis maupun dari bahan kimia komersial. Integrasi penelitian di hulu dan hilir berkaitan dengan sintesis material aktif baterai dari bahan baku mineral dalam negeri dan aplikasinya pada baterai untuk kendaraan litrik

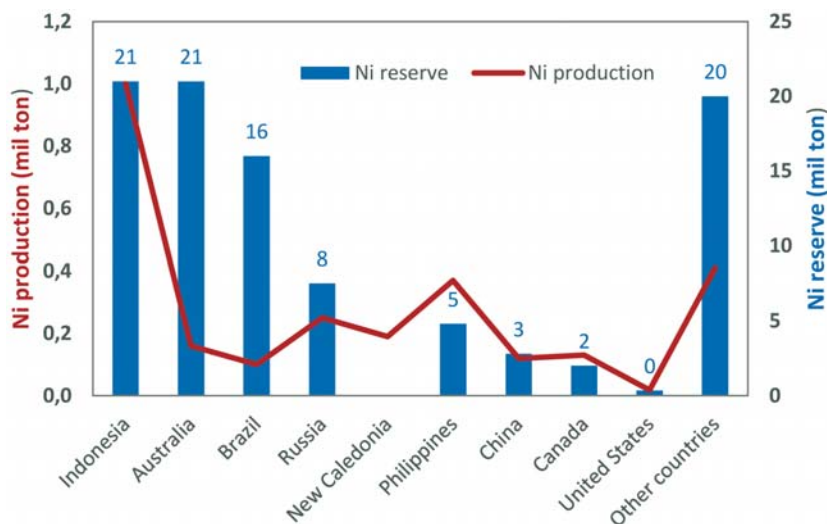
perlu terus didorong agar keunggulan komparatif Indonesia terkait ketersediaan bahan baku ini dapat dikonversi menjadi keunggulan nasional dan bermanfaat sebesar-besarnya untuk masyarakat.

2. POTENSI NIKEL INDONESIA

Menurut data terkini *Minerals Commodity Summaries*, Januari 2022, yang dikeluarkan oleh the United State Geological Survey (USGS) awal tahun 2022, Indonesia mempunyai cadangan (*reserve*) dan produksi nikel terbesar di dunia yaitu masing-masing sebesar 21 juta dan 1 juta ton nikel-ekivalen pada Tahun 2021. Pada Gambar 2.1 disajikan data cadangan nikel dan produksi nikel berbagai negara di dunia tahun 2021 (diolah dari data USGS, Januari 2022), dimana cadangan produksi nikel dari tambang di Indonesia menempati peringkat pertama di dunia yaitu masing-masing sekitar 21 juta ton nikel-ekivalen dan 1 juta nikel ekivalen. Kondisi dimana Indonesia menjadi produsen nikel terbesar di dunia ini sudah berlangsung sejak Tahun 2017. Cadangan nikel yang dilaporkan oleh USGS ini jauh lebih kecil dari cadangan yang dilaporkan oleh Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral (ESDM), yang melaporkan cadangan nikel sebesar 49 juta ton nikel pada Tahun 2020 (Grand Strategy Mineral dan Batubara, KemESDM, 2021).

Cadangan nikel di Indonesia adalah dalam bentuk deposit nikel laterit yang merupakan produk laterisasi atau pelapukan batuan ultramafik (batuan yang mengandung magnesium dan besi). Berbeda dengan bijih

nikel tipe sulfida, bijih nikel laterit berada pada kedalaman yang relatif dangkal yaitu sekitar 15-20 meter di bawah permukaan tanah sehingga lebih mudah ditambang dengan biaya penambangan yang lebih murah dibandingkan dengan penambangan bijih sulfida.



Gambar 2.1. Profil produksi dan cadangan nikel dunia Tahun 2021 (sumber: minerals commodity summaries, January 2022, United State Geological of Survey, data diolah)

Deposit nikel laterit mempunyai tiga lapisan utama yaitu lapisan *ferricrete* atau *iron cap*, lapisan limonit dan saprolit. Zona *ferricrete* (atau disebut tudung besi) merupakan lapisan paling atas dari deposit nikel laterit, yang komponen utamanya adalah mineral besi oksida dengan kadar Fe sekitar 60% dan kadar Ni yang rendah (<0,8%). Lapisan ini umumnya menjadi *overburden* saat penambangan bijih nikel laterit. Di bawah lapisan *iron cap* terdapat lapisan limonit, yang secara tipikal

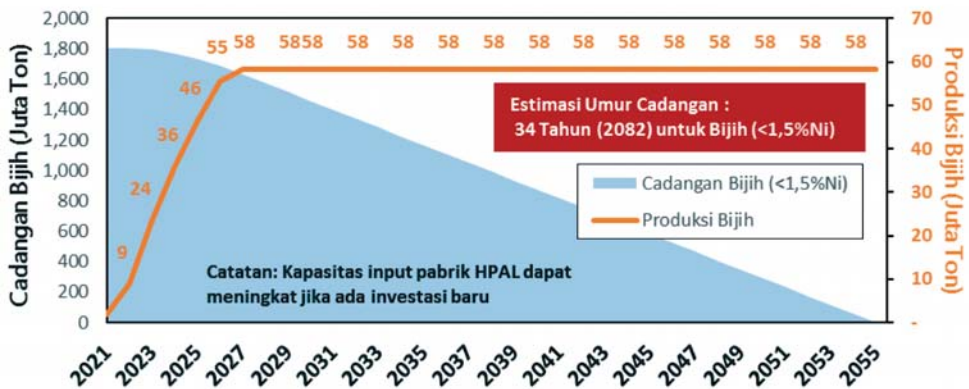
mengandung 40-50%Fe, 0,8-1,5% Ni dan 0,1-0,2%Co serta kandungan $\text{MgO} < 5\%$ (Dalvi, dkk., 2004). Mineral dominan pada bijih limonit umumnya adalah *goethite* ($\alpha\text{-FeOOH}$) dimana nikel oksida berada dalam bentuk larutan padat di dalam matriks mineral *goethite* ini. Dibawah lapisan limonit dan di atas lapisan *bedrock* terdapat lapisan saprolit yang mengandung sekitar 10-25% Fe, 1,5-3% Ni, 15-35% MgO dan 0,02-0,1%Co. Mineral dominan dalam bijih saprolit adalah *serpentine* ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) dan *garnierite* ($(\text{Ni,Mg})_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$).

Selama kurang lebih 40 tahun sejak 1974 hingga 2014, yaitu saat diberlakukan Undang-Undang No. 4 Tahun 2009 mengenai Mineral dan Batubara (yang salah satu klausul pentingnya adalah kewajiban pengolahan dan pemurnian di dalam negeri), hanya terdapat dua pabrik pengolahan dan pemurnian bijih nikel laterit di dalam negeri yaitu pabrik peleburan ferronikel (FeNi) di Pomalaa, Kabupaten Kolaka, Sulawesi Tenggara dan pabrik nikel matte (Ni_3S_2) di Sorowako, Sulawesi Selatan dengan total produksi tahunan sekitar 90.000 ton nikel ekuivalen per tahun. Setelah Tahun 2014 hingga Tahun 2021 terdapat 27 pabrik peleburan FeNi , *nickel pig iron* (NPI) dan nikel matte dengan total produksi tahunan mencapai 0,76 juta ton nikel-ekivalen per tahun (Grand Strategy Mineral dan Batubara, KemESDM, 2021). Selain pabrik FeNi , NPI dan nikel matte, pada saat ini juga sudah beroperasi pabrik-pabrik pembuatan baja tahan karat (*stainless steel*) pada beberapa kawasan industri di dalam negeri dengan bahan baku NPI yang diproduksi di tempat yang sama. Pabrik-

pabrik FeNi, NPI dan nikel matte yang disebutkan di atas baru mengolah bijih nikel laterit di dalam negeri yang berkadar nikel tinggi yaitu bijih tipe saprolit. Hingga saat ini, pemanfaatan bijih nikel laterit berkadar rendah tipe limonit di dalam negeri masih sangat terbatas. Baru pada Tahun 2021, beroperasi pabrik pengolahan bijih limonit yang pertama di Indonesia yang menggunakan teknik *high pressure acid leaching* (HPAL) dengan produk akhir berupa *Mixed Hydroxide Precipitate* (MHP). Pabrik HPAL tersebut berlokasi di Pulau Obi, Kabupaten Halmahera Selatan, Provinsi Maluku Utara, yang dioperasikan oleh PT. Halmahera Persada Lygend. Kapasitas produksi pabrik HPAL di Pulau Obi ini adalah sebesar 31.000 ton-nikel dalam bentuk MHP. Selain pabrik di Pulau Obi tersebut, pada awal Tahun 2022 ini, satu pabrik HPAL lainnya di Kawasan Industri Morowali, Sulawesi Tenggara dengan kapasitas 50.000 ton-nikel per tahun dalam bentuk MHP juga mulai memproduksi secara komersial. Selain 2 pabrik tersebut, masih terdapat 9 pabrik hidrometalurgi lainnya yang direncanakan beroperasi dalam beberapa tahun ke depan dengan produk akhir berupa MHP dan nikel sulfat. Perlu dicatat bahwa MHP ini masih perlu dimurnikan menjadi bahan baku katoda baterai EV (yaitu menjadi nikel sulfat dan kobalt sulfat), sebelum dapat digunakan sebagai bahan baku katoda baterai, khususnya baterai NMC. Perlu pengembangan fasilitas-fasilitas pemurnian MHP di dalam negeri sehingga ekosistem industri baterai EV dapat tumbuh di dalam negeri dengan adanya ketersediaan bahan bakunya.

Ketersediaan bijih limonit ini masih cukup besar jika dibandingkan dengan bijih saprolit. Jika diasumsikan tidak ada penambahan cadangan dan konsumsi bijih mencapai tingkatan di mana semua pabrik yang direncanakan telah terbangun dan seluruhnya beroperasi (210 juta ton bijih basah per tahun dengan asumsi tidak terdapat penambahan *smelter* lebih lanjut), maka cadangan bijih dengan kandungan Ni > 1,7% akan habis pada Tahun 2031. Sementara itu, bijih pemanfaatan bijih limonit masih terbatas, dimana jika diasumsikan semua pabrik hidrometalurgi yang direncanakan telah terbangun dan seluruhnya beroperasi serta tidak terdapat penambahan pabrik yang baru, maka cadangan bijih untuk kandungan Ni < 1,5% masih dapat bertahan hingga tahun 2055, seperti diilustrasikan pada Gambar 2.2. (Grand Strategy Mineral dan Batubara, KemESDM, 2021).

Bijih nikel laterit berkadar rendah tipe limonit umumnya mempunyai kadar kobalt yang lebih tinggi dibandingkan bijih saprolit. Selain itu, bijih nikel limonit diketahui juga mengandung logam tanah jarang, khususnya scandium (Sc), yang disebut sebagai *critical metal* karena ketersediaannya yang sangat jarang dan penggunaannya untuk aplikasi-aplikasi strategis di dunia moderen seperti paduan aluminium untuk pesawat terbang dan bahan elektrolit padat untuk *fuel cell*. Ke depan nikel dan kobalt akan menjadi logam-logam strategis dengan tumbuh pesatnya industri kendaraan listrik yang menggunakan baterai lithium-ion berbasis nikel-kobalt dan membutuhkan kedua logam ini sebagai material penyusun katoda-nya.

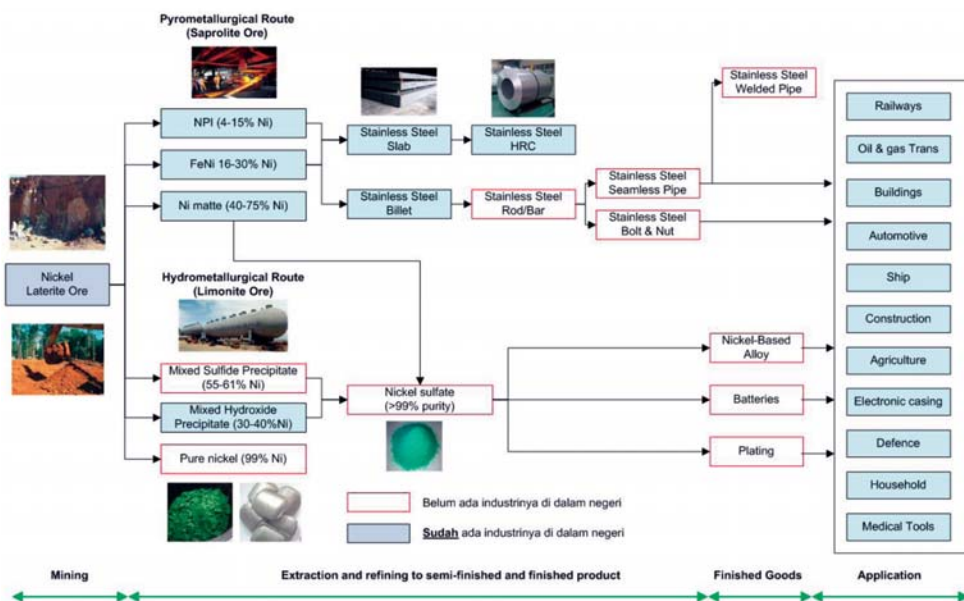


Gambar 2.2. Umur cadangan dan produksi bijih nikel laterit berkadar rendah di Indonesia (<1,5%Ni) yang diproses dengan teknologi hidrometalurgi (Grand Strategy Mineral dan Batubara, KemESDM, 2021).

3. PROSES EKSTRAKSI DAN PEMURNIAN BIJIH NIKEL LATERIT DAN PENGGUNAAN NIKEL PADA BATERAI

Pengolahan dan pemurnian bijih nikel laterit dapat dilakukan dengan jalur pirometalurgi, hidrometalurgi atau kombinasi keduanya. Proses pirometalurgi dan hidrometalurgi masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Salahsatu kelebihan proses hidrometalurgi adalah dapat menghasilkan nikel murni sebagai produk akhir dan dapat memisahkan kobalt dan logam tanah jarang (khususnya skandium) sehingga dapat memberikan tambahan pendapatan yang signifikan dari logam-logam ini sebagai produk samping. Teknologi pengolahan bijih nikel laterit dengan jalur pirometalurgi misalnya adalah teknologi ELKEM dengan menggunakan *rotary dryer-rotary kiln-electric smelting furnace* untuk menghasilkan paduan *ferronickel* (FeNi), *nickel pig iron* (NPI), dan nikel

matte. Sementara itu, teknologi hidrometalurgi yang sudah teruji (*proven*) untuk pengolahan bijih nikel laterit berkadar rendah yaitu Teknologi Caron dan *High Pressure Acid Leaching* (HPAL). Proses HPAL menggunakan asam sulfat sebagai reagen pelindi (*leaching agent*) dimana proses pelindian dilakukan pada temperatur 240-270°C dan tekanan 33-55 atm. Pohon industri nikel dan informasi ketersediaan industrinya di dalam negeri ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Pohon industri nikel dan informasi ketersediaan industrinya di dalam negeri (Kemenperin, 2019, di-update).

Proses *High Pressure Acid Leaching* (HPAL) merupakan proses yang saat ini paling banyak digunakan secara komersial dan dianggap handal untuk mengekstraksi nikel dari bijih nikel laterit tipe limonit. Pada saat ini

terdapat 9 pabrik HPAL yang beroperasi di dunia, dimana pabrik-pabrik terbaru sudah merupakan generasi ketiga dari teknologi ini (Tsuchida, 2015, Shibayama, 2016). Di Indonesia, pada Tahun 2022 ini baru terdapat 2 pabrik HPAL yang beroperasi secara komersial, masing-masing memulai operasinya pada Tahun 2021 dan 2022. Proses HPAL mempunyai kelebihan dalam hal tingkat *recovery* nikel dan kobalt yang tinggi (hingga 96%), kinetika pelindian yang cepat (hanya sekitar 1 jam) dan selektif terhadap besi sehingga konsumsi asam pada proses HPAL jauh lebih rendah dibandingkan proses pelindian pada tekanan atmosfer. Namun demikian, HPAL membutuhkan biaya investasi yang besar dan permasalahan-permasalahan operasional seperti korosi dan *scaling* sehingga biaya perawatan pabrik cukup tinggi dan *plant availability*-nya relatif rendah (Taylor, 2016). Olehkarena itu, teknologi pelindian pada tekanan atmosfer yang lebih murah dan lebih mudah dioperasikan, masih terus diteliti.

Proses pelindian pada tekanan atmosfer dilakukan pada suhu sekitar 100°C. Kelemahan proses pelindian pada tekanan atmosfer dengan reagen pelindi asam ialah tidak selektif terhadap besi dan aluminium sebagaimana proses HPAL sehingga konsumsi asam-nya tinggi. Selain itu, *recovery* nikel dan kobalt proses pelindian pada tekanan atmosfer juga lebih rendah dari proses HPAL dengan kinetika pelindian yang lebih lambat. Beberapa pengembangan teknologi *atmospheric leaching* untuk bijih nikel laterit meliputi penggunaan *leaching agent* yang dapat diregenerasi seperti asam klorida (HCl) dan asam nitrat (HNO₃) seperti

pada proses-proses Jaguar, Intec, Posco, Arni, Direct Nickel (DNi), penggunaan air laut atau penambahan garam untuk mempresipitasi besi sebagai sodium-*jarosite* selama proses pelindian, penggunaan bijih dengan kadar besi rendah (bijih transisi) dan membatasi jumlah asam yang digunakan, misalnya teknologi *Starved Acid Leaching* (SALT) dan proses *bioleaching*.

