

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
BIDANG METALURGI PROSES**

**PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PROSES
EKSTRAKSI TITANIUM, NIKEL DAN TEMBAGA
UNTUK KEMANDIRIAN INDUSTRI NASIONAL**



OLEH:
RUDI SUBAGJA

LEMBAGA ILMU PENGETAHUAN INDONESIA
JAKARTA, 27 JULI 2021

Buku ini tidak diperjualbelikan.

PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PROSES
EKSTRAKSI TITANIUM, NIKEL,
DAN TEMBAGA UNTUK KEMANDIRIAN
INDUSTRI NASIONAL

Dilarang mereproduksi atau memperbanyak seluruh atau sebagian dari buku ini dalam bentuk atau cara apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit.

© Hak cipta dilindungi oleh Undang-Undang No. 28 Tahun 2014

All Rights Reserved



**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
BIDANG METALURGI PROSES**

**PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PROSES
EKSTRAKSI TITANIUM, NIKEL,
DAN TEMBAGA UNTUK KEMANDIRIAN
INDUSTRI NASIONAL**

**OLEH:
RUDI SUBAGJA**

**LEMBAGA ILMU PENGETAHUAN INDONESIA
JAKARTA, 27 JULI 2021**

© 2021 Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)
Pusat Penelitian Metalurgi dan Material

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Pengembangan Teknologi Proses Ekstraksi Titanium, Nikel dan Tembaga untuk Kemandirian
Industri Nasional/Rudi Subagja. Jakarta: LIPI Press, 2021.

ix + 66 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-602-496-239-5 (cetak)
978-602-496-240-1 (e-book)

1. Ekstraksi
2. Logam
3. Kemandirian Industri

620.18

Copy editor : Limya Oktavianni
Proofreader : Risma Wahyu Hartiningsih
Penata Isi : Dhevi E.I.R. Mahelingga
Desainer Sampul : Meita Safitri
Sumber Gambar : Yulinda Ambar Sari

Cetakan : Juli 2021



Diterbitkan oleh:
LIPI Press, anggota Ikapi
Gedung PDDI LIPI, Lantai 6
Jln. Jend. Gatot Subroto 10, Jakarta 12710
Telp.: (021) 573 3465
e-mail: press@mail.lipi.go.id
website: lipipress.lipi.go.id

 LIPI Press
 @lipi_press
 @lipi.press

BIODATA RINGKAS



Rudi Subagja, lahir di Bandung, pada tanggal 18 Februari 1955 adalah anak ketiga dari sembilan bersaudara dari Bapak E.S. Sulaeman (alm.) dan Ibu R.A. Sukati. Menikah dengan Dra. Siti Hafisah dan dikaruniai dua orang anak, yaitu Hana Sakurawati, S.Adm. (almarhumah) dan anak kedua Wahyudi Setia Darma, S.Kom., M.S.E

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia No. 119/M Tahun 2010 tanggal 27 Agustus 2010 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Utama terhitung mulai tanggal 1 Februari 2010. Selanjutnya, berdasarkan Surat Keputusan Kepala Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia Nomor 165/A/2021 tanggal 21 Juni 2021 tentang Pembentukan Majelis Pengukuhan Profesor Riset, yang bersangkutan dapat melakukan pidato Pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Budi Isteri di Bandung pada tahun 1967, Sekolah Menengah Pertama Negeri VII di Bandung pada tahun 1970, dan Sekolah Menengah Atas Negeri V di Bandung pada tahun 1973. Memperoleh gelar Sarjana Teknik Kimia dari Institut Teknologi Bandung pada tahun 1980, gelar Master bidang Metalurgi dari Universitas Waseda Jepang pada tahun 1986, dan gelar Doktor bidang Metalurgi dari Universitas Waseda pada tahun 1989.

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain: pelatihan drafting paten di Jakarta pada tahun 1999 dan *Business Development Training Programme* di West Sussex, Inggris pada tahun 2001.

Mulai bekerja di Lembaga Metalurgi Nasional LIPI pada tahun 1980. Pernah menduduki jabatan struktural sebagai Kepala Bidang Metalurgi Ekstraksi pada Puslitbang Metalurgi LIPI (tahun 1992–1997), Kepala Bagian Tata Usaha pada Puslitbang Metalurgi LIPI (tahun 1997–2001), dan Kepala Pusat Penelitian Metalurgi LIPI (tahun 2001–2008).

Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Asisten Peneliti pada tahun 1982, menjadi Ajun Peneliti Madya pada tahun 1991, menjadi Peneliti Muda pada tahun 1996, menjadi Peneliti Madya pada tahun 2001, dan menjadi Peneliti Utama pada tahun 2010.

Menghasilkan 58 karya tulis ilmiah baik yang ditulis sendiri maupun dengan penulis lain dalam bentuk jurnal dan prosiding, sebanyak 20 karya tulis ilmiah ditulis dalam Bahasa Inggris, serta telah menghasilkan 2 buah paten yang telah dilindungi, yaitu paten tentang proses pengolahan bijih nikel laterit dan paten tentang proses pembuatan TiO_2 dari ilmenit.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing skripsi (S1), pembimbing pendamping tesis (S2) dan disertasi (S3) di Institut Teknologi Bandung, Universitas Tirtayasa, Universitas Indonesia, dan Universitas Negeri Syarif Hidayatullah.

Memperoleh Satyalancana Karya Satya X tahun pada tahun 1997, XX tahun pada tahun 2001, Satyalancana Pembangunan pada tahun 2004, dan Satyalancana XXX tahun pada tahun 2013 dari Presiden Republik Indonesia.

DAFTAR ISI

BIODATA RINGKAS.....	v
DAFTAR ISI	vii
PRAKATA PENGUKUHAN	ix
I. PENDAHULUAN	1
II. PERKEMBANGAN TEKNOLOGI PROSES EKSTRAKSI TITANIUM, NIKEL, DAN TEMBAGA	3
2.1 Ekstraksi Titanium dari Ilmenit	4
2.2 Ekstraksi Nikel dari Bijih Nikel	5
2.3 Ekstraksi Tembaga dari Bijih Tembaga.....	8
III. PEMANFAATAN ILMENIT, NIKEL LATERIT DAN MALASIT INDONESIA.....	10
3.1 Pemanfaatan Ilmenit	10
3.1.1 Proses Pelarutan Ilmenit ke dalam Asam Sulfat.....	10
3.1.2 Proses Pembuatan TiO_2 dari Larutan $TiOSO_4$	12
3.1.3 Proses Pemanfaatan TiO_2 Sebagai Bahan Fotokatalis.....	12
3.2 Pemanfaatan Bijih Nikel Laterit	13
3.2.1 <i>Thermal Upgrading</i> Bijih Nikel Laterit.....	13
3.2.2 Pembuatan Nikel Sulfida dari Bijih Nikel Laterit.....	16
3.2.3 Pembuatan Logam Nikel dari Nikel Matte.....	17
3.3 Pemanfaatan Bijih Tembaga Malasit.....	19
IV. PERSPEKTIF ARAH PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PROSES METALURGI EKSTRAKSI KE DEPAN UNTUK KEMANDIRIAN INDUSTRI NASIONAL.....	22
V. KESIMPULAN.....	26
VI. PENUTUP	28
UCAPAN TERIMA KASIH	29
DAFTAR PUSTAKA.....	31