Terdapat beberapa jenis produk pabrik pengolahan dan pemurnian bijih nikel laterit dengan jalur hidrometalurgi. Produk-produk tersebut meliputi nikel dan kobalt murni, maupun *intermediate products* seperti *mixed hydroxide precipitate* (MHP), *mixed sulfide precipitate* (MSP), *mixed oxide* dan nikel sulfat serta kobalt sulfat. Masing-masing pilihan jenis produk mempunyai kelebihan dan kekurangannya dari sisi kadar nikel dan kemurnian produk, kompleksitas proses produksinya, serta kompleksitas proses lanjutan untuk menghasilkan produk yang lebih murni. Produk MHP relatif lebih mudah diproduksi karena proses presipitasinya dapat dilakukan pada tekanan atmosfer dan pelindian kembali MHP juga dapat dilakukan dalam reaktor pada tekanan atmosfer. Disisi lain, MSP memiliki kelebihan dari segi kadar nikel yang lebih tinggi dan kadar *impurities* yang lebih rendah dimana besi, magnesium, dan mangan tidak bereaksi membentuk senyawa-senyawa sulfida. Namun demikian, proses presipitasi MSP dan pelindiannya kembali untuk pemisahan nikel dan kobalt harus dilakukan pada suhu dan tekanan tinggi dalam suasana oksidatif di dalam sebuah *autoclave*. Jenis produk pengolahan dan pemurnian yang akan banyak dibutuhkan diproduksi ke

depan adalah nikel sulfat dan kobalt sulfat untuk memenuhi kebutuhan material katoda baterai mobil listrik (Warner, et al., 2018, McKinsey & Company, 2017).

Menurut laporan Bloomberg, penjualan mobil listrik (*electric vehicle*, EV) meningkat 2x lipat pada akhir Tahun 2021 dibandingkan total penjualan pada Tahun 2020. Menurut prediksi Bloomberg New Energy Finance 2018, penjualan mobil listrik akan mencapai sekitar 55% dari total penjualan mobil di dunia pada tahun 2040, dimana sekitar 45% diantaranya adalah mobil listrik berbasis baterai (*battery-based electric vehicle*, BEV). Baterai merupakan komponen kunci EV yang menyumbang sekitar 35-40% dari harga EV pada saat ini. Jenis baterai yang selama ini paling banyak digunakan adalah baterai lithium-ion. Komponen utama biaya pembuatan baterai lithium-ion adalah biaya material (55-60%), dan sebagian besar adalah biaya untuk material katoda (lithium, nikel, kobalt, mangan).

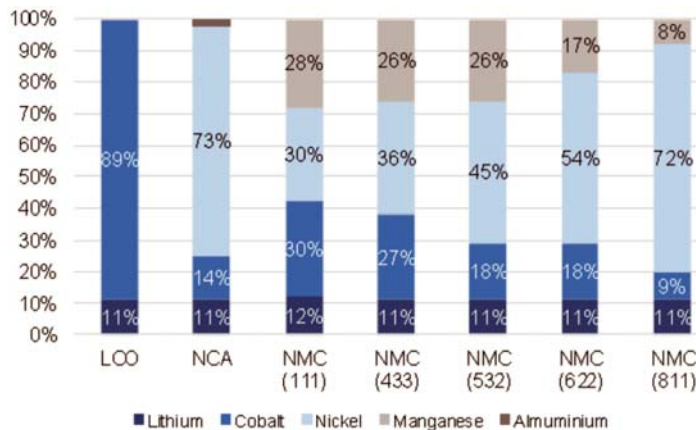
Sebuah sel baterai lithium ion untuk kendaraan listrik terdiri dari anoda, katoda, elektrolit, separator dan pengumpul arus (*current collector*). Katoda berfungsi sebagai elektroda positif tempat berlangsungnya reaksi reduksi ion lithium ketika baterai bekerja (*discharge*). Anoda berfungsi sebagai elektroda negatif yang melepaskan ion lithium melalui elektrolit dan elektron melalui konduktor elektronik menuju katoda. Material anoda yang banyak digunakan adalah grafit dan silikon. Separator berfungsi mencegah kontak langsung antara anoda dan katoda, namun

tetap dapat dilewati ion lithium. Pelat tembaga umumnya digunakan sebagai pengumpul arus (*current collector*) di anoda, sementara untuk pengumpul arus di katoda digunakan aluminium. Kebutuhan akan logam-logam penyusun baterai ini terus meningkat seiring peningkatan produksi mobil listrik.

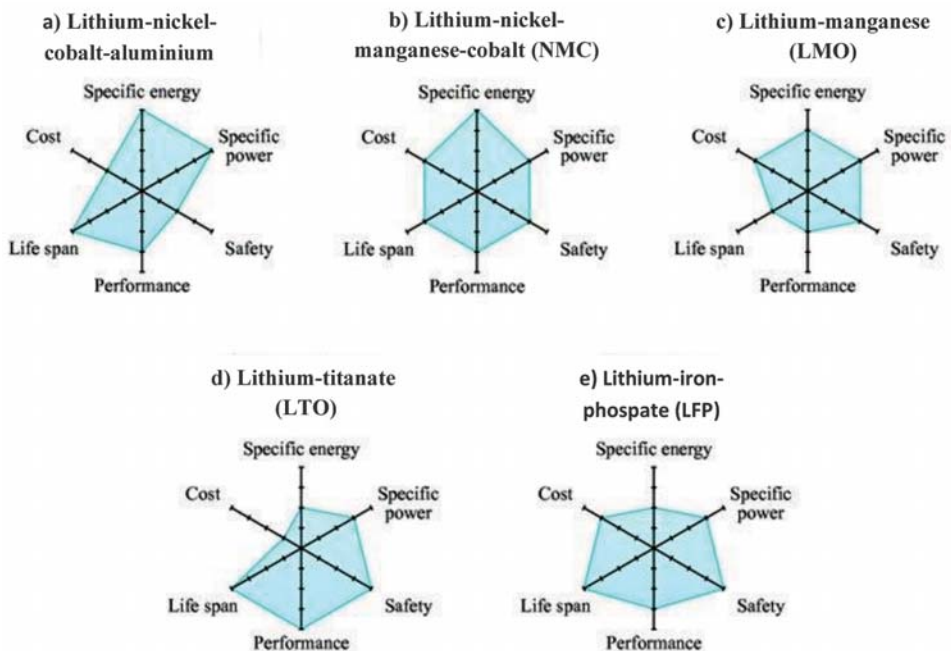
Jenis-jenis baterai mobil listrik diklasifikasikan berdasarkan jenis material penyusun katodanya. Berikut ini adalah jenis-jenis baterai mobil listrik yang paling banyak digunakan:

1. Lithium Cobalt Oxide (LiCoO_2) - **LCO**
2. Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (LiNiCoAlO_2) - **NCA**
3. Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (LiNiMnCoO_2) - **NMC**
4. Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) - **LFP**

Proporsi material aktif di katoda untuk baterai-baterai mobil listrik jenis LCO, NCA dan NMC ditunjukkan pada Gambar 3.2. Untuk menurunkan harga baterai, proporsi kobalt dalam material katoda semakin dikurangi dan jenis yang banyak dikembangkan adalah baterai tipe NMC, dimana proporsi massa nikel pada material katoda jenis NMC ini dapat mencapai 72% dengan rasio mol nikel : mangan : kobalt 8:1:1 (NMC 811). Baterai NMC mempunyai energi spesifik (keluaran energi per satuan berat) yang baik, keamanan dan harga yang lebih baik jika dibandingkan dengan baterai LCO. Perbandingan energi spesifik, daya spesifik, keamanan (*safety*), performa, umur pakai dan biaya pembuatan untuk 4 jenis baterai listrik (LCO, NCA, NMC dan LFP) disajikan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.2. Proporsi material aktif di katoda untuk baterai-baterai mobil listrik jenis LCO, NCA dan NMC



Gambar 3.3. Perbandingan energi spesifik, daya spesifik, keamanan (safety), performa, umur pakai dan biaya pembuatan dan 5 jenis baterai mobil listrik: a) LCO, b) NMC, c)LMO, d)LTO dan e)LFP

Pada saat ini semua pabrikan mobil terkemuka di dunia telah memproduksi varian mobil listrik. Beberapa negara di dunia seperti Norwegia, Prancis, Belanda dan China telah mempercepat penggunaan penuh mobil listrik pada kota-kota tertentu. Di Indonesia telah ditandatangani Peraturan Presiden mengenai Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai untuk Transportasi Jalan yaitu Perpres No. 55 Tahun 2019. Indonesia memiliki pasar domestik untuk mobil dan sepeda motor yang cukup besar di dalam negeri yaitu sekitar 2 juta mobil per tahun pada saat ini.

Sebagian besar material logam yang dibutuhkan untuk pembuatan baterai mobil listrik tersedia di dalam negeri, kecuali lithium yang proses eksplorasinya masih terus ditingkatkan. Perlu integrasi hulu-hulu di dalam negeri antara berbagai komoditas pengolahan dan pemurnian mineral yaitu nikel dan kobalt dengan aluminium, mangan dan tembaga untuk mendukung industri baterai mobil listrik ini dan juga antara hulu-hilir antara industri yang memproduksi bahan baku dengan industri baterai serta mobil listrik.

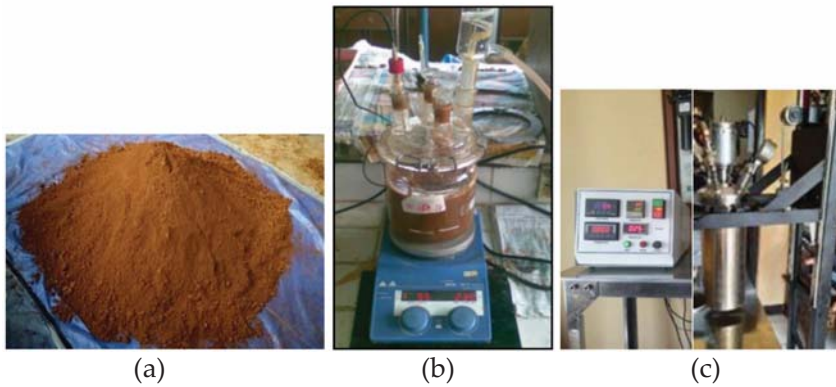
4. RISET YANG TELAH DILAKUKAN PENULIS DI ITB

Penelitian mengenai proses ekstraksi dan pemurnian nikel dari bijih nikel laterit di KK Teknik Metalurgi dilakukan di Laboratorium Pengolahan Bahan Galian, Laboratorium Pirometalurgi dan Laboratorium Hidro-elektrometalurgi, FTTM-ITB. Dalam 10 tahun

terakhir cukup banyak kegiatan penelitian yang dilakukan penulis di Laboratorium Hidro-elektrometalurgi baik pada tahap paling hulu yaitu proses ekstraksi nikel dan kobalt melalui mekanisme pelarutan selektif (pelindian/*leaching*) dari bijih nikel laterit berkadar rendah, proses pemurnian larutan hasil pelindian, sintesis produk antara berupa presipitat nikel-kobalt hidroksida (*mixed hydroxide precipitate*, MHP), proses pemurnian lebih lanjut MHP melalui pemisahan nikel dan kobalt terlarut dari unsur-unsur pengotor dengan ekstraksi pelarut (*solvent extraction*), dan presipitasi selektif-oksidatif, serta sintesis nikel sulfat murni ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Pada Tahun 2021 telah dilakukan pengujian sel baterai lithium NMC 811 yang bahan baku prekursor katodanya menggunakan nikel sulfat yang disintesis dari proses pemurnian MHP.

4.1 Pelindian dan Pemurnian Larutan Hasil Pelindian

Contoh foto sampel bijih limonit dan percobaan pelindian pada tekanan atmosfer dan pada suhu dan tekanan tinggi ditunjukkan pada Gambar 4.1. Contoh komposisi kimia sampel bijih limonit dari Pulau Halmahera yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 4.1.

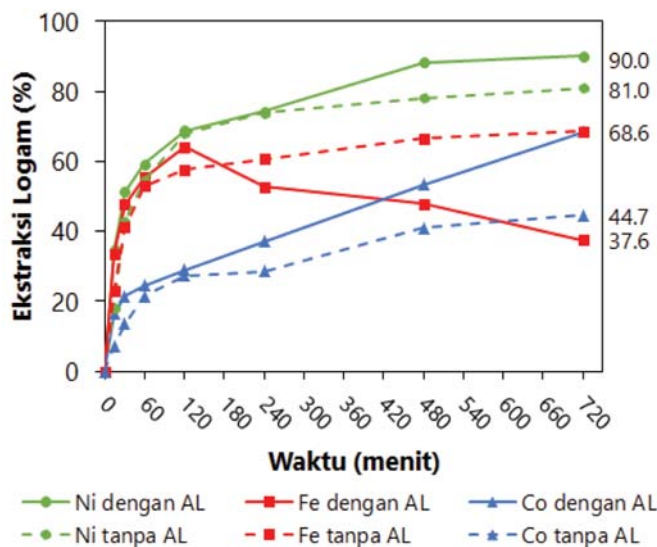


Gambar 4.1. Contoh foto sampel bijih limonit dan percobaan pelindian pada tekanan atmosfer dan pada suhu dan tekanan tinggi

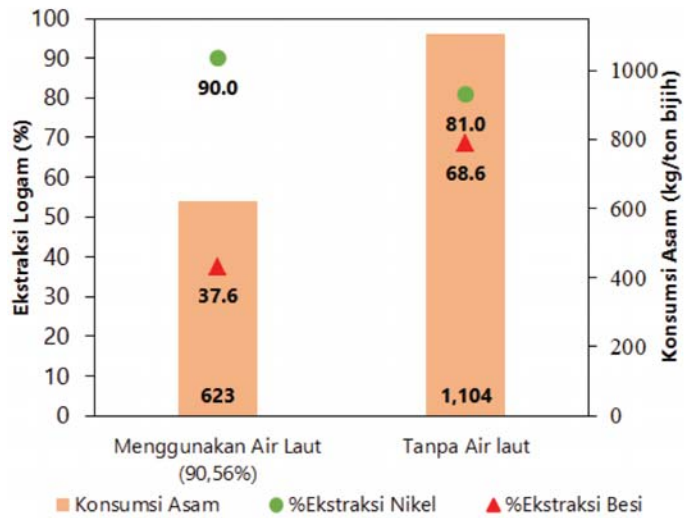
Tabel 4.1. Komposisi kimia sampel bijih limonit dari Pulau Halmahera yang digunakan dalam penelitian

Senyawa	Kadar (%)	Unsur	Kadar (%)
Fe ₂ O ₃	63,45	Fe	44,37
Al ₂ O ₃	8,96	Al	4,74
SiO ₂	2,61	Si	1,22
Cr ₂ O ₃	2,51	Cr	1,72
NiO	1,89	Ni	1,48
MnO	1,34	Mn	1,04
SO ₃	0,816	S	0,327
MgO	0,421	Mg	0,254
Co ₃ O ₄	0,18	Co	0,132
TiO ₂	0,115	Ti	0,0689
ZnO	0,0559	Zn	0,0449
V ₂ O ₅	0,0532	V	0,0298
CaO	0,0323	Ca	0,0231
CuO	0,0216	Cu	0,0173
Sc ₂ O ₃	0,0111	Sc	0,0072
LOI	17,51	Sc 72 ppm	

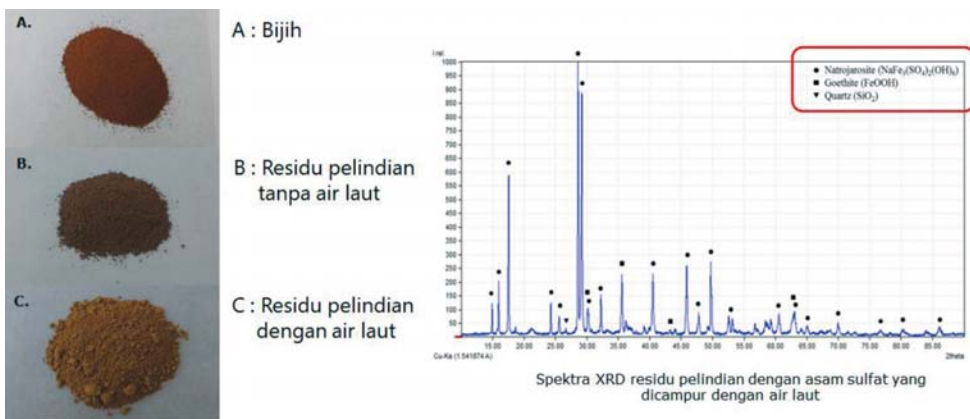
Salah satu fokus studi pelindian pada tekanan atmosfer adalah meminimalkan besi yang ikut terlarut dan menurunkan konsumsi asam sulfat dengan pengendapan besi dalam bentuk jarosit selama pelindian. Penggunaan air laut bersama-sama dengan asam sulfat sebagai reagen pelindi pada suhu 95°C berhasil menurunkan besi yang ikut terlarut hingga 31% (dari 68,6% turun menjadi 37,6%) yang berdampak pada penurunan konsumsi asam sulfat sebesar 481 kg/t-bijih dari 1104 kg/t-bijih menjadi 623 kg/t-bijih serta menaikkan persen ekstraksi nikel dari 81% menjadi 90% seperti diilustrasikan pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3. Hasil analisis XRD mengkonfirmasi pembentukan natro (sodium)- jarosit ($\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) dalam residu pelindian yang menggunakan air laut seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.2. Profil persen ekstraksi Ni, Co dan Fe terhadap waktu pada pelindian dalam larutan H_2SO_4 dan H_2SO_4 + air laut (AL) pada suhu 95°C, persen padatan 15%