LAMPIRAN	38
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	50
DAFTAR PUBLIKASI LAINNYA.....	56
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	58

Buku ini tidak diperjualbelikan.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset yang mulia dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama marilah kita panjatkan puji dan syukur kita kehadiran Allah Subhana wa ta'ala yang telah memberikan kesehatan kepada kita semua sehingga pada hari ini kita dapat berkumpul bersama pada acara orasi ilmiah pengukuhan Profesor Riset di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan kerendahan hati izinkan saya menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

**“PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PROSES EKSTRAKSI
TITANIUM, NIKEL, DAN TEMBAGA UNTUK
KEMANDIRIAN INDUSTRI NASIONAL”**

Buku ini tidak diperjualbelikan.

I. PENDAHULUAN

Metalurgi ekstraksi merupakan suatu cabang ilmu pengetahuan metalurgi yang memfokuskan kegiatannya untuk mengekstrak dan memurnikan logam dari bijih, mineral, atau sumber bahan baku logam lainnya.

Kegiatan metalurgi ekstraksi telah diawali sejak ribuan tahun yang lalu dan berkembang seiring dengan makin meningkatnya jumlah penduduk, perkembangan teknologi, dan kebutuhan umat manusia akan bahan logam murni¹.

Permintaan bahan logam yang makin meningkat telah menyebabkan ketersediaan sumber daya mineral makin berkurang, akibatnya timbul kesenjangan antara kebutuhan akan bahan logam yang makin meningkat dengan ketersediaan sumber daya mineral yang makin terbatas.

Pada industri metalurgi, kesenjangan ini menimbulkan masalah, yaitu makin berkurangnya bijih yang mempunyai kadar logam tinggi sehingga industri metalurgi harus menggunakan bijih yang kadar logamnya semakin rendah dan kompleks. Kondisi ini menjadi tantangan dan peluang bagi para peneliti bidang metalurgi ekstraksi untuk mengembangkan teknologi yang sesuai dengan karakteristik sumber daya mineral tersebut.

Indonesia mempunyai sumber daya mineral di beberapa daerah², tetapi belum dimanfaatkan secara optimal. Hal ini nampak dari mata rantai industri nasional yang belum lengkap dan masih adanya ketergantungan Indonesia pada impor bahan logam. Data Kementerian Perdagangan pada tahun 2019 memperlihatkan impor nikel mencapai 112,8 juta USD dan tembaga sebesar 1,3 miliar USD³, serta impor TiO_2 pada tahun 2019 mencapai 198 juta USD⁴ sehingga permasalahan nasional yang

dihadapi Indonesia adalah bagaimana menciptakan teknologi untuk memanfaatkan dan meningkatkan nilai tambah sumber daya mineral Indonesia menjadi komoditas logam yang diperlukan oleh bangsa Indonesia.

Untuk membantu memecahkan masalah pemanfaatan dan peningkatan nilai tambah sumber daya mineral Indonesia sebagaimana diamanatkan oleh Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 tentang pertambangan mineral dan batu bara Indonesia yang kemudian diubah dengan Undang-Undang Nomor 3 Tahun 2020, melalui kegiatan penelitian proses metalurgi ekstraksi telah dikembangkan teknologi proses pengolahan ilmenit menjadi TiO_2 , proses pengolahan bijih nikel laterit kadar rendah menjadi konsentrat nikel dan logam nikel serta proses pengolahan bijih tembaga malasit menjadi logam tembaga. Beberapa hasil kegiatan penelitian telah mendapatkan paten, masing-masing tentang pembuatan TiO_2 dari ilmenit Indonesia⁵, dan proses pengolahan bijih nikel laterit kadar rendah⁶.

Dalam orasi ini, akan dipaparkan intisari dari rangkaian hasil-hasil kegiatan penelitian yang telah dilakukan, meliputi penelitian pemanfaatan ilmenit Indonesia menjadi TiO_2 , penelitian pemanfaatan bijih nikel laterit kadar rendah Indonesia menjadi konsentrat dan logam nikel, serta penelitian pemanfaatan malasit menjadi logam tembaga.

Hasil dari kegiatan penelitian ini akan memberikan kontribusi yang besar bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi untuk menciptakan kemandirian industri nasional, serta membantu memecahkan masalah pemanfaatan dan peningkatan nilai tambah sumber daya mineral ilmenit, nikel laterit, dan malasit Indonesia.

II. PERKEMBANGAN TEKNOLOGI PROSES EKSTRAKSI TITANIUM, NIKEL, DAN TEMBAGA

Kegiatan metalurgi ekstraksi telah berlangsung sejak zaman purba pada 4000 tahun sebelum Masehi. Emas dan tembaga merupakan logam pertama yang diekstrak oleh umat manusia dengan cara dilebur secara sederhana. Kemudian pada 2400 tahun sebelum masehi atau pada zaman perunggu, umat manusia membuat perunggu dengan cara melebur campuran logam tembaga dan timah secara bersama atau mereduksi secara bersama campuran bijih tembaga dan bijih timah.

Ada beberapa alasan mengapa logam-logam tersebut telah digunakan pada saat itu, yaitu karena logam-logam tersebut ditemukan dalam bentuk alami (*native*) seperti emas, tembaga, dan besi meteor. Logam-logam tersebut mudah dibuat dengan cara sederhana, yaitu dengan mereduksi oksidanya pada temperatur di bawah 800°C, temperatur yang mudah dicapai dengan cara membakar batang kayu⁷.

Ilmu pengetahuan metalurgi ekstraksi kemudian berkembang seiring dengan meningkatnya kebutuhan umat manusia akan bahan logam yang lebih murni dan kemajuan teknologi bidang lainnya. Proses-proses yang dikembangkan untuk mengekstrak logam digolongkan menjadi proses pirometalurgi yang menggunakan temperatur tinggi, hidrometalurgi yang menggunakan pelarut air, dan elektrometalurgi yang menggunakan arus listrik. Proses hidrometalurgi berkembang setelah proses pirometalurgi, yaitu setelah ditemukannya bahan kimia yang dapat melarutkan logam, sedangkan proses elektrometalurgi berkembang setelah ditemukannya arus listrik⁷.

2.1 Ekstraksi Titanium dari Ilmenit

Ilmenit mempunyai rumus kimia $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ atau TiFeO_3 mengandung 40–65% titanium dioksida (TiO_2), merupakan bahan baku untuk membuat logam titanium dan TiO_2 . Sebanyak 94% ilmenit digunakan untuk membuat TiO_2 dan sisanya digunakan untuk membuat logam titanium⁸.

TiO_2 digunakan untuk membuat pigmen, *filler*, bahan imbuhan, dan bahan fotokatalis. Pigmen digunakan untuk membuat cat; *filler* digunakan untuk membuat kertas, plastik, dan karet; bahan imbuhan untuk membuat gelas; dan bahan fotokatalis di antaranya digunakan untuk mengurai zat berwarna pada limbah industri tekstil.

TiO_2 dibuat dari ilmenit dengan cara pirometalurgi, hidrometalurgi, atau gabungan keduanya. Proses Betcher merupakan proses komersial yang menggunakan gabungan proses pirometalurgi dan hidrometalurgi (Gambar 1). Pada proses ini, TiO_2 dibuat dari ilmenit dengan cara mengoksidasi ilmenit oleh oksigen dari udara sehingga terbentuk Fe_2O_3 , dilanjutkan dengan proses reduksi Fe_2O_3 oleh batu bara pada temperatur 1.200°C sehingga terbentuk kalsin yang mengandung logam besi. Kalsin kemudian direaksikan dengan oksigen dalam larutan amonium klorida sehingga terbentuk partikel halus Fe_2O_3 , yang kemudian direaksikan dengan asam sulfat encer sehingga larut dan terpisah dari padatan TiO_2 . Proses ini menghasilkan TiO_2 dengan kemurnian di atas 90%⁸.

Selain proses pirometalurgi, beberapa proses pembuatan TiO_2 dengan cara hidrometalurgi telah dikembangkan, seperti proses yang menggunakan asam sulfat dan asam klorida⁸. Pada proses sulfat, ilmenit direaksikan dengan asam sulfat untuk menghasilkan senyawa titanil sulfat TiOSO_4 dan besi sulfat yang mudah larut dalam air. Ion besi dalam larutan TiOSO_4 dikurangi

dengan cara menambahkan sekrap besi sehingga ion feri berubah menjadi ion fero. Larutan kemudian didinginkan sehingga terbentuk kristal $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ yang dapat dipisahkan dari larutan TiOSO_4 . Larutan TiOSO_4 kemudian dihidrolisis untuk menghasilkan TiO_2 . Kelemahan proses sulfat menghasilkan banyak limbah besi sulfat dan TiO_2 yang dihasilkan menjadi kurang baik karena masih mengandung besi sebagai unsur pengotor.

Untuk mendapatkan kualitas TiO_2 yang lebih baik, BHP Biliton membuat modifikasi proses sulfat dengan menambahkan unit *solvent* ekstraksi setelah tahap pelindian. Tujuannya adalah untuk memisahkan besi dari larutan hasil tahap pelindian ilmenit (Gambar 2). Modifikasi proses lainnya yang telah dilakukan oleh BHP Biliton adalah dengan cara kristalisasi berulang larutan TiOSO_4 yang dilanjutkan dengan proses hidrolisis TiOSO_4 .

Pada proses pembuatan pigmen TiO_2 dari ilmenit dengan menggunakan pelarut asam klorida (Gambar 3), ilmenit direaksikan dengan larutan HCl pada temperatur 90°C sehingga dihasilkan larutan TiOCl_2 dan FeCl_2 . Larutan ini kemudian dilewatkan pada unit *solvent* ekstraksi untuk mengekstrak ion besi yang terdapat dalam larutan dengan menggunakan pelarut organik *Tri Butil Phosphat* (TBP) dan *di - (2-ethyl hexyl) phosphoric acid* (D2EHPA). Larutan TiOCl_2 yang dihasilkan kemudian dihidrolisis dengan kalsium atau magnesium hidroksida untuk menghasilkan titanium oksihidrat, kemudian dikalsinasi pada temperatur $700\text{--}1.000^\circ\text{C}$ untuk menghasilkan TiO_2 ⁸.

2.2 Ekstraksi Nikel dari Bijih Nikel

Pada saat ini, bahan baku untuk membuat logam nikel berasal dari bijih nikel laterit dan bijih nikel sulfida. Kedua bijih mempunyai karakteristik yang berbeda. Bijih nikel sulfida dapat ditingkatkan kadar nikelnya dengan cara flotasi, sedangkan bijih

nikel laterit sulit untuk ditingkatkan kadar nikelnya dengan cara flotasi. Bijih nikel laterit mempunyai struktur kompleks dan endapannya di alam terbagi menjadi tiga lapisan utama, yaitu ferricrit, limonit, dan saprolit (Gambar 4)⁹. Pada tahun 2022, diperkirakan 72% produksi nikel di dunia akan menggunakan bijih nikel laterit karena cadangan bijih nikel sulfida makin berkurang⁹.

Proses pembuatan nikel dari bijih nikel sulfida umumnya dilakukan dengan cara pirometalurgi melalui tahap proses penambangan bijih, konsentrasi bijih dengan cara flotasi untuk menghasilkan konsentrat, peleburan konsentrat untuk menghasilkan nikel matte, dan pemurnian untuk menghasilkan nikel murni^{10,11}.

Bijih nikel laterit digunakan untuk membuat feronikel, nikel matte, logam nikel, atau bahan kimia yang mengandung unsur nikel. Proses ekstraksi nikel dari bijih nikel laterit dipengaruhi oleh kadar nikel yang dikandungnya. Bijih nikel laterit dengan kadar Ni > 1,8% umumnya diproses dengan cara pirometalurgi, sedangkan bijih nikel laterit dengan kadar Ni < 1,8% umumnya diproses dengan cara hidrometalurgi¹².

Pembuatan feronikel dari bijih nikel laterit dengan cara pirometalurgi (Gambar 5) umumnya dilakukan dengan menggunakan *Rotary Kiln Electric Furnace Process* (RKEF) melalui tahap pengeringan bijih dalam *rotary kiln*, dilanjutkan dengan tahap reduksi bijih nikel laterit oleh batu bara atau kokas pada temperatur 1550°C dalam *electric furnace* sehingga dihasilkan feronikel yang mengandung sekitar 28% nikel. Selain feronikel kadar tinggi, akhir-akhir ini beberapa perusahaan Tiongkok mengembangkan feronikel kadar rendah yang mengandung nikel <15% dengan menggunakan teknologi tanur tiup, *Submerged Arc Furnace*, dan RKEF¹³.

Pembuatan nikel matte dari bijih nikel laterit dengan cara pirometalurgi (Gambar 6), dilakukan melalui tahap proses pengeringan dan reduksi bijih nikel laterit dalam *rotary kiln*, dimana pada tahap ini unsur belerang ditambahkan kedalam *rotary kiln* sehingga nikel dan besi yang telah tereduksi bereaksi dengan belerang membentuk senyawa nikel sulfida dan besi sulfida. Kedua senyawa ini kemudian dilebur dalam *electric furnace* menghasilkan lelehan nikel dan besi sulfida yang mengandung 30–35% Ni, 50–60% Fe dan 9–12% S. Campuran senyawa sulfida ini kemudian diproses dalam *converter* untuk menghasilkan nikel matte yang mengandung 77–78% Ni, 21–22% S dan 0,5–0,6% Fe^{14,15}.