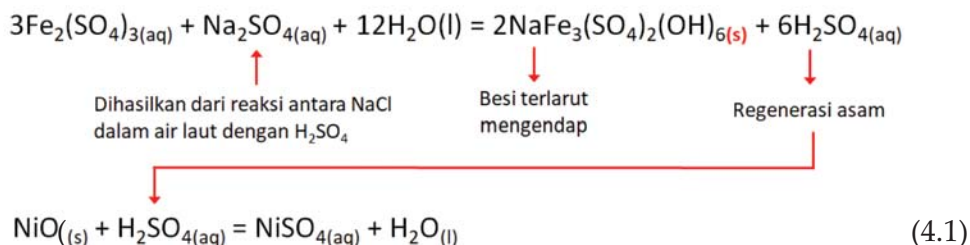


Gambar 4.3. Pengaruh penggunaan air laut bersama-sama dengan asam sulfat pada pelindian bijih limonit terhadap persen ekstraksi Fe dan Ni serta konsumsi asam (suhu 95°C, persen padatan 15%, fraksi ukuran bijih -40+65#, waktu 12 jam)



Gambar 4.4. Foto makro bijih dan residu pelindian pada tekanan atmosfer dengan dan tanpa air laut dan hasil analisis XRD yang mendeteksi natrojarosit dalam residu pelindian dengan air laut

Pembentukan senyawa *natro jarosite* yang mempunyai kelarutan yang rendah menyebabkan penurunan persen ekstraksi besi dengan berjalannya waktu (lihat Gambar 4.2) yang berlangsung secara simultan dengan regenerasi asam sulfat yang selanjutnya dapat meningkatkan ekstraksi nikel sebagaimana ditunjukkan oleh reaksi-reaksi berikut ini:



Meskipun penggunaan air laut pada pelindian dengan larutan asam sulfat pada tekanan atmosfer berhasil menurunkan persentase besi yang ikut terlarut dan konsumsi asam, terdapat beberapa kekurangan dan isu terkait metode ini yang masih perlu dipelajari lebih lanjut, yaitu:

- Kestabilan residu yang kaya jarosit dalam area penimbunan residu (*residue disposal area*) dibandingkan hematit dan *goethite*.
- Volume residu yang kaya jarosit relatif lebih besar dibandingkan dengan residu dengan presipitat besi berupa hematit atau *goethite*
- Perilaku *settling* partikel jarosit pada saat dikentalkan dan kemudahannya difiltrasi
- Risiko kontaminasi ion klorida dari air laut dalam produk (MHP, Ni-sulfat)
- Pengaruh ion klorida dari air laut terhadap korosi peralatan yang digunakan

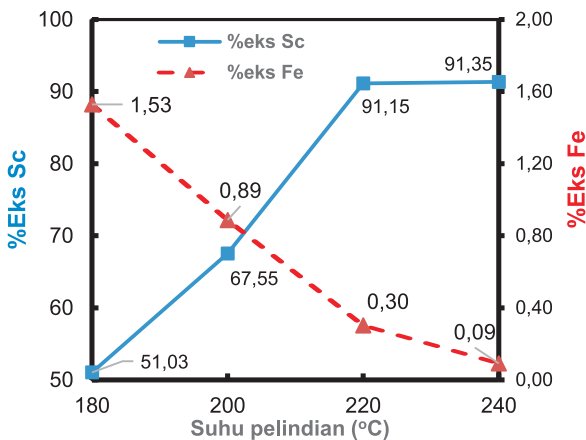
Hasil percobaan pelindian pada tekanan atmosferik yang menarik lainnya adalah *indirect bioleaching* dengan menggunakan asam organik, khususnya asam sitrat yang digenerasi secara terpisah dengan bantuan jamur *Aspergillus niger* dalam media kultur cassava starch, nitrogen, fosfat and magnesium sulfat yang diaerasi. Asam organik yang dihasilkan dapat melarutkan nikel hingga 88.9% dari bijih saprolit pada 95°C setelah 24 jam dengan co-ekstraksi Mg hanya 1.5% (Siti Khodijah Chaerun, et al., Hydrometallurgy Volume 174, 2017). Hasil percobaan pelindian agitasi pada tekanan atmosfer menggunakan campuran asam sulfat dan asam sitrat komersial juga menunjukkan hasil yang mirip dimana penggunaan asam sitrat dapat meningkatkan selektivitas pelindian terhadap magnesium, sehingga lebih sesuai untuk bijih saprolite atau bijih transisi (F.E. Yunita and M.Z. Mubarak, 2021).

Hasil-hasil percobaan pelindian pada suhu dan tekanan tinggi dalam sebuah *autoclave* mengkonfirmasi bahwa Proses HPAL selektif terhadap besi dan membutuhkan konsumsi asam yang jauh lebih rendah dibandingkan proses pelindian pada tekanan atmosfer. Percobaan pelindian bijih limonit dari Pulau Halmahera pada suhu 240°C dan tekanan 40 bar, penambahan asam 300 kg/ton-bijih kering (300 g-asam/kg-bijih kering) selama 2 jam dengan persen padatan 30% dan fraksi ukuran bijih -65+150 mesh menghasilkan persen ekstraksi nikel dan kobalt rata-rata masing-masing sebesar 93,74% dan 87,65%. Peningkatan suhu dan waktu proses cenderung meningkatkan persen ekstraksi nikel dan kobalt.

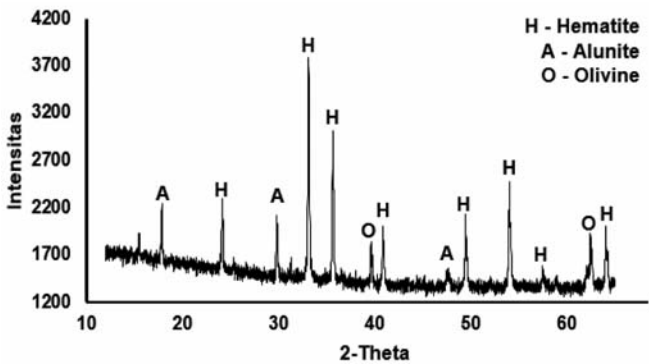
Pada kondisi yang sama dengan kondisi di atas, peningkatan waktu proses menjadi 4 jam menaikkan persen ekstraksi nikel dan kobalt masing-masing menjadi 95,52% dan 95,21%.

Selain persen ekstraksi Ni, Co yang lebih tinggi dalam waktu yang lebih singkat, dan konsumsi asam sulfat yang lebih rendah, percobaan HPAL menghasilkan ekstraksi skandium yang lebih tinggi dibandingkan percobaan pelindian agitasi pada tekanan atmosfer. Profil persen ekstraksi skandium dan besi sebagai fungsi suhu pada percobaan HPAL dengan penambahan asam 300 g/kg-bijih selama 4 jam persen, rasio solid/liquid $\frac{1}{4}$ g/ml ditunjukkan pada Gambar 4.5. Terlihat bahwa persen ekstraksi Fe semakin turun dengan naiknya suhu dari 180°C ke 240°C, sementara persen ekstraksi Sc semakin meningkat pada kenaikan suhu dalam rentang yang sama dari 51,03% pada suhu 180°C menjadi 91,35% pada suhu 240°C. Penurunan co-ekstraksi Fe dengan naiknya suhu karena hidrolisis Fe^{3+} menjadi hematit (Fe_2O_3) yang berlangsung lebih cepat pada suhu yang lebih tinggi. Keberadaan hematit dalam residu pelindi terkonfirmasi dari hasil analisis XRD residu pelindian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.6. Skandium merupakan logam tanah jarang yang saat ini harganya masih cukup mahal, dimana dalam bentuk garam florida (ScF_3) murni dan dalam bentuk paduan Al-Sc, harganya pada tahun 2021 masing-masing mencapai 216.000 USD/kg dan 350.000 USD/kg (Minerals Commodity Summaries, January 2022, USGS). Skandium merupakan logam *critical* yang digunakan untuk aplikasi-aplikasi

strategis seperti untuk pesawat tempur (paduan Al-Sc) dan elektrolit padat pada *solid oxide fuel cell* (SOFC). Proses *recovery* Sc dari bijih limonit sebagai produk samping selain nikel dan kobalt, akan memberikan peluang nilai tambah yang menarik. Konsentrasi larutan hasil percobaan HPAL dengan kondisi terbaik yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 4.2.



Gambar 4.5. Profil persen ekstraksi skandium dan besi sebagai fungsi suhu pada percobaan HPAL dengan penambahan asam 300 g/kg-bijih selama 4 jam persen, rasio solid/liquid ¼ g/ml



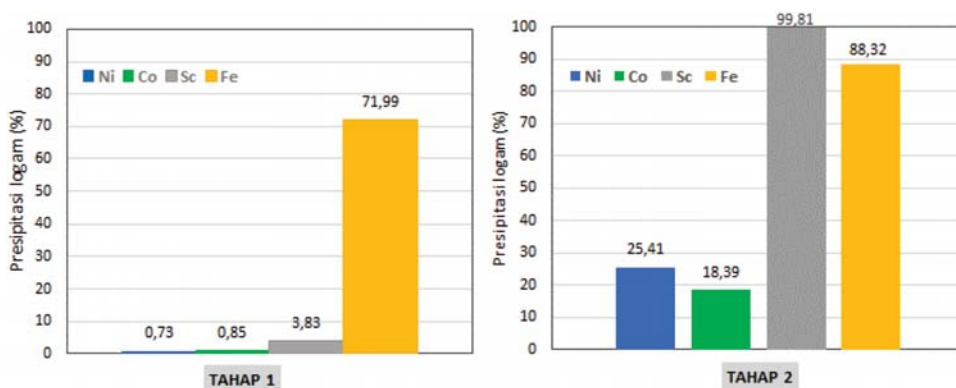
Gambar 4.6. Hasil analisis residu pelindian pada suhu 240°C, selama 4 jam dengan penambahan asam 300 g/kg-bijih selama 4 jam persen, rasio solid/liquid ¼ g/ml

Tabel 4.2. Konsentrasi larutan hasil percobaan HPAL dengan kondisi terbaik yang diperoleh (suhu 240°C, waktu 2 jam, rasio solid/ liquid 0,25 g/mL)

Logam terlarut	Konsentrasi (mg/l)
Ni	2233,3
Co	267,9
Sc	12,33
Fe	186,9
Al	2833,3
Mg	472,7
Mn	1233,3
Cr	513,9

Untuk memurnikan larutan hasil pelindian dan sekaligus memisahkan Sc dari Ni dan Co, pertama-tama dilakukan presipitasi Fe dan Al terlarut yang dilakukan dalam 2 tahap. Presipitasi Fe dan Al dalam 2 tahap ini juga dilakukan untuk meminimalkan Ni dan Co yang ikut mengendap bersama Fe dan Al, dimana presipitasi tahap pertama dari larutan hasil HPAL dilakukan pada pH 2,8 dilanjutkan presipitasi Fe dan Al tahap kedua pada pH 4,8. Presipitasi tahap pertama bertujuan memisahkan Fe dan Al, sementara presipitasi Fe tahap kedua dilakukan untuk mengendapkan Fe dan Sc. Profil persen presipitasi Fe, Sc, Ni dan Co dari percobaan presipitasi Fe 2 tahap dari larutan hasil percobaan HPAL ditunjukkan pada Gambar 4.7. Terlihat bahwa persen presipitasi Ni, Co, dan Sc pada tahap 1 cukup rendah, sebagaimana diinginkan yaitu masing-masing 0,73%, 0,85%, dan 3,83%. Sementara, pada presipitasi tahap 2, Fe dan Sc dapat diendapkan masing-masing 99,81% dan 88,32% dan co-

presipitasi Ni dan Co masing-masing 25,41% dan 18,39%. Nikel dan kobalt yang ikut mengendap ini tidak hilang, karena pada tahap selanjutnya Ni dan Co dilarutkan kembali dalam proses *re-leach* dan dipisahkan dari Sc dengan metode ekstraksi pelarut. Kadar Sc pada presipitat Fe tahap 2 meningkat 3,33x lipat dibandingkan kadar awalnya dalam bijih, yaitu dari 72 ppm meningkat menjadi 240 ppm. Hasil-hasil percobaan pelindian kembali presipitat Fe-Sc tahap 2 dan sintesis produk senyawa Sc tidak ditampilkan dalam orasi ilmiah ini, karena ingin fokus pada ekstraksi dan pemurnian nikel untuk material katoda baterai lithium-ion.

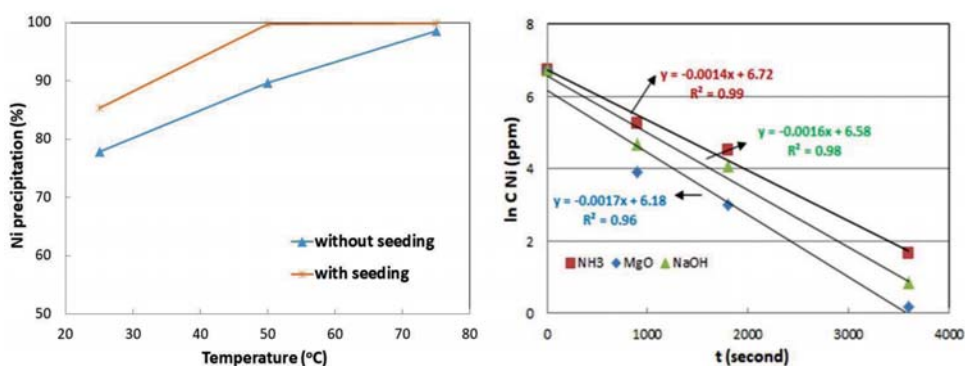


Gambar 4.7. Profil persen presipitasi Fe, Sc, Ni dan Co dari percobaan presipitasi Fe 2 tahap dari larutan hasil percobaan HPAL (tahap 1 pH 2,8, tahap 2 pH 4,8)

4.2 Sintesis Nikel-Kobalt Hidroksida sebagai Produk Antara

Tahap selanjutnya adalah percobaan sintesis nikel-kobalt hidroksida (MHP) yang telah dilakukan dari larutan hasil pelindian, baik pelindian pada tekanan atmosfer maupun tekanan tinggi yang telah dilakukan

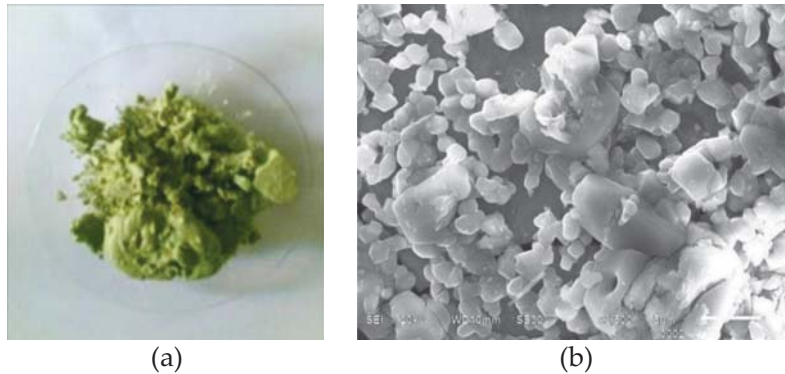
presipitasi besi terlarutnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *seed* MHP dan jenis *neutralizing agent* berpengaruh signifikan terhadap kinetika presipitasi ion Ni^{2+} dalam membentuk presipitat nikel hidroksida seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8. Serbuk magnesita (MgO) yang ditambahkan dalam bentuk *slurry* memberikan kinetika presipitasi $\text{Ni}(\text{OH})_2$ yang paling cepat diikuti oleh natrium hidroksida (NaOH) dan ammonia (NH_3). Partikel padat MgO yang tersuspensi dalam *slurry* memberikan efek pengintian (*seeding effect*) yang mempercepat laju nukleasi $\text{Ni}(\text{OH})_2$ sehingga berlangsung proses nukleasi heterogen partikel hidroksida yang berlangsung pada butiran MgO yang berfungsi sebagai *substrate* untuk pengintian.