Gabungan proses pirometalurgi dan hidrometalurgi untuk membuat logam nikel dari bijih nikel laterit dikembangkan oleh Caron di Kuba pada tahun 1920 (Gambar 7). Proses Caron masih beroperasi secara komersial sampai dengan saat ini¹². Tahapan proses Caron meliputi pemangangan reduksi bijih nikel laterit oleh batu bara, pelarutan nikel dari kalsin hasil pemangangan reduksi ke dalam larutan amonia-amonium karbonat sehingga dihasilkan larutan nikel amin kompleks, pemisahan kobal dari larutan nikel amin kompleks, pembuatan *Basic Nickel Carbonate* (BNC) dan pembuatan logam nikel dari BNC^{14,16}.

Proses Caron kemudian mengalami beberapa modifikasi, di antaranya adalah penggunaan unit *solvent* ekstraksi untuk memisahkan kobal dari larutan yang mengandung nikel dan penggunaan *Annular Vertical Kiln* (AV Kiln) sebagai pengganti tanur putar untuk pemangangan reduksi bijih nikel laterit.

Proses komersial lainnya yang telah dikembangkan untuk ekstraksi nikel dari bijih nikel laterit adalah proses *High Pressure Acid Leaching* (HPAL) dengan cara hidrometalurgi. Pada proses ini, bijih nikel laterit direaksikan dengan asam sulfat

pekat pada temperatur 255°C dan tekanan 40 atmosfer dalam *autoclave*, sehingga terbentuk larutan nikel sulfat. Kobal yang ikut terlarut diendapkan dari larutan nikel sulfat dengan gas H₂S. Proses ini mampu mengekstrak 98% nikel dari bijih nikel laterit, tetapi proses ini masih mempunyai kelemahan, yaitu harus menggunakan alat yang tahan korosi dan masalah terbentuknya kerak (*scale*) pada sistem perpipaan yang digunakan dalam prosesnya¹⁷.

2.3 Ekstraksi Tembaga dari Bijih Tembaga

Bijih tembaga sulfida dan oksida merupakan bahan baku untuk membuat logam tembaga. Proses ekstraksi tembaga dari kedua bijih tersebut umumnya dilakukan dengan cara pirometalurgi, hidrometalurgi, elektrometalurgi, atau gabungan ketiganya¹⁸.

Ekstraksi tembaga dari bijih tembaga sulfida dilakukan melalui beberapa tahapan proses, yaitu proses konsentrasi bijih tembaga dengan cara flotasi untuk menghasilkan konsentrat yang mengandung 25–30% tembaga, proses peleburan konsentrat tembaga pada temperatur 1250°C untuk menghasilkan tembaga matte yang mengandung 30–70% tembaga, proses pembuatan tembaga *blister* yang mengandung 99% tembaga dari tembaga matte dalam *converter* dan proses pemurnian tembaga *blister* dengan cara *electrorefining* untuk menghasilkan logam tembaga yang mempunyai kemurnian 99,997% tembaga^{19, 20}.

Sejak abad ke-17, proses peleburan tembaga dilakukan secara tidak kontinu atau proses *batch* menggunakan tungku *reverberatory* (Gambar 8). Proses ini mempunyai kelemahan, yaitu konsumsi energinya tinggi dan gas SO₂ yang dihasilkan konsentrasinya rendah sehingga kurang efisien untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk membuat asam sulfat. Untuk mengatasi masalah ini kemudian dikembangkan *Outokumpu*

Flash Smelter (Gambar 9) yang mempunyai keunggulan konsumsi energi lebih rendah dan gas SO_2 yang dihasilkan mempunyai konsentrasi yang lebih pekat²⁰.

Beberapa industri kemudian mengembangkan proses peleburan tembaga secara kontinu seperti yang dilakukan pada proses *Ausmelt*, proses *Mitsubishi*, proses *Noranda*, dan *Chinese Bottom Blowing (CBB) furnaces*²⁰. Pengembangan proses peleburan tembaga selanjutnya dilakukan oleh CSIRO di Australia yang mengembangkan proses *Isasmelt* menggunakan teknologi *Top Submerged Lance* (Gambar 10).

Selain proses pirometalurgi, proses lainnya yang telah dikembangkan untuk membuat logam tembaga adalah proses hidrometalurgi yang menggunakan tahapan proses pelindian, *solvent* ekstraksi, dan *electrowinning*²⁰. Proses hidrometalurgi yang menggunakan pelarut sulfat lebih disukai daripada proses yang menggunakan pelarut klorida karena logam tembaga lebih mudah diperoleh dengan cara *electrowinning* dari larutan tembaga sulfat daripada *electrowinning* dari larutan tembaga klorida²¹.

Masalah yang dihadapi pada proses ekstraksi tembaga dari bijih tembaga sulfida kalkopirit dengan cara hidrometalurgi menggunakan pelarut sulfat adalah terbentuknya unsur belerang pada permukaan kalkopirit yang menimbulkan pasivasi dan mengganggu proses pelarutan selanjutnya²². Beberapa cara telah diupayakan untuk menyelesaikan masalah pasivasi yaitu dengan menambahkan oksidator²³, pirit²⁴, MnO_2 ²⁵, feri sulfat, kupri sulfat²⁶ atau dengan aktivasi proses pelarutan secara kimia dan mekanik²⁷.

III. PEMANFAATAN ILMENIT, NIKEL LATERIT DAN MALASIT INDONESIA

Bijih ilmenit, nikel laterit, dan tembaga malasit merupakan sumber daya mineral yang dimiliki Indonesia²⁸. Sumber daya mineral tersebut merupakan bahan baku penting untuk membuat TiO_2 , logam nikel, dan logam tembaga. Melalui kegiatan penelitian di Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI, telah dikembangkan teknologi proses untuk membuat TiO_2 dari ilmenit, logam nikel dari bijih nikel laterit kadar rendah, dan logam tembaga dari bijih tembaga malasit. Hasil kegiatan penelitian tersebut disampaikan dalam naskah orasi ini.

3.1 Pemanfaatan Ilmenit

Ilmenit mempunyai struktur yang kompleks (Gambar 11). Unsur-unsur besi, titanium, dan oksigen yang ada di dalam ilmenit membentuk suatu ikatan yang kompleks sehingga pemisahan unsur-unsur tersebut dengan cara fisik akan sangat sulit untuk dilakukan. Oleh karena itu, perlu dikembangkan proses pengolahan yang sesuai dengan karakteristik ilmenit tersebut.

Serangkaian kegiatan penelitian untuk membuat TiO_2 dari ilmenit telah dilakukan di Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI. Kegiatan penelitian tersebut meliputi: (1) proses pelarutan ilmenit ke dalam asam sulfat untuk menghasilkan larutan TiOSO_4 , (2) proses pengendapan TiO_2 dari larutan TiOSO_4 , dan (3) proses pembuatan bahan fotokatalis TiO_2 .

3.1.1 Proses Pelarutan Ilmenit ke dalam Asam Sulfat

Proses untuk membuat larutan TiOSO_4 dari ilmenit telah dilakukan dengan dua cara, yaitu *pertama*, dengan melarutkan ilmenit secara langsung ke dalam larutan asam sulfat, dan cara *kedua*

dengan cara mereaksikan ilmenit dengan KOH, NaOH, atau Na_2CO_3 sebelum ilmenit tersebut dilarutkan kedalam larutan asam sulfat. Tujuannya adalah untuk mengubah ilmenit agar unsur titanium yang ada di dalam ilmenit mempunyai sifat mudah larut ke dalam larutan asam sulfat.

Proses pelarutan ilmenit secara langsung ke dalam larutan asam sulfat konsentrasi 50% telah dilakukan pada temperatur 150°C dengan menggunakan *auto clave*. Hasil proses pelarutan memperlihatkan 88,8% titanium yang terdapat dalam ilmenit larut ke dalam larutan asam sulfat membentuk senyawa TiO-SO_4 ²⁹.

Kegiatan penelitian untuk mengubah karakteristik ilmenit telah dilakukan dengan cara mereaksikan ilmenit dengan KOH³⁰, NaOH^{31,32}, atau Na_2CO_3 ³³ sehingga ilmenit terdekomposisi, dan membentuk senyawa baru yang lebih mudah larut ke dalam larutan asam sulfat.

Proses dekomposisi ilmenit dengan larutan KOH konsentrasi 10 mol/liter, pada temperatur 150°C selama 12 jam telah berhasil mengubah ilmenit menjadi senyawa kalium titanat (K_2TiO_3)³⁰. Senyawa ini kemudian direaksikan dengan larutan asam sulfat konsentrasi 75% pada temperatur 125°C selama dua jam sehingga 85% titanium yang terkandung di dalam ilmenit larut ke dalam larutan asam sulfat membentuk larutan TiOSO_4 ³⁴.

Pada proses dekomposisi ilmenit dengan NaOH atau Na_2CO_3 , ilmenit direaksikan dengan NaOH atau Na_2CO_3 pada temperatur 400°C sampai dengan 800°C sehingga terbentuk kalsin yang mengandung senyawa natrium titanat dan natrium ferit^{32,33}. Unsur besi yang terdapat dalam senyawa natrium ferit mempunyai sifat mudah larut ke dalam air sehingga dapat dipisahkan dari unsur titanium yang terdapat dalam kalsin dengan cara mencuci kalsin dengan air pH 7 pada temperatur 95°C ³⁵.

Unsur titanium yang terdapat dalam senyawa natrium titanat hasil proses dekomposisi ilmenit oleh NaOH kemudian direaksikan dengan larutan asam sulfat konsentrasi 15% pada temperatur 60°C, sehingga 88% titanium larut ke dalam larutan asam sulfat membentuk larutan TiOSO_4 ³⁶.

Hasil penelitian proses pelarutan ilmenit memperlihatkan proses pengolahan ilmenit melalui tahap dekomposisi dengan NaOH memberikan hasil yang lebih efisien dalam hal penggunaan asam sulfat dan dapat dilaksanakan pada temperatur rendah³⁶. Dengan demikian, proses dekomposisi ilmenit dengan natrium karbonat atau natrium hidroksida mampu menurunkan temperatur pelarutan titan dan menekan konsumsi asam sulfat.

3.1.2 Proses Pembuatan TiO_2 dari Larutan TiOSO_4

Pembuatan TiO_2 dari larutan TiOSO_4 telah dilakukan dengan cara hidrolisis, yaitu dengan mencampurkan larutan TiOSO_4 dengan air (H_2O) dalam suatu reaktor berpengaduk pada berbagai perbandingan volume $\text{H}_2\text{O}/\text{TiOSO}_4$ dan pH larutan pada temperatur 90°C selama dua jam. Proses hidrolisis menunjukkan TiO_2 dengan ukuran serbuk besar dihasilkan apabila perbandingan volume ($\text{H}_2\text{O}/\text{TiOSO}_4$) yang digunakan mempunyai nilai yang kecil dan proses hidrolisis ini mampu menyisihkan ion besi secara signifikan. Sementara itu, bubuk TiO_2 hasil hidrolisis pada pH yang semakin kecil mempunyai ukuran partikel TiO_2 lebih kecil dengan morfologi partikel yang lebih seragam dan kadar pengotor besi lebih kecil. Fraksi kristalin semakin meningkat pada produk titanium dioksida hasil hidrolisis pada pH rendah³⁷.

3.1.3 Proses Pemanfaatan TiO_2 Sebagai Bahan Fotokatalis

TiO_2 dapat digunakan sebagai bahan fotokatalis untuk mengurai zat warna dalam limbah industri tekstil. Penelitian untuk membuat bahan fotokatalis TiO_2 telah dilakukan dengan cara

memanaskan TiO_2 hasil proses hidrolisis pada temperatur 300–1.000°C. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa fasa anatase cenderung terbentuk pada temperatur lebih rendah dari 600°C. TiO_2 yang dipanaskan pada temperatur lebih rendah dari 600°C mempunyai sifat fotokatalitis yang baik untuk menguraikan zat warna limbah industri tekstil. Kenaikan temperatur dari 600–1.000°C cenderung memperkecil terbentuknya fasa anatase³⁸.

3.2 Pemanfaatan Bijih Nikel Laterit

Bijih nikel laterit merupakan salah satu sumber daya mineral Indonesia yang mempunyai struktur kompleks dan dapat digunakan untuk membuat logam nikel. Untuk mendapatkan proses yang sesuai dengan karakteristik bijih nikel laterit Indonesia, Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI telah melakukan serangkaian kegiatan penelitian, yaitu penelitian *thermal upgrading* nikel laterit untuk menghasilkan konsentrat nikel, penelitian pembuatan nikel sulfida dari bijih nikel laterit kadar rendah, dan penelitian pembuatan logam nikel dari nikel matte.

3.2.1 Thermal Upgrading Bijih Nikel Laterit

Proses pembuatan feronikel atau nikel matte dari bijih nikel laterit dengan cara pirometalurgi membutuhkan bijih nikel laterit yang mempunyai kadar nikel di atas 1,8%¹². Pembuatan feronikel atau nikel matte dengan cara melebur bijih nikel laterit kadar rendah secara langsung akan memberikan dampak pada makin tingginya konsumsi energi dan meningkatnya emisi gas CO_2 sehingga menimbulkan masalah lingkungan. Oleh karena itu, bijih nikel laterit kadar rendah perlu ditingkatkan kadar nikelnya sebelum diolah menjadi feronikel atau nikel matte.