Gambar 4.8. (a) Pengaruh suhu dan penambahan *seed* MHP terhadap persen presipitasi Ni (pH 7, waktu 1 jam) (b) Pengaruh jenis *neutralizing agent* terhadap kinetika presipitasi nikel (kinetika reaksi homogen orde pertama, suhu 50°C, pH 7)

Foto makro dan foto SEM presipitat MHP yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4.9. Hasil analisis menunjukkan bahwa MHP yang

diperoleh mengandung nikel 35,2% dengan pengotor utama besi dan magnesium masing-masing dengan kadar 0,53% dan 1,37%.



Gambar 4.9. (a) foto makro MHP yang diperoleh dari sintesis di laboratorium dan
(b) foto SEM MHP

4.3 Pemurnian Larutan Hasil Pelindian MHP dan Sintesis Nikel

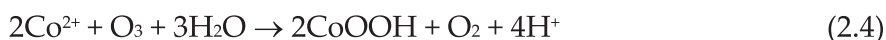
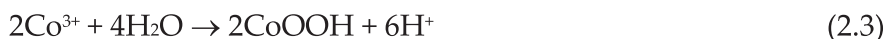
Sulfat

Studi pemurnian larutan hasil pelindian MHP dan pemisahan nikel dan kobalt telah dilakukan baik dengan menggunakan MHP yang disintesis sendiri di ITB maupun MHP yang diperoleh dari industri. Pemurnian larutan hasil pelindian MHP telah dilakukan dengan ekstraksi pelarut menggunakan jenis ekstrak tipe *carbocyclic acid*, yaitu Versatic 10 dan ekstrak tipe *phospinic acid*, yaitu Cyanex 272. Alternatif metode baru untuk memisahkan nikel dari kobalt dan mangan dalam larutan hasil pelindian MHP dalam larutan asam sulfat telah diteliti di laboratorium yaitu dengan metode presipitasi selektif-oksidatif menggunakan gas

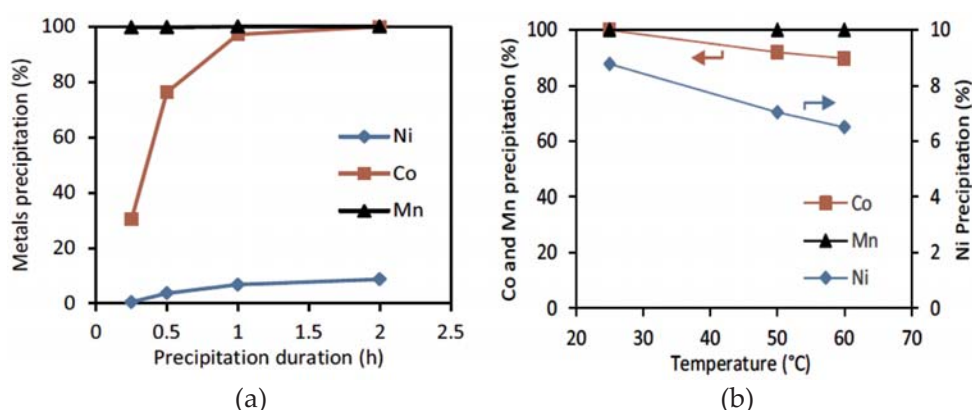
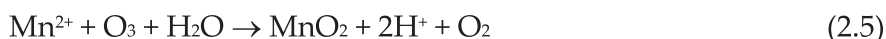
ozon. Dengan metode ini kobalt dan mangan terlarut dioksidasi masing-masing menjadi kobalt trivalent dan mangan tetravalent serta mengendapkannya masing-masing dalam bentuk kobalt oksihidroksida dan mangan dioksida. Untuk percobaan ini digunakan MHP komersial yang dari sebuah pabrik di Australia. Pada tahap *re-leach* MHP komersial ini, diperoleh persen ekstraksi nikel dan kobalt masing-masing 97% dan 96% dan dapat memisahkan 92% mangan dalam residu pada konsentrasi asam sulfat 1 molar, suhu 25°C, densitas *slurry* 100 g/L selama 2,5 jam.

Percobaan presipitasi selektif-oksidatif dengan oksidator gas ozon untuk memisahkan Co dan Mn dari Ni dilakukan pada pH 5.0 menggunakan larutan yang diperoleh dari percobaan pelindian MHP dari Australia yang mempunyai konsentrasi Ni, Co dan Mn masing-masing 48.1, 1.8 and 0.3 g/L. Profil presipitasi logam Ni, Co, Mn sebagai fungsi waktu dan suhu disajikan pada Gambar 4.10. Hasil percobaan menunjukkan bahwa presipitasi sempurna (100%) kobalt dan mangan dapat dicapai dalam waktu 2 jam dimana nikel yang ikut terpresipitasi sebesar 8,8%. Persen presipitasi kobalt dan nikel dalam 2 jam mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya suhu, sementara presipitasi mangan tidak terpengaruh oleh variasi suhu dalam rentang yang dikaji (25 s/d 60°C). Penurunan persen presipitasi Ni dan Co dengan kenaikan suhu ini karena penurunan kelarutan ozon dengan naiknya suhu larutan. Reaksi oksidasi Co(II) menjadi Co(III) oleh ozon terlarut berlangsung sebelum terjadi proses presipitasi cobalt dalam bentuk CoOOH sesuai

dengan reaksi-reaksi kimia sebagai berikut:



Sementara, Mn terlarut terpresipitasi melalui reaksi berikut:



Gambar 4.10. Presipitasi logam Ni, Co, Mn (a) sebagai fungsi waktu (suhu 25°C, pH 5, laju injeksi gas O₂ sebagai sumber O₃ 1 L/min dan (b) sebagai fungsi suhu (pH 5, laju injeksi gas oksidator 1 L/min, durasi proses 2 jam) (Z.T. Ichlas, Mubarak MZM., dkk, Hydrometallurgy Journal, Vol. 191, 2020)

Dengan metode presipitasi selektif-oksidatif ini dapat dihasilkan larutan kaya nikel yang mengandung 43,8 g/L nikel, 0,001 g/L kobalt dan kurang dari 0,0001 g/L mangan setelah dilakukan pemisahan presipitat kobalt hidroksida (CoOOH) dan mangan dioksida (MnO₂). Dengan hasil yang diperoleh tersebut, metode ini dapat menjadi alternatif metode

pemisahan nikel dari kobalt dan mangan dari larutan hasil *re-leach* MHP dengan metode ekstraksi pelarut (*solvent extraction SX*) secara bertahap. Rasio konsentrasi nikel terhadap konsentrasi kobalt dalam larutan yang dihasilkan adalah sekitar 42.000 yang secara signifikan lebih tinggi daripada larutan kaya nikel yang dihasilkan dengan ekstraksi pelarut di Queensland Nickel menggunakan ekstrak LIX® 84 dan Operasi Nikel di Bulong Australia yang menggunakan Cyanex® 272, yaitu masing-masing sekitar 4000 (Ritcey 2006) dan 1000 (Ritcey 2006; Donegan 2006). Metode ini baru pertama kali dilakukan untuk pemisahan nikel, kobalt dan mangan dari larutan hasil pelindian bijih nikel laterit dan hasil-hasil penelitian yang diperoleh telah dipublikasikan pada jurnal Hydrometallurgy Vol. 191, 2020. Penelitian ini masih terus dilanjutkan saat ini dimana terdapat 1 orang mahasiswa program doktor yang dibimbing penulis melakukan penelitian disertasi dengan topik ini. Metode ini telah dikembangkan lebih lanjut dengan menggunakan gas ozon berukuran nano dan juga akan dikombinasikan dengan SX dan elektrolisis Ni dari larutan kaya Ni yang dihasilkan untuk menghasilkan serbuk Ni. Serbuk nikel dapat dikonversi lebih lanjut menjadi nikel sulfat murni untuk bahan baku material prekursor katoda baterai lithium-ion dengan metode pelarutan kembali dalam larutan asam sulfat diikuti proses kristalisasi nikel sulfat. Tujuan yang ingin dicapai adalah mendapatkan rute proses baru untuk mensintesis nikel sulfat dan kobalt sulfat yang lebih sederhana dan mengurangi penggunaan bahan-bahan

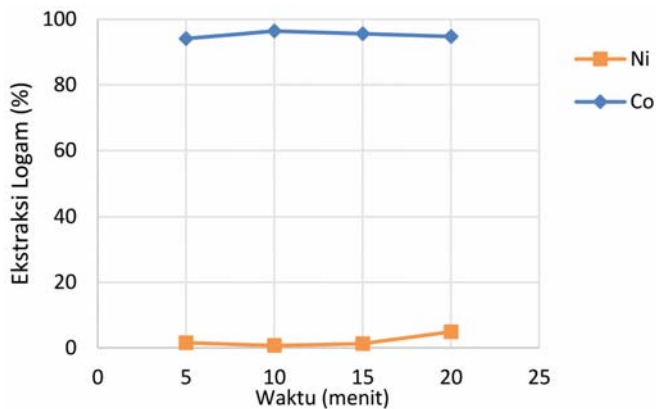
kimia eksotik yang mahal (khususnya reagen-reagen organik untuk SX) yang penyediaannya bergantung pada perusahaan-perusahaan tertentu saja di luar negeri. Dengan penggunaan ozon berukuran gelembung nano, kinetika presipitasi Co, Mn dan juga Fe dapat dipercepat. Ozon liquid juga dapat digunakan untuk proses presipitasi selektif-oksidatif ini.

Selain dengan alternatif rute baru yang dipaparkan di atas, penulis juga melakukan penelitian-penelitian SX bertahap dengan reagen-reagen organik Versatic 10 dan Cyanex 272 untuk memurnikan larutan hasil pelindian MHP. Pada prinsipnya, SX dengan Versatic 10 bertujuan mengekstraksi Ni dan Co ke fasa organik dan memisahkan dari pengotor-pengotor dalam larutan hasil pelindian MHP yaitu Fe, Al, Cr, Mn, Ca dan Mg yang diharapkan tetap berada dalam fasa *aqueous*. Setelah tahapan-tahapan *scrubbing* dan *stripping loaded-organic*, pemisahan kobalt dari nikel dilakukan dengan SX menggunakan Cyanex 272 yang mengekstraksi Co ke fasa organik tanpa, atau seminimal mungkin, mengekstraksi nikel. Kondisi terbaik ekstraksi Ni dan Co dengan Versatic 10 dari larutan hasil pelindian MHP diperoleh pada pH kesetimbangan 7, waktu ekstraksi 10 menit, konsentrasi ekstrak 20% (v/v) dimana Versatic 10 diencerkan dalam kerosen dan digunakan tributyl phosphate (TBP) 5% sebagai *modifier*, suhu 40°C dengan rasio volume larutan organik terhadap volume larutan *aqueous* (O/A) sebesar 0,5. Pada kondisi ini diperoleh persen ekstraksi Ni dan Co masing-masing sebesar 85,5% dan 94,3% dengan co-ekstraksi Mg, Mn, Ca, Cr, dan Na berturut-turut 27,6%, 70,2%, 51,6%,

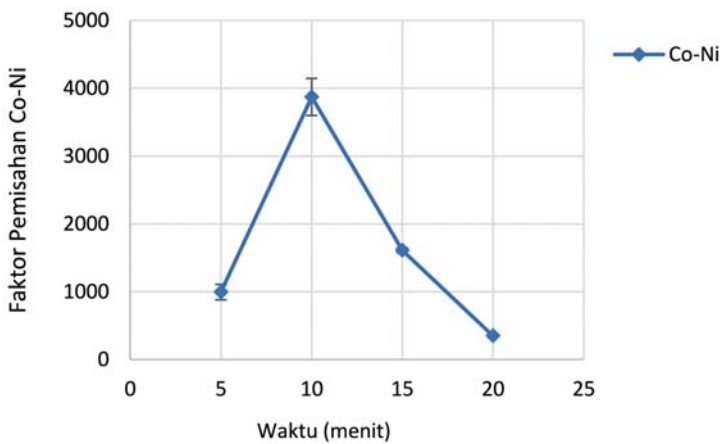
62,7%, dan 42,4%. Diantara unsur-unsur pengotor yang terekstraksi ke fasa organik, konsentrasi yang paling tinggi pada saat dilakukan stripping adalah natrium (Na) yang berasal dari NaOH yang ditambahkan sebagai pengatur pH untuk mencapai pH kesetimbangan 7, yaitu mencapai 24482 mg/L, sementara konsentrasi Ni dalam *strip liquor* sebesar 9083 mg/l.

Serangkaian percobaan SX dengan Cyanex 272 dengan variasi waktu, pH kesetimbangan, rasio O/A dan konsentrasi ekstraktn telah dilakukan untuk memisahkan Ni dari Co dalam larutan hasil *stripping loaded organic* Versatic 10 pada kondisi terbaik. Pada dasarnya nikel dapat dipisahkan dengan sangat baik dari kobalt dengan Cyanex 272, dimana kobalt terekstraksi ke fasa organik, sementara nikel tetap berada dalam fasa *aqueous*. Percobaan SX tahap ekstraksi menggunakan Cyanex 272 dengan variasi waktu proses dilakukan pada rentang waktu 5, 10, 15, dan 20 menit. Profil persen ekstraksi Ni dan Co dan faktor pemisahan Co-Ni sebagai fungsi waktu ditunjukkan masing-masing pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12. Peningkatan waktu proses dari 5 menit ke 10 menit, cenderung menaikkan persen ekstraksi kobalt, tetapi kemudian persen ekstraksi kobalt mengalami penurunan pada peningkatan waktu proses dari 10 menit hingga 20 menit yang mengindikasikan bahwa ekstraksi kobalt sudah mencapai kesetimbangan dalam 10 menit, dimana peningkatan waktu lebih lanjut justru akan menurunkan ekstraksi kobalt. Penurunan ekstraksi kobalt dari larutan *aqueous* oleh Cyanex 272 disebabkan karena reaksi antara kobalt dengan Cyanex 272 yang bersifat reversibel (dapat

berlangsung dalam 2 arah). Faktor pemisahan Co-Ni tertinggi setelah 10 menit sebesar 3871.



Gambar 4.11. Profil persen ekstraksi logam sebagai fungsi waktu pada SX menggunakan Cyanex 272 pada pH kesetimbangan 5,5, rasio O/A 0,75, dan konsentrasi ekstraktan 15%



Gambar 4.12. Profil faktor pemisahan sebagai fungsi waktu pada SX menggunakan Cyanex 272 pada pH awal 5,5, rasio O/A 0,75, dan konsentrasi ekstraktan 15% (v/v)

Setelah serangkaian percobaan SX dalam 2 tahap dan kristalisasi akhir dari larutan raffinate hasil SX tahap 2 dengan Cyanex 27 kadar nikel dalam produk kristal nikel sulfat yang diperoleh belum mencapai kadar yang diinginkan (>90%), dimana pengotor utama yang didapatkan dalam kristal adalah natrium, yang berasal dari NaOH yang ditambahkan sebagai *neutralizing agent*. Untuk mendapatkan mengurangi kadar Na dalam produk akhir dan menaikkan kemurnian produk kristal nikel sulfat akhir telah dilakukan 2 modifikasi SX, yaitu:

1) SX 2 tahap dengan *Ni-loaded Cyanex* pada tahap ke-2

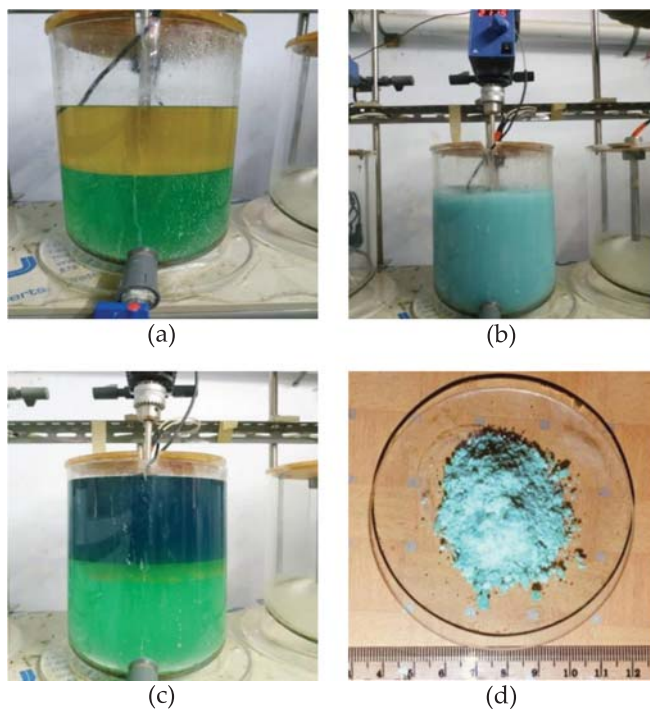
SX tahap 2 dengan Ni-loaded Cyanex 272 menghilangkan kebutuhan penambahan NaOH pada SX tahap 2, karena Co dan logam-logam pengotor yang masih tersisa akan terekstraksi oleh Ni-Cyanex yang melepaskan Ni (bukan melepaskan ion H⁺, sehingga tidak perlu dilakukan pengaturan pH kesetimbangan dengan penambahan NaOH. Dengan demikian, diharapkan Na yang ikut terekstraksi rendah)

2) SX 3 tahap dimana produk *stripping* dari *loaded organic Cyanex 272* diproses kembali dengan Versatic 10.

Hasil analisis larutan prekursor sebelum kristalisasi yang dihasilkan dari SX 3 tahap ditunjukkan pada Tabel 4.3. Kristalisasi dilakukan dengan menguapkan semua pelarut melalui pemanasan menggunakan sebuah *hot plate*. Contoh foto kegiatan percobaan SX dan produk kristal garam nikel sulfat yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 4.13.

Tabel 4.3. Hasil analisis larutan prekursor sebelum kristalisasi yang dihasilkan dari percobaan SX 3 tahap

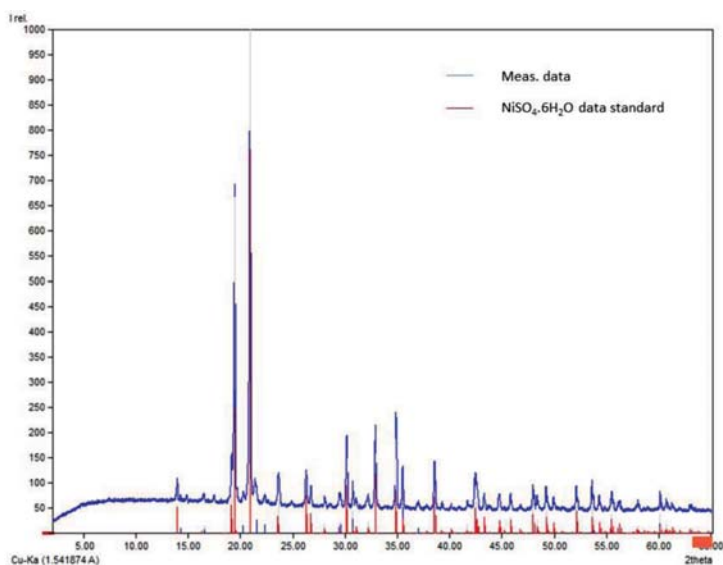
No	Unsur	Konsentrasi (ppm)
1	Ni	5550
2	Co	3,42
3	Na	138,68
4	Mg	5,84
5	Ca	3,195
6	Mn	0,47
7	Fe	5,29



Gambar 4.13. Foto kegiatan percobaan SX dengan Cyanex 272 (a) sebelum SX berlangsung (b) saat SX berlangsung (c) setelah SX selesai dan (d) produk kristal garam nikel sulfat yang dihasilkan

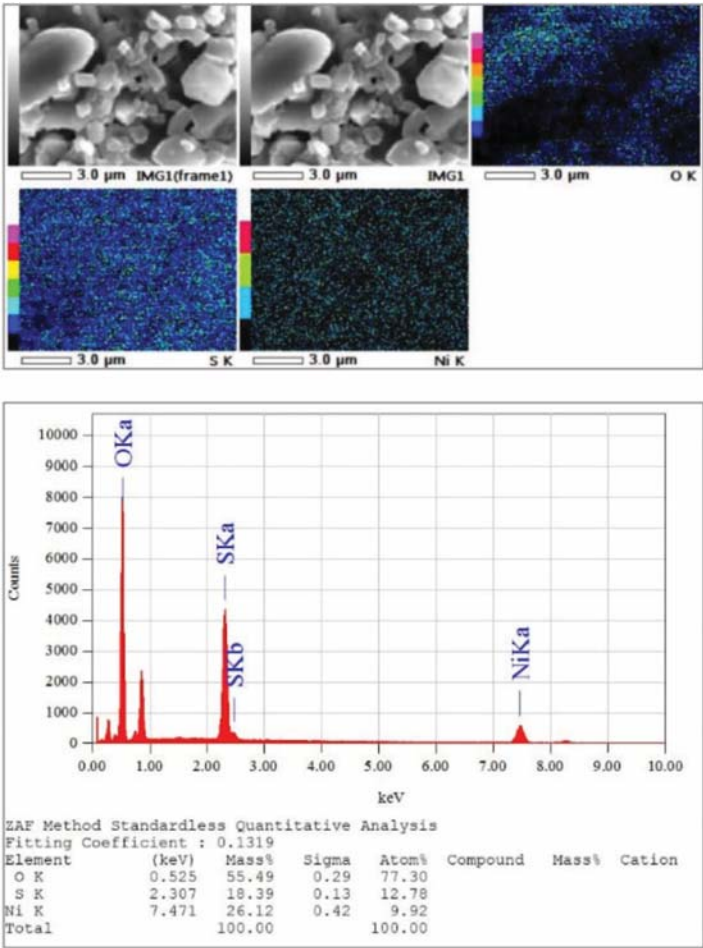
Kecuali Na, semua unsur dalam larutan umpan kristalisasi NiSO_4 kadarnya sudah <10 ppm dan memenuhi komposisi kimia *Ni-grade nikel sulfate* menurut Chemical Abstracts Service (CAS), the American Chemical Society, CAS No. 10101-97-0.

Hasil XRD terhadap produk kristal hanya mendeteksi adanya senyawa garam $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan tidak ada senyawa lainnya yang terdeteksi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.14. Seperti halnya hasil XRD, hasil analisis SEM-EDS juga tidak mendeteksi elemen lain selain Ni, S dan O yang berkorelasi dengan jenis senyawa dalam kristal yaitu $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.



Gambar 4.14. Hasil analisis XRD produk nikel sulfat dari proses pelindian MHP dan pemurnian dengan SX 3 tahap diikuti kristalisasi evaporasi

Hasil analisis SEM-X-Ray *mapping*-EDS produk kristal nikel sulfat dari proses pelindian MHP dilanjutkan SX 3 tahap dan kristalisasi dari larutan kaya-nikel ditunjukkan pada Gambar 4.15. Hasil analisis EDS menunjukkan kadar Ni 26,12%, lebih tinggi dari kadar Ni dalam $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ murni, yaitu 22,2% karena tidak menyertakan unsur H.



Gambar 4.15. Hasil analisis SEM-EDS produk nikel sulfat dari proses pelindian MHP dan SX 3 tahap

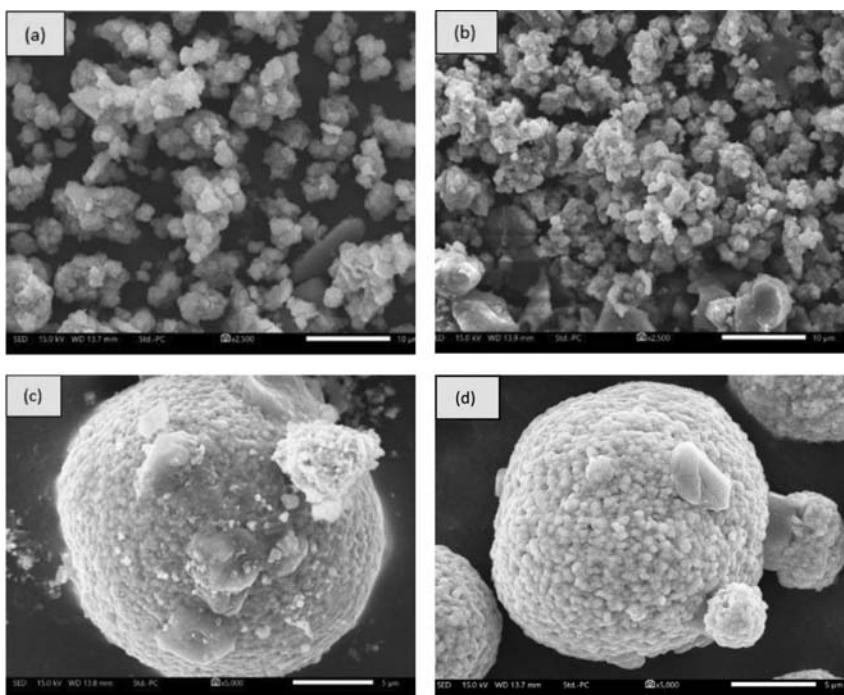
Produk kristal nikel sulfat ini kemudian dikirimkan ke *Teaching Factory* Baterai, Pusat Pengembangan Bisnis, Universitas Negeri Solo untuk dipreparasi menjadi material prekursor katoda NMC 811 dan lebih lanjut dirakit menjadi sel baterai yang performanya dibandingkan dengan sel baterai yang menggunakan prekursor katoda komersial dan prekursor yang disintesis dari bahan-bahan kimia komersial (Li_2CO_3 , $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), serta prekursor yang bahan baku nikelnya dari MHP.

4.4 Sintesis Material Prekursor Katoda NMC 811, Preparasi Sel Baterai NMC 811 dan Pengujian Performa Elektrokimianya

Telah dilakukan proses sintesis material katoda baterai Li-NMC 811 dengan metode ko-presipitasi dan pengujian performa elektrokimia sel baterai NMC 811, dimana terdapat 3 jenis sumber nikel sebagai bahan penyusun material katoda NMC 811 yaitu 1) dari nikel sulfat yang dihasilkan dari proses pemurnian MHP melalui pelindian dan SX 3 tahap menggunakan ekstrak Versatic 10 dan Cyanex 272, 2) dari nikel sulfat komersial dan 3) dari MHP. Sumber Li, Co dan Mn berasal dari serbuk lithium karbonat, kobalt sulfat dan mangan sulfat komersial. Tahapan proses sintesis yang dilakukan meliputi preparasi material, ko-presipitasi, kalsinasi dan *sintering*. Dilakukan karakterisasi dari material prekursor katoda dan dibandingkan dengan material prekursor katoda NMC 811 komersial yang diimpor dari China.

Analisis SEM dilakukan pada setiap material prekursor katoda NMC setelah tahapan preparasi, ko-presipitasi, kalsinasi dan sintering. Pada Gambar 4.16 ditunjukkan morfologi butiran sampel prekursor katoda NMC 811 dengan bahan baku nikel sulfat dari produk sintesis dengan kode SX-NMC-811 (setelah ko-presipitasi), SX-LNMC-811 (setelah kalsinasi) dan SX-LNMCO-811 (setelah sintering), serta morfologi butiran prekursor katoda NMC 811 komersial (kode K-NMC-811). Morfologi butiran prekursor katoda dengan NiSO_4 produk sintesis setelah sintering (SX-LNMCO-811) menunjukkan kemiripan dengan morfologi material prekursor katoda NMC 811 komersial dengan butiran yang berbentuk bulat. Hasil SEM-Xray mapping menunjukkan distribusi elemen-elemen Li, Ni, Co, Mn, O yang merata pada material prekursor katoda dengan NiSO_4 produk sintesis dan mirip dengan prekursor katoda NMC 811 komersial.

Ukuran rata-rata partikel dari keempat material prekursor katoda dengan kode K-NMC-811, SK-LNMCO-811, SM-LNMCO-811 dan SX-LNMCO-811 serta data D_{10} , D_{50} , D_{90} hasil analisis PSA ditunjukkan pada Tabel 4.4. D_{50} didefinisikan sebagai diameter dimana separuh dari populasi bernilai dibawahnya. Begitu pula D_{90} dan D_{10} , berarti ukuran dimana 90% populasi dan 10% populasi memiliki nilai dibawahnya. Terlihat bahwa prekursor dengan nikel sulfat produk sintesis mempunyai ukuran rata-rata partikel paling mendekati dengan prekursor katoda NMC 811 komersial.



Gambar 4.16. Morfologi sampel prekursor katoda a) dengan NiSO_4 produksi sintesis setelah co-presipitasi, (b) setelah kalsinasi, c) setelah sintering (d) prekursor katoda NMC 811 komersial

Tabel 4.4. Hasil analisis ukuran partikel dari keempat material prekursor katoda

Kode	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	Rataan (μm)
K-NMC-811	2,159	15,74	38,85	18,28
SK-LNMCO-811	2,24	7,79	19,77	10,08
SM-LNMCO-811	10,05	245,4	643,4	285,2
SX-LNMCO-811	5,345	12,94	38,36	17,16

Selanjutnya dilakukan fabrikasi sel-sel baterai NMC 811 yang prekursor katodanya disintesis dengan 3 jenis sumber nikel dan 1 lainnya dari prekursor katoda komersial. Foto-foto aktivitas preparasi sel baterai dan contoh sel baterai yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4.17.

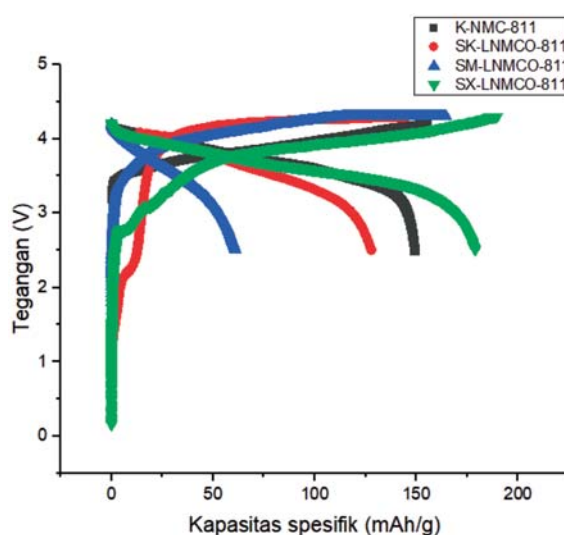


Gambar 4.17. Foto-foto prekursor katoda hasil sintesis, aktivitas preparasi sel baterai dan contoh sel baterai NMC 811 yang diperoleh

Sel baterai yang dibuat adalah tipe 18650 menggunakan material grafit/*mesocarbon microbeads* (MTI, America) sebagai *counter anode*. Sel-sel baterai yang dibuat kemudian diuji performa elektrokimia-nya yang meliputi pengujian *charge-discharge*, *cyclic voltammetry*, dan *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS). Material katoda NMC 811 yang diperoleh dilapiskan pada lembaran aluminium foil dengan pelarut NMP. Pengujian *charge-discharge* baterai diperlukan untuk mengetahui nilai kapasitas

charge-discharge, ketahanan selama 100 siklus dan variasi arus.

Pada Gambar 4.18 ditunjukkan hasil pengujian *charge-discharge* baterai dengan variasi prekursor katoda (K-NMC-811, SK-LNMCO-811, SM-LNMCO-811 dan SX-LNMCO-811). Nilai kapasitas spesifik *charge-discharge* serta persentase efisiensi awal untuk setiap variasi prekursor katoda disajikan pada Tabel 4.5.



Gambar 4.18. Grafik *charge-discharge* sel baterai lithium ion NMC 811 dengan variasi prekursor katodanya

Terlihat bahwa nilai kapasitas *charge* dan kapasitas *discharge* terbaik adalah pada sel baterai yang nikel-nya berasal dari nikel sulfat yang disintesis sendiri (SX-LNMCO-811) disusul baterai dengan material prekursor komersial (K-NMC-811), baterai yang prekursornya menggunakan bahan kimia komersial (SK-LNMCO-811), dan yang paling

rendah adalah baterai prekursor katodanya menggunakan MHP (SM-LNMCO-811) sebagai sumber nikel. Efisiensi awal sel baterai menggunakan nikel sulfat produk sintesis (SX-LNMCO-811) sedikit lebih tinggi dari efisiensi awal baterai dengan material prekursor komersial (K-NMC-811).

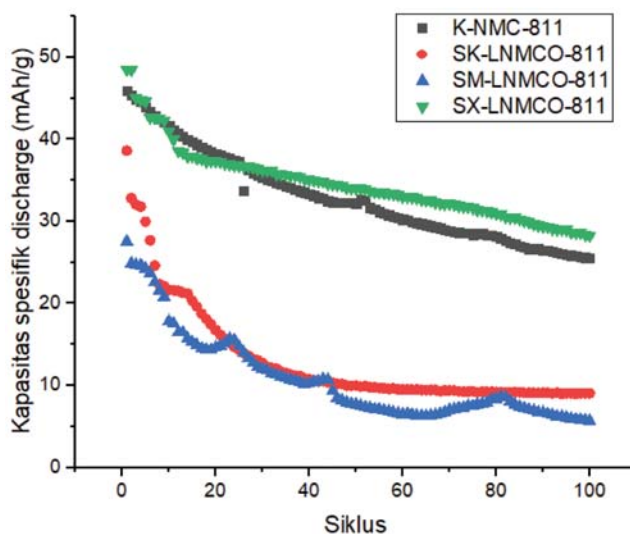
Tabel 4.5. Nilai kapasitas spesifik *charge-discharge* pada performa baterai dengan variasi material penyusun katodanya

Variasi Katoda	Nilai Kapasitas spesifik Charge (mAh/g)	Nilai Kapasitas spesifik Discharge (mAh/g)	Efisiensi Awal (%)
K-NMC-811	158,28	149,05	94,17
SK-LNMCO	144,72	127,84	88,34
SM-LNMCO	164,75	60,97	37
SX-LNMCO	189,71	178,93	94,32

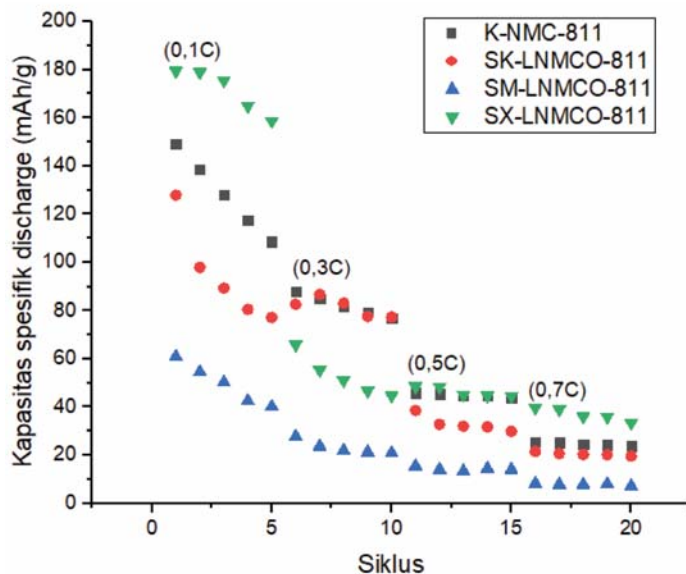
Pada Gambar 4.19 ditampilkan grafik hasil pengujian *discharge* spesifik baterai dengan variasi prekursor katoda untuk 100 siklus. Sementara, pada Gambar 4.20 ditampilkan grafik hasil pengujian kapasitas *discharge* baterai pada 0,1C, 0,3C, 0,5C dan 0,7C. Pada Gambar 4.19 terlihat stabilitas yang kurang baik pada sampel SM-LNMCO-811 yang memperlihatkan adanya fluktuasi pada rentang 20 hingga 25 dan rentang 40 hingga 45. Rendahnya tingkat stabilitas dan reversibilitas dari sampel SM-LNMCO-811 (dengan sumbernya nikelnya adalah MHP) disebabkan karena reaksi samping yang terjadi antara elektroda dan

elektrolit ketika siklus pada proses *charge-discharge* berlangsung. Hal ini berkaitan dengan unsur yang terkandung pada sampel ini memiliki lebih banyak pengotor.