Beberapa upaya telah dilakukan untuk meningkatkan kadar nikel dalam bijih nikel laterit kadar rendah, yaitu dengan memisahkan secara fisik bijih nikel laterit kasar yang mempunyai

kandungan nikel rendah dari bijih nikel laterit halus yang kandungan nikelnya lebih tinggi. Namun, upaya ini belum memberikan hasil yang memuaskan karena bijih nikel laterit mempunyai struktur yang kompleks³⁹.

Proses *thermal upgrading* kemudian dikembangkan untuk meningkatkan kadar nikel dalam bijih nikel laterit kadar rendah. Proses ini dilakukan melalui tahapan reduksi bijih nikel laterit secara selektif oleh karbon atau gas karbon monoksida pada temperatur tertentu. Bijih yang telah direduksi kemudian dihaluskan dan dilewatkan ke dalam alat pemisah magnet untuk menghasilkan konsentrat yang mempunyai kadar nikel lebih tinggi dari bijihnya.

Kemampuan proses *thermal upgrading* untuk meningkatkan kadar nikel dalam bijih nikel laterit kadar rendah dipengaruhi oleh temperatur, bahan pereduksi, dan bahan aditif yang digunakan pada proses reduksi selektif.

Hasil penelitian pengaruh temperatur terhadap reduksi nikel oksida dan besi oksida dalam bijih nikel laterit oleh karbon atau gas karbon dioksida dari batu bara, memperlihatkan bahwa kenaikan temperatur reduksi dari 800–1.000°C telah meningkatkan proses reduksi nikel oksida menjadi logam nikel dan reduksi sebagian dari besi oksida menjadi logam besi. Nikel dan besi yang telah tereduksi kemudian membentuk paduan feronikel dan terkumpul dalam konsentrat. Akibatnya kenaikan temperatur reduksi dari 800–1.000°C menyebabkan kadar nikel dalam konsentrat semakin meningkat^{40,41,42}.

Proses *thermal upgrading* menggunakan batu bara *sub-bituminous* sebagai bahan pereduksi telah dilakukan dengan cara mencampurkan bijih nikel laterit yang mempunyai kadar nikel 1,5% dengan batu bara *subbituminous*. Campuran ini

kemudian dibuat menjadi pelet dan direduksi pada temperatur 800–1.100°C. Kalsin yang terbentuk kemudian digerus dan dipisahkan dengan alat pemisah magnet atau *magnetic separator* sehingga dihasilkan konsentrat dengan kadar nikel 5%⁴², sementara proses *thermal upgrading* menggunakan tempurung kelapa sebagai bahan pereduksi telah menghasilkan konsentrat nikel dengan kadar nikel 3,69%⁴³.

Hasil penelitian proses pemanggangan campuran bijih nikel laterit yang diberi bahan aditif CaSO_4 sebanyak 10% dan batu bara jenis lignit sebanyak 6% pada temperatur 900°C selama 60 menit, telah memberikan informasi yang penting untuk memahami dan membantu keberhasilan proses *thermal upgrading*, yaitu nikel yang terdapat dalam bijih nikel laterit tereduksi oleh lignit membentuk paduan feronikel, dan unsur belerang dari CaSO_4 membantu proses pertumbuhan butir feronikel dari 15 μm sampai 30 μm sehingga mempermudah proses konsentrasi nikel⁴⁰.

Proses *thermal upgrading* menggunakan bahan aditif Na_2SO_4 telah dilakukan terhadap bijih nikel laterit yang mempunyai kadar nikel oksida sebesar 1,42%. Proses *thermal upgrading* dilakukan dengan cara mencampurkan bijih nikel laterit dengan 10% batu bara dan 20% Na_2SO_4 . Campuran ini kemudian dibuat pelet dan dipanggang pada temperatur 1.000°C selama satu jam dalam tungku *muffle*. Kalsin yang terbentuk kemudian digerus dan dilewatkan ke dalam alat pemisah magnet untuk menghasilkan konsentrat nikel. Hasil penelitian ini telah mampu meningkatkan kadar nikel dalam bijih dari 1,42% menjadi konsentrat yang mempunyai kadar nikel 10,28%⁴¹.

Hasil penelitian proses *thermal upgrading* telah mampu meningkatkan kadar nikel dalam bijih nikel laterit kadar rendah dan menghasilkan konsentrat nikel yang mempunyai kadar nikel

lebih tinggi, yang dapat digunakan sebagai bahan baku untuk industri metalurgi ekstraksi nikel yang ada di Indonesia.

3.2.2 Pembuatan Nikel Sulfida dari Bijih Nikel Laterit

Pembuatan nikel sulfida dari bijih nikel laterit telah dilakukan melalui tahapan proses pemanggangan reduksi bijih nikel laterit, proses pelarutan kalsin hasil tahap pemanggangan reduksi ke dalam larutan asam sulfat, dan proses pengendapan nikel dari larutan nikel sulfat untuk menghasilkan nikel sulfida.

Pada tahap pemanggangan reduksi, campuran bijih nikel laterit dan batu bara dalam bentuk pelet dipanaskan pada temperatur 800°C dalam *Annular Vertical Kiln* (AV Kiln) sehingga nikel oksida yang terdapat dalam bijih nikel laterit direduksi menjadi logam nikel oleh karbon atau gas CO yang berasal dari batu bara. Proses pemanggangan reduksi menghasilkan metalisasi nikel, kobal, dan besi masing-masing sebanyak 77%, 58%, dan 6,6%⁴⁴.

Pada tahap pelarutan, kalsin yang dihasilkan dari proses pemanggangan reduksi bijih nikel laterit direaksikan dengan asam sulfat sehingga terbentuk larutan nikel sulfat. Pada proses pelarutan ini, sekitar 89% nikel dan 83% kobal dapat dilarutkan dari kalsin ke dalam larutan asam sulfat^{44,45}.

Pada tahap pengendapan, larutan nikel sulfat direaksikan dengan natrium sulfida. Proses pengendapan nikel dari larutan nikel sulfat oleh natrium sulfida pada temperatur 70°C dan pH larutan = 3, telah mampu mengendapkan hampir 100% nikel yang terdapat dalam larutan nikel sulfat menjadi endapan nikel sulfida⁴⁶.

Hasil penelitian proses pembuatan nikel sulfida dari bijih nikel laterit kadar rendah telah menghasilkan suatu teknologi proses untuk memanfaatkan bijih nikel laterit kadar rendah menjadi nikel sulfida yang dapat digunakan sebagai bahan baku untuk membuat bahan kimia berbasis nikel dan logam nikel di Indonesia.

3.2.3 Pembuatan Logam Nikel dari Nikel Matte

Pembuatan logam nikel dari nikel matte telah dilakukan melalui dua pendekatan proses, pertama dengan cara *electrorefining* dan kedua dengan cara hidro–elektro metalurgi.