Hasil pengujian *discharge* spesifik baterai dengan variasi prekursor katoda untuk 100 siklus menunjukkan sampel dengan kode SX-LNMCO-811 (nikel sulfat produk sintesis) memiliki siklus yang lebih baik bila dibandingkan dengan sampel lainnya. Untuk membuktikan reversibilitas reaksi, proses *charge-discharge* dilakukan menggunakan arus yang bervariasi. Sampel K-NMC-811 dan SX-LNMCO-811 terlihat memiliki performa yang mirip, sebagaimana ditunjukkan oleh hasil pengujian kapasitas *discharge* baterai pada 0,1C, 0,3C, 0,5C dan 0,7C yang disajikan pada Gambar 4.20.



Gambar 4.19. Hasil pengujian *discharge* spesifik baterai dengan variasi prekursor katoda untuk 100 siklus

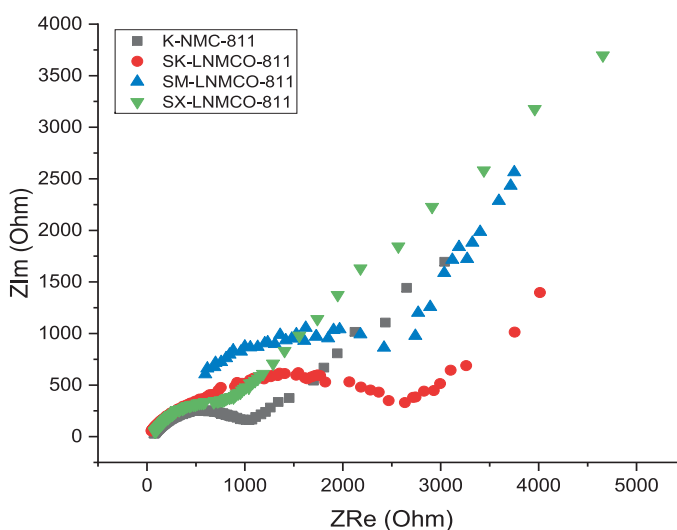


Gambar 4.20. Hasil pengujian kapasitas discharge baterai pada muatan listrik 0,1C, 0,3C, 0,5C dan 0,7C

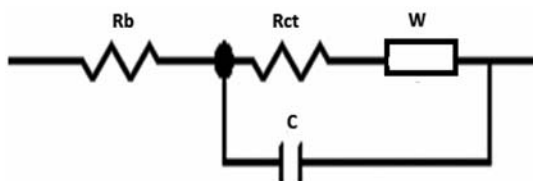
Pengujian dengan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) dilakukan untuk mengetahui performa elektrokimia sel baterai dengan variasi material penyusun katodanya yaitu nilai impedansi yang mengindikasikan konduktivitas dari ion Li^+ yang berinterkalasi selama proses *charge/discharge*. Hasil pengujian berupa data impedansi sebagai fungsi frekuensi dari arus AC yang diberikan untuk setiap jenis sampel baterai. Nilai impedansi ini merupakan parameter yang menentukan performa elektrokimia elektroda. Pada Gambar 4.21 ditunjukkan kurva Nyquist hasil pengukuran EIS pada sampel baterai NMC 811 dengan variasi material prekursor katoda dengan variasi siklus 1.

Hasil pengukuran EIS untuk setiap sampel dianalisis dengan model

rangkaian listrik ekivalen seperti ditunjukkan pada Gambar 4.22 (Magar et al., 2021). Selanjutnya dilakukan pencocokan kurva hasil-hasil pengukuran dengan model rangkaian listrik ekivalen dengan Paket Program Z-view. Pada Tabel 4.6 ditampilkan nilai-nilai tahanan elektrolit (R_b), tahanan perpindahan muatan (R_{ct}) dan kapasitansi (C) hasil pengolahan data EIS dengan paket Program Z-view menggunakan rangkaian listrik ekivalen (RLE) pada Gambar 4.22. Sementara, pada Tabel 4.7, disajikan hasil perhitungan konduktivitas ionik pada sampel baterai NMC 811 dengan variasi jenis prekursor katoda berdasarkan data-data R_{ct} yang diperoleh dari pengukuran EIS.



Gambar 4.21. Kurva Nyquist hasil pengukuran EIS pada sampel baterai NMC 811 dengan variasi material prekursor katoda dengan variasi siklus 1



Gambar 4.22. Rangkaian listrik ekivalen yang digunakan untuk menentukan harga-harga R_b , R_{ct} C dari hasil pengukuran EIS (Magar et al., 2021)

Tabel 4.6 Nilai-nilai tahanan elektrolit (R_b), tahanan perpindahan muatan (R_{ct}) dan kapasitansi (C) hasil pengolahan data EIS dengan paket Program Z-view

Sampel	R_b	R_{ct}	C
K-NMC-811	129,5	395,8	3,66E-06
SK-LNMCO-811	254,9	884,7	4,00E-06
SM-LNMCO-811	1691	1733	1,69E-08
SX-LNMCO-811	113,3	376,5	2,29E-06

Tabel 4.7. Hasil perhitungan konduktivitas ionik pada sampel baterai NMC 811 dengan variasi jenis prekursor katoda

Sampel	Konduktivitas ion (S/cm)
K-NMC-811	2,51446E-07
SK-LNMCO-811	1,12493E-07
SM-LNMCO-811	5,74278E-08
SX-LNMCO-811	2,64335E-07

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.7, konduktivitas ionik tertinggi ditunjukkan oleh sampel SX-LNMCO-811 dan terendah SM-LNMCO-811 (menggunakan MHP sebagai sumber nikel). Hal ini konsisten dengan hasil pengujian *charge-discharge* yang telah disajikan sebelumnya. Konduktivitas ion berkaitan dengan difusi ion lithium elektrolit dan elektroda.

5 RINGKASAN

Dengan adanya komitmen global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, salahsatu perkembangan yang saat ini dan dalam beberapa tahun ke depan terjadi adalah adanya pergeseran penggunaan kendaraan berbahan bakar fosil menjadi kendaraan listrik. Diperkirakan terjadi pertumbuhan pesat produksi mobil listrik di dunia, dimana ada tahun 2040 kontribusi mobil listrik terhadap keseluruhan mobil yang dijual mencapai kurang lebih 55%. Sebagian besar mobil listrik yang sudah dan akan diproduksi tersebut adalah mobil listrik berbasis baterai (BEV) dan sebagian kecil lainnya adalah jenis *hybrid* dan mobil listrik berbasis *fuel cell*. Hingga saat ini, baterai yang digunakan pada mobil listrik sebagian besar adalah baterai lithium-ion. Biaya untuk produksi baterai ini berkontribusi sekitar 35% dari harga mobil listrik saat ini dan kontribusi biaya terbesarnya adalah biaya material, khususnya material katoda. Ke depan tipe baterai lithium untuk mobil listrik yang diprediksi akan banyak digunakan adalah baterai lithium berbasis nikel yaitu lithium *nickel-manganese-cobalt oxide*, atau disingkat baterai NMC. Baterai berbasis nikel ini mempunyai luaran energi spesifik (energi per satuan berat) yang tinggi, relatif aman dan mempunyai umur pakai yang lama. Untuk mengurangi harga baterai, proporsi massa kobalt dalam material katoda semakin dikurangi dengan menambah proporsi massa nikel.

Indonesia seyogyanya dapat memainkan peranan penting ke depan karena memiliki bahan baku primer untuk baterei kendaraan listrik,

khususnya nikel, kobalt, aluminium, tembaga dan mangan serta pasar domestik kendaraan roda empat dan roda dua yang cukup besar. Penelitian dan pengembangan baterai lithium untuk aplikasi kendaraan listrik telah dilakukan oleh berbagai institusi di dalam negeri, namun masih sedikit yang berbasiskan pada material-material yang dibuat dari bahan baku yang terdapat di dalam negeri. Dalam 10 tahun terakhir melakukan penelitian proses ekstraksi dan pemurnian bijih nikel laterit berkadar rendah mulai pada tahap paling hulu yaitu proses pelindian/*leaching*, pemurnian larutan hasil pelindian, sintesis produk antara berupa presipitat nikel-kobalt hidroksida (*mixed hydroxide precipitate*, MHP), proses pemurnian lebih lanjut MHP melalui pemisahan nikel dan kobalt terlarut dari unsur-unsur pengotor dengan ekstraksi pelarut (*solvent extraction*), dan presipitasi selektif-oksidatif, serta sintesis nikel sulfat murni ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) dan penggunaannya untuk material prekursor katoda baterai NMC.

Dari serangkaian penelitian yang lingkupnya cukup tersebut, telah diperoleh banyak data dan pengetahuan mengenai proses ekstraksi dan pemurnian bijih nikel laterit berkadar rendah khususnya untuk baterai kendaraan listrik. Kolaborasi dan *networking* dengan industri, perguruan tinggi dan institusi riset di dalam negeri dapat dibangun seiring dengan kegiatan riset yang dilakukan. Dihasilkan pula alternatif-alternatif rute proses baru seperti modifikasi proses pelindian pada suhu dan tekanan tinggi dan sintesis nikel sulfat dengan kombinasi oksidasi-presitasi

selektif-oksidatif dengan SX dan elektrolisis yang dapat menyederhanakan rute proses sintesis nikel sulfat, menghasilkan produk dengan kemurnian tinggi, dan menghemat biaya. Hasil pengujian sel baterai NMC 811 yang dipreparasi katodanya dengan nikel sulfat produk sintesis dari bijih nikel laterit berkadar rendah asal Pulau Halmahera melalui rute pelindian MHP, SX 3 tahap dan kristalisasi menghasilkan performa yang sedikit lebih baik dibandingkan dengan sel baterai NMC 811 yang katodanya dibuat dari prekursor komersial dan nikel sulfat komersial. Penelitian ini harus terus dilanjutkan agar dapat diterapkan secara komersial untuk pengolahan dan pemurnian bijih nikel laterit berkadar rendah di dalam negeri. Integrasi penelitian di hulu dan hilir berkaitan dengan sintesis material aktif baterai berbasis nikel dan aplikasinya untuk kendaraan listrik perlu terus didorong agar keunggulan komparatif Indonesia terkait ketersediaan bahan baku ini dapat dikonversi menjadi keunggulan nasional.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Ahmed, S., Nelson, P. A., Gallagher, K. G., Susarla, N., and Dees, D. W. (2017): Cost and energy demand of producing nickel manganese cobalt cathode material for lithium ion batteries, *Journal of Power Sources*, 342, 733–740.
- 2 Direktorat Jendral Mineral dan Batubara, Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2021: Grand Strategy Mineral dan Batubara,

- 2021.
- 3 Donegan, S., 2006. Direct solvent extraction of nickel at bulong operations. *Miner. Eng.* 19, 1234–1245.
 - 4 FE. Yunita, MZ. Mubarak, 2021. Nickel leaching from laterite ores by combination of organic and sulfuric acid, *AIP Conference Proceeding*.
 - 5 Kam, K. C., Mehta, A., Heron, J. T., Doeff, M. M., Radiation, S., National, S., and Park, M.(2012): Electrochemical and Physical Properties of Ti-Substituted Layered Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC) Cathode Materials, *Journal of The Electrochemical Society*, 159(8), 1383–1392. <https://doi.org/10.1149/2.060208jes>.
 - 6 Magar, H. S., Hassan, R. Y. A., & Mulchandani, A. Electrochemical impedance spectroscopy (Eis): Principles, construction, and biosensing applications. *Sensors*, 21(19), 2021. <https://doi.org/10.3390/s21196578>.
 - 7 Mc. Donald, R.G., Whittington, B.I., “Atmospheric acid leaching of nickel laterites review. Part I. Sulphuric acid technologies,” *Hydrometallurgy* 91, 35–55, 2008.
 - 8 Nishimura, T. dan Umetsu, Y., Separation of nickel and cobalt by ozone oxidation. *Hydrometallurgy*, 20, pp. 483-497, 1992.
 - 9 Ritcey, G.M., 2006. Solvent Extraction, Principles and Application to Process Metallurgy. G.M. Ritcey and Associates Inc.
 - 10 Shibayama K.,” Taganito HPAL Plant Project,” *Minerals Engineering*,

Elsevier 2016.

- 11 Siti Khodijah Chaerun, Robi Suryaning Sulisty, Wahyudin Prawira Minwal, Mohammad Zaki Mubarak, "Indirect bioleaching of low-grade nickel limonite and saprolite ores using fungal metabolic organic acids generated by *Aspergillus niger*," Hydrometallurgy, Volume 174, December 2017, Pages 29-37, Elsevier 2017.
- 12 Tsuchida, N. "HPAL in the Past, Present and Future", Proceedings of ALTA Conference, 2015.
- 13 US Geological Survey, Minerals Commodity Summaries, January 2022.
- 14 Zaimawati, Z," The Development of a Resin in Pulp Process for the Recovery of Nickel and Cobalt from Laterite Leach Slurries," Ph.D, thesis, Murdoch University, Western Australia, 2005.
- 15 Z.T. Ichlas, M.Z. Mubarak, A. Magnalita, J. Vaughan, dan A.T. Sugiarto. Processing mixed nickel cobalt hydroxide precipitate by sulfuric acid leaching followed by selective oxidative precipitation of cobalt and manganese. Hydrometallurgy 191 (2020).

UCAPAN TERIMA KASIH

Menjadi seorang dosen dan guru besar di Institut Teknologi Bandung merupakan sebuah kehormatan besar sekaligus amanah yang harus dapat digunakan dengan sebaik-baiknya untuk berkontribusi bagi kemajuan

bangsa. Pada kesempatan yang berbahagia ini saya menyampaikan trimakasih yang sebesar-besarnya kepada Rektor ITB dan jajaran, Pimpinan dan Anggota Senat Akademik, Pimpinan dan Anggota Forum Guru Besar, Dekan Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan dan para Wakil Dekan, Ketua Kelompok Keahlian Teknik Metalurgi, Ketua Program Studi Teknik Metalurgi, semua kolega dosen di Program Studi Teknik Metalurgi dan para tendik. Trimakasih dan rasa hormat setinggi-tingginya saya haturkan untuk para guru saya di Program Studi Teknik Metalurgi dan Teknik Pertambangan ITB atas ilmu, tauladan, inspirasi dan dukungan yang selalu diberikan. Trimakasih saya sampaikan kepada para mahasiswa, rekan-rekan alumni Teknik Pertambangan dan Teknik Metalurgi ITB serta rekan-rekan dari industri atas kerjasama yang berjalan dengan baik hingga saat ini. Ucapan trimakasih sebesar-besarnya saya sampaikan kepada ibu dan almarhum ayah saya serta keluarga besar, ibu mertua dan almarhum ayah mertua serta keluarga besar atas doa, cinta dan dukungannya kepada saya. Ucapan trimakasih setulusnya saya sampaikan untuk istri dan anak-anak saya atas cinta, kebersamaan dan dukungannya sehingga suami dan ayahnya dapat menjalankan tugas-tugas sebagai dosen ITB dengan sebaik-baiknya.

CURRICULUM VITAE



Nama : **MOHAMMAD ZAKI MUBAROK**

Tmpt./tgl lahir : Ponorogo, 25 Agustus 1973

Kel. Keahlian : Teknik Metalurgi

Alamat Kantor : Jalan Ganesha 10 Bandung

Nama istri : dr. Novi Anantari (alm)

Rahmalina Dewi, SE

Nama Anak : 1. Ilham M. Rahman

2. Zaky Zahwan N.

3. Kirana Alesha Maharani

RIWAYAT PENDIDIKAN

- Poostdoctoral, University of Leoben Austria, 2006-2007
- Doktor (Dr.mont.), bidang elektrometalurgi, University of Leoben, Austria, 2005
- Magister Teknik (MT), bidang korosi, Institut Teknologi Bandung, 2001
- Sarjana Teknik Pertambangan Opsi Metalurgi (ST), Institut Teknologi Bandung (ITB), 1997
- Insinyur (Ir), Program Studi Profesi Insinyur, Insitut Teknologi Bandung, 2021

RIWAYAT PEKERJAAN di ITB

- Staf Pengajar Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, ITB, 1999-Sekarang
- Manager Laboratorium Metalurgi Proses dan Korosi, FTTM-ITB, 2011-2014
- Ketua Program Studi Sarjana Teknik Metalurgi, FTTM-ITB, 2014-2015
- Kepala Laboratorium Hidro-elektrometalurgi, FTTM-ITB, 2015-sekarang
- Wakil Dekan Bidang Akademik, Kemahasiswaan, dan Penjaminan Mutu, Sekolah Pascasarjana ITB, 2020-Sekarang
- Visiting Professor, Central South University, China, 2022-2027.

RIWAYAT KEPANGKATAN

1. CPNS, III/A, 1 Maret 1999
2. Penata Muda, III/A, 1 April 2000
3. Penata Muda TK 1, III/B, 1 April 2008
4. Penata, III/C, 1 Mei 2011.
5. Penata Tingkat I, IIID, 1 April 2015
6. Pembina, IVA, 1 Oktober 2018
7. Pembina Tingkat I, IVB, 1 Oktober 2020

RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

1. Asisten Ahli, 1 April 2001
2. Lektor Kepala, 1 Mei 2011
3. Profesor/Guru Besar, 1 Agustus 2019

KEGIATAN PENELITIAN (10 TAHUN TERAKHIR)

1. Pemurnian Presipitat Nikel Hidroksida menjadi Garam Sulfat untuk Bahan Baku Katoda Baterai Lithium-Ion, Penelitian Prioritas Riset Nasional, (PRN BOPTN), 2021. Ketua Tim.
2. Sintesis Serbuk Timah (*Tin Powder*) dengan Metode Elektrolisis Arus Pulsa, Riset KK-ITB, 2020, Kategori A, Ketua Tim.
3. Ekstraksi Scandium dari Red Mud, Kerjasama MIND-ID, FTTM-ITB 2020-2021, Ketua Tim.
4. Ekstraksi Scandium dari Bijih Nikel Laterit, Kerjasama MIND-ID, FTTM-ITB 2020-2021, Ketua Tim.
5. Pengembangan Teknologi Sintesis Nikel Sulfat dan Kobalt Sulfat dari Bijih Nikel Laterit untuk Material Katoda Baterai Lithium Jenis Nickel-Manganese-Cobalt (NMC)-Oxide untuk Aplikasi Kendaraan Listrik. Mining and Minerals Industry Institute (MMII) Research Award, 2020. Ketua Tim.
6. Proses Ekstraksi Titanium dan Sintesis Serbuk Titanium Oksida dari Konsentrat Ilmenit Bangka. Kerjasama dengan PT. Timah, Tbk. (2019-2020). Ketua Tim.

7. Ekstraksi Litium dari Lumpur Geotermal Sidoarjo. Kerjasama dengan PT. Lapindo Brantas, Tbk, 2019. Ketua Tim.
8. Kajian Proses dan Teknologi Ekstraksi Niobium dan Tantalum dari Konsentrat Columbite dan Tantalite (Coltan) Nigeria. Kerjasama dengan PT. Timah, Tbk. Ketua Tim.
9. Studi Ekstraksi Emas dari Tailing Pabrik Pengolahan Emas Pongkor. Kerjasama FTTM-ITB dan PT. Antam, Tbk., 2018. Ketua Tim.
10. Study on The Effectiveness of Borregaard 748 New Additives on the Morphology of Copper Cathode Deposit from Copper Electrolytic Refining. Kerjasama dengan Borregard, Norway, 2016. Ketua Tim.
11. Sintesis Magnesia dan Kiserit dari Terak Pabrik Peleburan Ferronikel. Riset Unggulan Perguruan Tinggi, 2016. Ketua Tim
12. Pemisahan Nikel dan Kobalt dalam Larutan Sulfat dan Nitrat dengan Ekstraksi Pelarut Menggunakan Beberapa Ekstraktan Organik, 2014. Kerjasama dengan Antam. Ketua Tim.
13. Ekstraksi Nikel dari Bijih Nikel Laterit Sulawesi. Insentif Riset SInas, 2013-2014. Anggota Tim.
14. Recovery timah dari anode slime dan cake dari proses pengolahan air limbah electrefining timah. Kerjasama dengan PT. Timah, Tbk., 2013. Ketua Tim.
15. Bioleaching Nikel dari Bijih Nikel Limonit dari Pulau Gag dengan

Bantuan Mikroorganisme Indegenous. Riset KK ITB, 2012. Ketua Tim

PUBLIKASI

a. Publikasi pada jurnal internasional

1. M.R. Kurniawan, T.G. Imami, Z.T. Ichlas, T. Hidayat & **M.Z. Mubarak**, "Production of synthetic rutile from tin ore beneficiation byproduct through preoxidation and reductive leaching in hydrochloric acid", Scientific Report, Nature, 12: 9022, May, 2022.
2. **Mohammad Zaki Mubarak**, Rafi Farras Madisaw, Muhammad Reza Kurniawan, Taufiq Hidayat, "Experimental Study of Lithium Extraction from a Lithium-Containing Geothermal Mud by Hydrochloric Acid Leaching", Journal of Sustainable Metallurgy, Vol. 7., No. 3, pp. 1254-1264, Springer International Publishing, 2021.
3. Soleh Wahyudi, Syoni Soepriyanto, **M. Zaki Mubarak**, Sutarno, Muhammad Iqbal, Annisa T. Qodratillah, "Investigating the Particle Size Distribution of Synthesized Copper Powder via Electrodeposition", Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 16, No. 4 (2021) 3072 – 3083, Taylor Univesity, 2021.
4. Z.T. Ichlas, RA Rustandi, **MZ Mubarak**, "Selective nitric acid leaching for recycling of lead-bearing solder dross", Journal of

- Cleaner Production, Volume 264, August 2020, 121675, Elsevier, 2020.
5. Siti Khodijah Chaerun, Edina Amadea Putri and **Mohammad Zaki Mubarak**, "Bioleaching of Indonesian Galena Concentrate with an Iron- and Sulfur-Oxidizing Mixotrophic Bacterium at Room Temperature," *Frontier in Microbiology*, October, Fontiers Media, S.A., 2020.
 6. Kurnia Trinopiawan, **Zaki Mubarak**, Kurnia Setiawan Widana, Budi Yuli Ani, Yarianto Sugeng Budi Susilo, Iwan Susanto, Sulaksana Permana, Johny Wahyuadi Soedarsono, Riesna Prassanti, "A Study Of Cerium Extraction From Bangka Tin Slag Using Hydrochloric Acid," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/6, 2020
 7. Z.T. Ichlas, **M.Z. Mubarak**, A. Magnalita, J. Vaughan, A.T. Sugiarto, "Processing mixed nickel cobalt hydroxide precipitate by sulfuric acid leaching followed by selective oxidative precipitation of cobalt and manganese, *Hydrometallurgy*, Volume 191, Elsevier 2020.
 8. **M.Z. Mubarak**, K. Sukanto, Z.T. Ichlas, A.T. Sugiarto, "Direct sulfuric acid leaching of zinc sulfide concentrate using ozone as oxidant under atmospheric pressure", *Minerals & Metallurgical Processing*, 2018, Vol. 35, No. 3, pp. 133-140, Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2018.

9. Siti Khodijah Chaerun, Frideni Yushandiana Putri, Wahyudin Prawira Minwal, Zela Tanlega Ichlas, **Mohammad Zaki Mubarak**, " Bacterial leaching of an Indonesian complex copper sulfide ore using an iron-oxidizing indigenous bacterium", Microbiology Indonesia, 2018/5/4, Perhimpunan Mikrobiologi Indonesia, 2018.
11. Siti Khodijah Chaerun, Robi Suryaning Sulistyo, Wahyudin Prawira Minwal, **Mohammad Zaki Mubarak**, "Indirect bioleaching of low-grade nickel limonite and saprolite ores using fungal metabolic organic acids generated by *Aspergillus niger*," Hydrometallurgy, Volume 174, December 2017, Pages 29-37, Elsevier 2017.
12. **M.Z. Mubarak**, R. Winarko, S.K. Chaerun, I.N. Rizki, Z.T. Ichlas, "Improving Gold Recovery from Refractory Gold Ores through Biooxidation using Iron-Sulfur-Oxidizing/Sulfur-Oxidizing Mixotrophic Bacteria", Hydrometallurgy, Elsevier, Volume 168, December 2017, Pages 69-75, 2017.
13. Chandra and **M.Z. Mubarak**, "On the Use of Lignin-Based Biopolymer in Improving Gold and Silver Recoveries during Cyanidation Leaching", Minerals Engineering 89 (2016), pp. 1–9, Elsevier, 2016.
14. **M.Z. Mubarak** and P.S. Irianto," Improving Gold Recovery from Artificial Preg-Robbing Ore by Pre-treatment using Blinding

- Agent and Resin-in-Leach”, Journal of Engineering and Technological Sciences, Vol. 49/No. 3/2016, Institut Teknologi Bandung, 2016.
15. **M.Z. Mubarak** and F.E. Yunita, “Solvent Extraction of Nickel and Cobalt from Ammonia-Ammonium Carbonate Solution by using LIX 84-ICNS,” International Journal of Non-Ferrous Metallurgy, Vol.4 No.3, Scientific Research, July 2015.
 16. **M.Z. Mubarak**, Wahab, Sutarno and Soleh Wahyudi, “Effects of Anodizing Parameters in Tartaric-Sulphuric Acid on Coating Thickness and Corrosion Resistance of Al 2024 T3 Alloy”, Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, Vol. 3, pp. 154-163, Scientific Research, May 2015.
 17. **Zaki Mubarak**, “Local Production of Copper in Mining Countries: The Case of Indonesia”, World of Metallurgy – ERZMETALL, Volume 6, GDMB Verlag GmbH, 2007.
 18. **M. Zaki Mubarak**, Iris Filzwieser and Peter Paschen: “Dendritic Cathode Growth during Copper Electrowinning in the Presence of Solid Particles”, World of Metallurgy - ERZMETALL, 58/2005, No. 6, pp. 315–321, GDMB Verlag GmbH, 2005.
 19. **Zaki Mubarak**, Iris Filzwieser and Peter Paschen: “Analysis of Industrial Nodulated Cathodes from Atlantic Copper and New Boliden”, World of Metallurgy - ERZMETALL, 58/2005, No. 4, pp. 203–209, GDMB Verlag GmbH, 2005.

b) Publikasi pada konferensi internasional

1. I. Purnomo, SK. Chaerun, **M.Z. Mubarak**, "Biooxidation Pretreatment of Low Grade Refractory Gold Tailings using A Sulfur-Oxidizing Mixotrophic Bacterium" the 2nd Mineral Processing and Technology International Conference, 1 November 2018, Tangerang, Banten. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering Vol. 478, Issue 1 2019.
2. **M.Z. Mubarak**, R.A. Lauten, R. Ellis, D. Ramdani & M. Saifudin: "Study of Electrochemical Behaviour and Surface Morphology of Copper Electrodeposit from Electrefining with Lignin-Based Biopolymer and Thiourea as Additives", Proceedings of the First Global Conference on Extractive Metallurgy, Ottawa, Canada, August, 26-29, 2018.
3. **M.Z. Mubarak** and A. Yudiarto, "Synthesis of Magnesium Oxide from Ferronickel Smelting Slag through Hydrochloric Acid Leaching-Precipitation and Calcination," Proceedings of TMS Annual Meeting, San Diego, USA, February 26 - March 2, 2017, pp. 247-258, published by Springer.
4. S Wahyudi, S Soepriyanto, **M.Z Mubarak**, Sutarno, "Synthesis and Applications of Copper Nanopowder – A Review," the 7th Nanoscience and Nanotechnology Symposium (NNS), 2017, IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 395 (2018) 012014 doi:10.1088/1757-899X/395/1/012014.

5. Nina Safitri, **M. Zaki Mubarak**, Ronny Winarko, and Zela Tanlega, "Recovery of nickel and cobalt as MHP from limonitic ore leaching solution: Kinetics analysis and precipitate characterization", International Seminar on Metallurgy and Materials (ISMM), 2017. AIP Conference Proceeding 1964, pp. 020030-1–020030-10
6. Rezky Iriansyah Anugrah, **M Zaki Mubarak**, Dessy Amalia, Study on the leaching behavior of galena concentrate in fluosilicic acid solution using hydrogen peroxide as oxidant, AIP Conference Proceedings, 1805, 2017
7. F.R. Mufakhir, **M.Z. Mubarak**, Z.T. Ichlas, "Leaching of silicon from ferronickel (FeNi) smelting slag with sodium hydroxide solution at atmospheric pressure", Mineral Processing and Technology International Conference, 2017. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 285 (2017) 012003
8. Siti Khodijah Chaerun, Fideni Yushandiana Putri, **Mohammad Zaki Mubarak**, Wahyudin Prawira Minwal dan Zela Tanlega Ichlas, "Bioleaching of Supergene Porphyry Copper Ores from Sungai Mak Gorontalo of Indonesia by an Iron-and Sulfur-Oxidizing Mixotrophic Bacterium", The 22nd International Biohydrometallurgy Symposium, 24-27 September 2017, Freiberg, Germany.
9. Chaerun S.K., Alting S.A., **Mubarak M.Z.** Sanwani E. (2016). Bacterial bioleaching of low-grade nickel limonite and saprolite

- ores by mixotrophic bacteria. Mineral Engineering Conference MEC2016, Poland, 25-28 September 2016, pp 1-8
10. **MZ Mubarak**, LI Hanif, Cobalt and nickel separation in nitric acid solution by solvent extraction using Cyanex 272 and Versatic 10, 5th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment (RAMM) & 2nd International Postgraduate Conference on Materials, Mineral and Polymer (MAMIP), 4-6 August 2015, Penang, Malaysia
 11. **M.Z. Mubarak**, Robi S. Sulistyo, S.K. Chaerun, W.P. Minwal, "Organic Acid Biogenesis by *Aspergillus niger* and Its Utilization for Indirect Bioleaching of Nickel Laterite Ore," The 21st International Biohydrometallurgy Symposium, 2015, Bali, Published in Advanced Materials Research Vol. 1130 (2015) pp 273-277, Trans Tech Publications, Switzerland
 12. R. Winarko, **M.Z. Mubarak**, I.N. Rizki and S.K. Chaerun, "Biooxidation of Carbonaceous Refractory Gold Ores by an Iron-Sulfur-Oxidizing Mixotrophic Bacterium at Neutral pH", The 21st International Biohydrometallurgy Symposium, 2015, Bali, Advanced Materials Research Vol. 1130 (2015) Advanced Materials Research Vol. 1130 (2015) pp 440-444, Trans Tech Publications, Switzerland
 13. F. Syarifah, **M.Z. Mubarak** and S. Purwadaria, "Separation of Cobalt and Nickel from Artificial Pregnant Leach Solution of

Nickel Laterite Ore by Solvent Extraction using Cyanex 272",
Proceedings of International Seminar on Chemical Engineering,
October 30-31, 2014, Bandung, Indonesia.