3.2.3.1 Pembuatan Logam Nikel dari Nikel Matte dengan cara *Electrorefining*

Pada proses pembuatan logam nikel secara *electrorefining* sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 12, nikel matte dengan komposisi kimia 73% nikel dan 20% belerang dicelupkan bersama-sama dengan lempengan titanium ke dalam larutan elektrolit nikel klorida dalam sel *electrorefining*. Arus listrik searah kemudian dialirkan dari *rectifier* ke nikel matte yang difungsikan sebagai anoda dan ke lempengan titanium yang difungsikan sebagai katoda. Pada anoda akan terjadi proses pelarutan nikel dari nikel matte membentuk ion nikel, sedangkan pada katoda ion nikel akan tereduksi oleh elektron dari arus listrik untuk menghasilkan logam nikel.

Proses pembuatan logam nikel dengan cara *electrorefining* nikel matte menggunakan larutan elektrolit nikel klorida yang mempunyai konsentrasi nikel 60 gr/liter, pada pH = 1,88, temperatur 60°C dan rapat arus 2,2 amper/dm² menghasilkan logam nikel di permukaan katoda dengan kemurnian 99,8%⁴⁷.

3.2.3.2 Pembuatan Logam Nikel dari Nikel Matte dengan cara Hidro–Elektro Metalurgi

Gambar 13 memperlihatkan skema proses yang telah dikembangkan untuk membuat logam nikel dari nikel matte dengan cara hidro dan elektro metalurgi. Proses hidrometalurgi meliputi proses pelarutan nikel matte ke dalam larutan asam klorida dan proses pemurnian larutan nikel klorida. Proses elektro metalurgi meliputi proses untuk mengendapkan nikel dari larutan nikel klorida dengan cara *electrowinning* menggunakan arus listrik searah.

Pada tahap proses pelarutan, nikel matte ukuran -100 *mesh* yang telah digerus dengan *ball mill* direaksikan dengan larutan asam klorida 16% pada temperatur 95°C dalam tangki pelarutan, sehingga 100% logam nikel dan 98% logam kobal yang terdapat dalam nikel matte dapat dilarutkan ke dalam larutan asam klorida membentuk larutan nikel klorida^{48,49}.

Pada proses pemurnian larutan nikel klorida, ion-ion pengotor yang ada di dalam larutan nikel klorida, yaitu tembaga, besi dan kobal, dipisahkan dari larutan nikel klorida masing-masing dengan cara sementasi menggunakan nikel matte untuk menghilangkan ion tembaga⁵⁰, pengendapan selektif dengan mengendalikan potensial, dan pH larutan untuk menghilangkan ion besi⁵¹, dan *solvent* ekstraksi untuk menghilangkan ion kobal dari larutan nikel klorida⁵².

Larutan nikel klorida yang telah mengalami proses pemurnian kemudian dielektrolisis dalam sel *electrowinning* untuk menghasilkan logam nikel dengan kemurnian 99,72%⁵³.

3.3 Pemanfaatan Bijih Tembaga Malasit

Kegiatan penelitian untuk membuat logam tembaga dari bijih tembaga malasit telah dilakukan di Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI. Kegiatan tersebut meliputi penelitian proses: (1) pelarutan bijih tembaga malasit ke dalam larutan asam sulfat untuk menghasilkan larutan tembaga sulfat, (2) *solvent* ekstraksi tembaga, (3) pengendapan tembaga dari larutan tembaga sulfat dengan cara sementasi, (4) pengendapan tembaga dari larutan tembaga sulfat dengan cara *electrowinning*, dan (5) pembuatan serbuk tembaga.

Potensial pH diagram sistem Cu-Fe-H₂O memperlihatkan unsur tembaga akan larut ke dalam media air pada pH rendah⁵⁴. Berdasarkan informasi ini, kemudian dilakukan penelitian untuk melarutkan unsur tembaga dari bijih tembaga malasit ke dalam larutan asam sulfat. Hasil penelitian memberikan bukti 95,63% unsur tembaga yang terkandung dalam bijih tembaga malasit larut ke dalam larutan asam sulfat konsentrasi 7,5% pada temperatur pelarutan 60°C selama dua jam, membentuk larutan tembaga sulfat⁵⁵.

Penelitian untuk mengekstrak ion tembaga dari larutan tembaga sulfat telah dilakukan dengan cara *solvent* ekstraksi menggunakan pelarut organik 7 Alkyl 8 hydroxy quinolin atau yang dikenal dengan nama dagang *Kelex 100* (RH) (Gambar 14). Pada proses *solvent* ekstraksi tembaga, senyawa organik RH mengikat ion tembaga dari larutan tembaga sulfat untuk menghasilkan senyawa tembaga organik R₂Cu. Hasil penelitian *solvent* ekstraksi tembaga memperlihatkan 100% ion tembaga dapat diekstrak dari larutan tembaga sulfat oleh *Kelex 100* (RH) ketika ekstraksi tembaga dilakukan pada pH larutan lebih tinggi dari 1,2 dan perbandingan *Kelex 100* dengan larutan tembaga sulfat lebih besar dari 4,4⁵⁶.

Kegiatan penelitian lainnya yang telah dilakukan untuk membuat logam tembaga dari larutan tembaga sulfat adalah dengan cara sementasi menggunakan logam besi sebagaimana dapat dilihat pada mekanisme reaksi sementasi pada Gambar 15⁵⁷. Proses sementasi ion tembaga dari larutan tembaga sulfat oleh logam besi sebanyak dua kali stoikiometri reaksinya pada temperatur 45°C dan waktu reaksi selama 30 menit telah mampu mengendapkan 99% ion tembaga dari larutan tembaga sulfat⁵⁷.

Kegiatan penelitian lainnya yang telah dilakukan untuk membuat logam tembaga dari larutan tembaga sulfat adalah dengan cara elektrolisis, yaitu dengan cara mereduksi ion tembaga yang ada dalam larutan tembaga sulfat oleh elektron dari arus listrik^{58,59,60}.

Penelitian proses elektrolisis tembaga dari larutan tembaga sulfat telah dilakukan dalam sel elektrolisis (Gambar 16). Beberapa parameter proses yang dapat memengaruhi pengendapan tembaga dari larutan tembaga sulfat, yaitu konsentrasi tembaga dan asam sulfat dalam larutan elektrolit, temperatur dan rapat arus, telah dipelajari pada penelitian ini.

Hasil penelitian memperlihatkan efisiensi arus pengendapan tembaga yang didefinisikan sebagai “*Perbandingan antara jumlah tembaga yang mengendap secara nyata di permukaan katoda dengan jumlah tembaga yang mengendap berdasarkan perhitungan teoritis*”, dipengaruhi oleh konsentrasi tembaga dan asam sulfat dalam larutan elektrolit, temperatur dan rapat arus proses elektrolisis. Efisiensi arus pengendapan tembaga sebesar 98,05% dicapai pada proses elektrolisis larutan elektrolit yang mengandung tembaga 20 gr/liter, asam sulfat 35 gr/liter, dan rapat arus 1,75 amper/dm² pada temperatur kamar⁶⁰.