14. Siti Khodijah Chaerun, Sutina Hung, **Mohammad Zaki Mubarak** and Edy Sanwani, "Isolation and phylogenetic characterization of iron-sulfur-oxidizing heterotrophic bacteria indigenous to nickel laterite ores of Sulawesi, Indonesia: Implications for biohydrometallurgy", The 5th International Conference on Mathematics and Natural Sciences, Bandung, 2-3 November 2014.
15. **Mubarak, M.Z** and Dilova, A., "Atmospheric Leaching Behavior of East Java Chalcopyrite Ore in Sulfuric Acid Solution and Hydrogen Peroxide as Oxidizing Agent," Proceeding of International Symposium on Earth Science and Technology 2013, Fukuoka, Japan, December, 3-4, 2013.
16. A. Yudiarto and **Mubarak, M.Z**, "Purification of MgCl₂ Solution Generated By Leaching of Ferronickel Smelting Slag for Preparation of MgO Powder," Proceeding of International Symposium on Earth Science and Technology 2013, Fukuoka, Japan, December, 3-4, 2013.
17. **M.Z. Mubarak**, H. Kusuma, W.P. Minwal and S.K. Chaerun, "Effects of Several Parameters on Nickel Extraction from Laterite Ore by Direct Bioelaching using *Aspergillus niger* and Acid Rock Drainage from Coal Mine as an Organic Substrate", The 20th Biohydrometallurgy Symposium, Chile, Advanced Materials

- Research Vol. 825 (2013), Trans Tech Publications, Switzerland pp. 356-359.
18. **M.Z. Mubarak**, W. Astuti and S.K. Chaerun, "Effects of Individual Use, Mixed Culture and Sulfur Addition on the Effectiveness of Nickel Laterite Ore Bioelaching with *Penicillium verruculosum* and *Galactomyces geotrichum*," The 20th Biohydrometallurgy Symposium, Chile, published in Advanced Materials Research Vol. 825 (2013), Trans Tech Publications, Switzerland pp. 380-383.
 19. **Mubarak, M.Z.**, Astuti, W., dan Chaerun, S.K., "Leaching Behaviour of Nickel from Indonesian Laterite Ore in Some Organic Acids," Proceeding of The XIIIth International Mineral Processing Symposium (IMPS 2012), Bodrum-Turkey, October 10-12, 2012.
 20. **Mubarak, M.Z** and Lieberto, J. "Precipitation of Nickel Hydroxide from Simulated and Leach Solution of Nickel Laterite Ore," Proceeding of International Symposium on Earth Science and Technology, Bandung, September 18-19, 2012
 21. **Mubarak, M.Z.**, Gusmaharani, M., Purwadaria, S. And Alif, M.N. "Precipitation of Iron from Atmospheric Leach Solution of Nickel Laterite Ore," Proceeding of International Symposium on Earth Science and Technology, Fukuoka, Japan, December 6-7, 2011
 22. **Mubarak, M.Z.**, Astuti, W., dan Chaerun, S.K., "Fungal Bioleaching of Nickel from Indonesian Low-Grade Limonitic

- Ore," Proceeding of the 19th Biohydrometallurgy Symposium," Changsa, China, September, 18-22, 2011.
23. Astuti W., **Mubarok, M.Z.** and Chaerun, S.K., "Microbial Leaching of Nickel Saprolite Ores Using Fungal Consortia," The third International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS) 2010, ITB Bandung, November, November 23-25, 2010.
24. **M.Z. Mubarok** and K. Blassmara, "Gold Adsorption Behaviour onto Activated Carbon and Some Anion Exchanger Resins," Proceeding of The Third International Symposium on Novel Carbon Resource Sciences: Advanced Materials, Processes and Systems towards CO₂ Mitigation, November 2-3, 2009, Fukuoka, Japan.
25. Basuki, E.A., **Mubarok, Z.**, Kurniadani, H., Hermawan, Y.K.D., and Karurung, A.S., "Processing of Indonesian Low-Grade Iron and Nickel Ores," oral presentation at the 2nd Regional Conference on the Interdisiplinary Research on Natural Resources and Materials, Phoenix Hotel, Jogjakarta 6–7 August, 2009.
26. **Z. Mubarok**, H. Antrekowitsch, G. Mori, A. Lossin and G. Leuprecht," Problems Developed on the Electrolysis of Copper Anodes with High Contents of Nickel, Antimony, Tin and Lead", Proceedings of the 6th International Copper/Cobre Conference, Toronto, Canada, 25 - 30 August 2007.

27. **Z. Mubarak**, H. Antrekowitsch and G. Mori, "Passivation Behaviour of Copper Anodes with Various Chemical Composition", Proceedings of TMS Annual Meeting & Exhibition 2007, Material Processing Fundamentals, Orlando, Florida, USA, February 25 – March 1, 2007.
28. **Z. Mubarak**, I. Filzwieser and H. Antrekowitsch, "Metallographic Characterization of Cathode Nodulation in Copper Electrorefining", oral presentation at the 13th International Student Day of Metallurgy, March 30 – April 1, 2006, Leoben, Austria.
29. **Z. Mubarak**, I. Filzwieser and P. Paschen: "Electrochemical and Metallographic Characterization of Inhibitor Variations in Copper Refining Electrolysis", Proceedings of European Metallurgical Conference (EMC) 2005, Dresden, Germany, September 18 – 21, 2005.
30. Eddy A. Basuki, Mohammad Irfan, Djamhur Sule, Arief Sudarsono, Ismi Handayani, **Zaki Mubarak**, Murtiastanto, Mustaqiem and Edo Anoraga, "Steel Slag Granulation", Proceedings of the 3rd International Workshop on Earth Science and Technology, Fukuoka, Japan, December 5, 2005.

c) Pada Jurnal Nasional

1. Rezky Iriansyah Anugrah, **M Zaki Mubarak**, Dessy Amalia, "The Kinetics of Indonesian Galena Concentrate Leaching in Fluorosilicic Acid and Hydrogen Peroxide as its Oxidant",

- Indonesian Mining Journal, 23 (1), 21-30.
2. S. Wahyudi, S Soepriyanto, **MZ Mubarak**, S Sutarno, "Pengaruh Konsentrasi Tembaga dan Rapat Arus terhadap Morfologi Endapan Elektrodeposisi Tembaga," Al-Kimia 7 (2), 198-207, 2019.
 3. Siti Khodijah Khaerun, Frideni Yushandiana Putri, Wahyudin Prawira Minwal, Zela Tanleha Ichlas, **Mohammad Zaki Mubarak**, "Bacterial leaching of an Indonesian complex copper sulfide ore using an iron-oxidizing indigenous bacterium", Microbiology Indonesia, Vol. 12, 1, 2018.
 4. Rezky Iriansyah Anugrah, **M Zaki Mubarak**, Dessy Amalia, "Parameters that affect the dissolution of Indonesian galena concentrate in fluorosilicic acid and hydrogen peroxide", Indonesian Mining Journal, Vol. 21, 2, pp. 89-97, 2018.
 5. Said, MIN., Anggraini, M., **Mubarak, M.Z.**, Widana, K.S., "Studi Ekstraksi Bijih Thorit dengan Metode Digesti Asam dan Pemisahan Thorium dari Logam Tanah Jarang dengan Metode Oksidasi-Presipitasi Selektif". Jurnal Eksplorium, Volume 38, No. 2, Des 2017, ISSN 0854-1418, pp. 109–120. ISSN: 0854-1418 (p), 2503-426X(e).
 6. Brilliant, B., **Mubarak, M.Z.**, Trinopiawan, K., Prassanti, R., "Studi Pemisaan Thorium dari Besi dan Logam Tanah Jarang dalam Larutan Asam Nitrat dengan Ekstraksi Pelarut Menggunakan Ekstraktan Trioctylphosphine Oxide. Jurnal Eksplorium, Volume

- 38, No. 2, Des 2017, ISSN 0854-1418, pp. 133–146. ISSN: 0854-1418 (p), 2503-426X(e).
7. Kurnia Trinopiawan, **Mohammad Zaki Mubarak**, June Mellawati, Budi Yuli Ani, “Pelindian Logam Tanah Jarang dari Terak Timah dengan Asam Klorida setelah Proses Fusi Alkali,” *Jurnal Eksplorium*, Volume 37 No. 1, Mei 2016, ISSN 0854-1418, pp.41–50
 8. Wahyudin Prawira Minwal dan **M. Zaki Mubarak**. “Perilaku Adsorpsi Emas dari Larutan Ammonium Thiosulfat dengan Karbon Aktif dan Resin Penukar Ion”, *Jurnal METALURGI*, Vol. 31/No.2/2016
 9. **M. Zaki Mubarak**, Betri E. Pratama dan Siti K. Chaerun, “Bioleaching Nikel dari Bijih Limonit Pulau Gag Menggunakan Bakteri Mixotrof,” *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, Vol. 12., No. 1, Januari 2016, pp. 69-79, ISSN 1979-6560.
 10. Muhammad Wildanil Fathoni dan **M. Zaki Mubarak**, “Studi Perilaku Pelindian Bijih Limonit dari Pulau Halmahera dalam Larutan Asam Nitrat,” *Jurnal Metalurgi* Volume 30 No.3, Desember, 2015
 11. **M. Zaki Mubarak**, Fitriani M. Odang, Sutarno dan Soleh Wahyudi, “Anodisasi Paduan Al 2024 T3 dengan Metode Pulse Current dalam Larutan Asam Tartarat- Sulfat (TSA)”, *Jurnal Metalurgi* Volume 30 No.3, Desember, 2015

12. Gunardi Setyawan dan **M. Zaki Mubarak**, "Pelindian Tembaga dari Bijih Kalkopirit dalam Larutan Asam Sulfat dan Ozon sebagai Oksidator," *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, Volume 11, Nomor 2, Mei 2015.
13. Dessy Amalia, **M. Zaki Mubarak** and Husaini, "Kinetics Analysis for Aluminum Dissolution of West Kalimantan Bauxite through Digestion Process", *Indonesian Mining Journal*, Vol. 17, No. 2, June 2014, pp. 98 – 112.
14. **Mubarak, M.Z** dan Yahya, "Studi Perilaku Pelindian Timbal dari Bijih Galena Nanggung Kabupaten Bogor dalam Larutan Asam Asetat dengan Oksidator Hidrogen Peroksida," *Jurnal METALURGI*, Volume 29 Nomor 1, April 2014 ISSN 0126-3188
15. Isyatun Rodliyah, Ngurah Ardha, Nuryadi Saleh and **M. Zaki Mubarak**, "Gold Leaching Behaviour from Copper Anode Slime by Using Various Oxidizing Agent", *Indonesian Mining Journal*, 2013
16. Slamet Sumardi, **M. Zaki Mubarak**, Nuryadi Saleh dan F. Firdiyono, "Pelindian Reduktif Bijih Mangan Nusa Tenggara Timur dengan Menggunakan Molases dalam Suasana Asam", *Jurnal METALURGI*, Volume 27 Nomor 3, Desember 2012 ISSN 0126-3188.
17. Isyatun Rodliyah, Ngurah Ardha, Nuryadi Saleh and **M. Zaki Mubarak**, "Leaching of Lead from Anode Slime by Ammonium

Acetate Solution,” Indonesian Mining Journal, Volume 14 Number 3, October 2011, pp. 123-132

18. Frideni, G.F., G.A. Wisma, **M.Z. Mubarak** dan S. Purwadaria, “Adsorpsi Nikel dan Kobalt pada Resin Penukar Ion Lewatit Monoplus TP 207 XL dalam Beberapa Larutan Sulfat,” Jurnal METALURGI, Volume 26 Nomor 1, April 2011.

d) Pada Seminar Nasional

1. Muhammad Afif & **M. Zaki Mubarak**, “Studi Pelindian Bijih Galena Morowali dalam Larutan Ferric Methanesulfonate. Prosiding Seminar Nasional Material dan Metalurgi X, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, 8 Nopember 2017, pp.452-465. ISBN: 978-602-51621-0-7,
2. **M. Zaki Mubarak**, Lucky Nugroho Aji, & Soleh Wahyudi, “Sintesis Serbuk Tembaga Dengan Metode Elektrolisis: Studi Perilaku Elektrokimia dan Karakterisasi Serbuk”. Prosiding Seminar Nasional Material dan Metalurgi X (SENAMM X) 2017, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, 8 Nopember 2017, pp.623-632. ISBN: 978-602-51621-0-7.
3. Alfred Gurning dan **M. Zaki Mubarak** dkk., Recovery Besi dan Titanium serta Regenerasi Asam dari Larutan Hasil Pelindian Konsentrat Pasir Besi dalam Larutan Asam Klorida Menggunakan

- Metode Distilasi, Seminar Nasional Material dan Metalurgi IX (SENAMM IX) 2016 (co-author), Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, 11 Oktober 2016.
4. **Zaki Mubarak** dkk., Proses Ekstraksi Nikel dan Magnesium dari Terak Peleburan Ferronikel dengan Pelindian dan Ekstraksi Pelarut, Seminar Nasional Material dan Metalurgi IX (SENAMM IX) 2016, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, 11 Oktober 2016
 5. Winarko R., Putri F.Y., Chaerun S.K., **Mubarak M.Z.** (2016). Prospek Pengembangan Biohidrometalurgi untuk Pengolahan Mineral yang Ramah Lingkungan dan Berkelanjutan di Indonesia. Prosiding Temu Profesi Tahunan (TPT) XXV PERHAPI (Perhimpunan Ahli Pertambangan Indonesia) 2016, Bandung, 27-28 Oktober 2016, pp 1-8.
 6. V. Risqyana, **M.Z. Mubarak**, S. Purwadaria, "Pemisahan Kobalt dari Nikel dalam Larutan Sulfat Menggunakan Ekstraktan Na-Cyanex 272, Proceeding Seminar Indonesian Process Metallurgy (IPM) IV 2014, Bandung, 6-7 November, 2014.
 7. **Zaki Mubarak** dan Fredrick E. Kembaren, "Pemisahan Nikel dan Kobalt dalam Larutan Sulfat dengan Menggunakan Resin Penukar Ion Lewatit TP 272," Seminar Material & Metalurgi 2013, Puslitbang Metalurgi LIPI, Serpong, 27 November 2013.
 8. Helminton Sitanggang dan **Zaki Mubarak**, "Purifikasi-

Konsentrasi Larutan Intensive Leaching Menggunakan Kolom Resin Penukar Ion di Pabrik Pengolahan Emas Pongkor, PT. Antam, Tbk”, Proceeding Seminar Indonesian Process Metallurgy (IPM) III 2012, Bandung, 4-5 Desember, 2012.

9. **Mubarok, M.Z** “Gold Ore Characteristic, Processing Route Selection and Its Environmental Impact Management,” Outotec- Indonesian Ministry of Environment’s Joint Seminar, Jakarta, July, 24, 2012.
10. Agus Budi Prasetyo, **M. Zaki Mubarok**, F. Firdiyono, “Eliminasi Unsur Pengotor Fe Dan Al Pada Larutan Natrium Silikat dengan Metode Adsorpsi Pertukaran Ion, Proceeding Seminar Material Metalurgi 2012, Puslitbang Metalurgi LIPI, Serpong, 27 November 2012.
11. Astuti, W., **Mubarok, M.Z.**, dan Chaerun, S.K., “Ekstraksi Nikel dari Bijih Nikel Laterit dengan Fungal Bioleaching,” Proceeding Indonesian Process Metallurgy (IPM) 2011 Conference, Aula Timur ITB, 21-22 Juli, 2011.
12. Widi Astuti , **M. Zaki Mubarok**, Siti Khodijah Chaerun, “Prospek Fungal Bioleaching untuk Pengolahan Bijih Nikel Laterit di Indonesia”, Proceeding Seminar Material Metalurgi 2011, Puspipstek LIPI Serpong, 3 November 2011.
13. Wahyudin, P.W., **Mubarok, M.Z.** dan Sutarno, “Pengaruh Beberapa Parameter Proses Anodisasi pada Paduan Aluminium

2618 dan 7175 dalam Larutan Sulfat terhadap Ketebalan lapisan Oksida dan Ketahanannya terhadap Korosi”, Proceeding Seminar Material Metalurgi 2011, LIPI Sepong, 3 November 2011.

14. **M.Z. Mubarak** and S. Purwadaria, “Criteria in Selecting Technology for Processing of Low-Grade Lateritic Nickel Ore,” Proceeding Seminar and Workshop: Opportunities and Challenges on Indonesia’s Mineral and Coal Added Value Oriented Industries, October 7-8, 2009, Jakarta.
15. **M. Zaki Mubarak**, "Ekstraksi Nikel dari Bijih Laterit Berkadar Rendah dengan Jalur Hidrometalurgi". Proceeding Indonesian Process Metallurgy Conference and Workshop (IPM) 2008, 4-5 Desember 2008, ISBN:978-979-18370-3-3, ITB-Bandung.

Keynote & INVITED SPEAKER

1. International Conference on Battery for Renewable Energy and Electric Vehicles (ICB-REV), June 2021, National Battery Research Institute, Keynote Speaker
2. Seminar Nasional Keramik, 2020, Keynote Speaker
3. International Meeting on Advances in Metallurgy and Materials i-MAMM 2020, November 16-17, 2020, Invited Speaker
4. The 2nd International Conference on Geoscience and Earth Resources Engineering (ICGERE), 2020, December, 14-16, 2020, Invited Speaker

5. Chemeca Conference 2019, 29 September – 2 October 2019, Sydney, Australia, 100 years IUPAC & Engineers Australia, Invited Speaker
6. INTERNATIONAL METALLURGY CONFERENCE & EXPO (MET CONNEX) 2019, Jakarta, August 2019, Invited Speaker
7. Kolloqium Pertambangan, Puslitbang TEKMIIRA 2016
8. Kolloqium Eksplorasi Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir BATAN (PTBGN-BATAN) 2017
9. Kolloqium Eksplorasi Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir BATAN (PTBGN-BATAN) 2016

PENGHARGAAN

1. Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian 10 Tahun
2. Best Paper Presenter, International Seminar on Metallurgy and Materials (ISMM), 2017
3. Mining and Minerals Industry Institute (MMII) Research Award, 2019
4. Artikel Ilmiah Berkualitas Tinggi Bidang Non Kesehatan dan Obat, Kemenristek/BRIN, 2020

SERTIFIKASI

- Sertifikasi Dosen, 2010. Kementerian Pendidikan Nasional.



**Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**