Pemanfaatan lebih lanjut logam tembaga adalah untuk membuat serbuk tembaga yang dapat digunakan sebagai bahan baku untuk membuat komponen elektronika dan otomotif dengan cara teknik *powder metallurgy*.

Untuk membuat serbuk tembaga, Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI telah melakukan kegiatan penelitian pembuatan serbuk tembaga dari logam tembaga dengan cara elektrolisis dalam skala *pilot plant* kapasitas 30 kg serbuk tembaga/hari⁵⁹. Proses elektrolisis dilakukan pada temperatur $50 \pm 10^\circ\text{C}$, konsentrasi tembaga dalam larutan elektrolit 15 ± 3 gr/lit, konsentrasi asam sulfat 120 ± 5 gr/lit, dan rapat arus 1200 amper/m².

Proses pembuatan serbuk tembaga dengan cara elektrolisis menghasilkan efisiensi arus katoda rata-rata 91,87%, dan serbuk tembaga yang dihasilkan mempunyai ukuran lebih kecil dari 200 *mesh* sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 1.

IV. PERSPEKTIF ARAH PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PROSES METALURGI EKSTRAKSI KE DEPAN UNTUK KEMANDIRIAN INDUSTRI NASIONAL

Indonesia memiliki sumber daya mineral yang tersebar di beberapa daerah. Mineral ini mempunyai peranan penting untuk memenuhi hajat hidup orang banyak, tetapi belum dimanfaatkan secara optimal, akibat masih terbatasnya kemampuan teknologi untuk memanfaatkannya sebagai komoditas yang diperlukan oleh bangsa Indonesia.

Pemerintah Indonesia, melalui Undang-Undang Nomor 3 Tahun 2020, yang merupakan perubahan dari Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 tentang Mineral dan Batu Bara telah mengamanatkan akan pentingnya peningkatan nilai tambah sumber daya mineral Indonesia bagi perekonomian nasional dalam usaha mencapai kemakmuran dan kesejahteraan rakyat secara berkeadilan serta kemandirian bangsa Indonesia.

Pemerintah Indonesia juga telah menetapkan target untuk menjadikan Indonesia sebagai 10 besar negara terkemuka dalam bidang ekonomi pada tahun 2030 dan menetapkan 10 prioritas industri yang akan dikembangkan, yaitu industri makanan, farmasi dan kesehatan, tekstil, transportasi, elektronika dan telematika, pembangkit energi, pertanian, logam dasar dan mineral, industri kimia berbasis minyak dan batu bara, sebagaimana tercantum dalam Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional (RIPIN) 2015–2035⁶¹.

Untuk mendukung pengembangan industri prioritas, diperlukan dukungan teknologi dan bahan baku industri. Oleh karena itu, kegiatan penelitian dalam bidang metalurgi ekstraksi ke depan harus diarahkan untuk menciptakan teknologi yang dapat

meningkatkan nilai tambah sumber daya mineral Indonesia dan menciptakan bahan baku industri guna tercapainya kemandirian industri nasional.

Melalui kegiatan penelitian di Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI, telah dihasilkan beberapa teknologi proses untuk pemanfaatan ilmenit menjadi TiO_2 , bijih nikel laterit kadar rendah menjadi konsentrat dan logam nikel, serta bijih tembaga malasit menjadi logam tembaga.

Hasil dari penelitian tersebut dapat dijadikan rekomendasi bagi para pemangku kepentingan untuk secara bersama-sama dengan pihak industri mengembangkan:

- 1) Industri pembuatan TiO_2 dari ilmenit Indonesia dengan menggunakan teknologi proses dekomposisi ilmenit dengan NaOH , yang dilanjutkan dengan proses pelarutan dengan asam sulfat, dan proses hidrolisis larutan TiOSO_4 ⁵.
- 2) Industri pengolahan bijih nikel laterit kadar rendah menjadi konsentrat nikel dengan menggunakan teknologi *thermal upgrading* dan pembuatan senyawa nikel serta logam nikel dengan menggunakan teknologi hidro dan elektro metalurgi.
- 3) Industri pengolahan malasit menjadi logam tembaga dengan proses pelarutan asam sulfat, dilanjutkan dengan proses pemurnian larutan, dan *electrowinning* untuk mendapatkan logam tembaga.

Hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan di Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI juga memberikan landasan yang kuat untuk pengembangan penelitian lebih lanjut, yaitu mengembangkan produk turunan dari ilmenit dan bijih nikel laterit, seperti titanium dioksida, kobal oksida, serta nikel oksida, untuk membuat katoda baterai mobil listrik⁶².

Selain ilmenit, nikel laterit dan malasit, sumber daya mineral lainnya yang mempunyai nilai strategis, tetapi belum dimanfaatkan secara optimal, adalah monasit yang dihasilkan dari proses pengolahan bijih timah di Bangka. Mineral ini mempunyai struktur yang kompleks (Gambar 17), dan mengandung unsur tanah jarang: Th, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, dan Y, yang sangat dibutuhkan untuk bahan baku industri keramik, katalis, superkonduktor, magnet, dan lampu *fluoresence* untuk pesawat televisi.

Proses yang direkomendasikan untuk ekstraksi logam tanah jarang dari monasit adalah proses pelumatan monasit dengan asam sulfat 98% pada temperatur 200–230°C, yang dilanjutkan dengan proses *solvent* ekstraksi, untuk memisahkan masing-masing unsur tanah jarang. Alternatif proses lainnya yang disarankan adalah proses pelumatan monasit dengan menggunakan NaOH 60–70% pada temperatur 120–150°C, yang dilanjutkan dengan proses pelindian asam, dan *solvent* ekstraksi untuk memisahkan masing-masing logam tanah jarang⁶³.

Beberapa isu penting lainnya yang juga perlu mendapat perhatian di masa yang akan datang adalah kebutuhan material untuk *implant*, ekstraksi logam dari sumber daya sekunder, dan kebutuhan akan proses ekstraksi logam yang lebih ramah lingkungan.

Beberapa jenis bahan *implant* membutuhkan logam kobal dan titanium⁶⁴. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa nikel matte yang diproduksi dari bijih nikel laterit dapat menghasilkan logam kobal⁵³. Demikian juga hasil penelitian ilmenit telah mampu untuk membuat TiO₂ yang dapat dikembangkan lebih lanjut untuk membuat logam titanium. Oleh karena itu, penelitian pemanfaatan bijih nikel laterit dan ilmenit untuk masa yang akan datang perlu diarahkan untuk membuat logam kobal dan titanium untuk bahan baku *implant*.

Pada masa yang akan datang, dengan makin bertambahnya jumlah penduduk dan kesejahteraan umat manusia, maka kebutuhan bahan logam akan makin meningkat. Di sisi lain, ketersediaan sumber daya mineral akan makin menipis. Kondisi ini akan menjadi tantangan bagi para peneliti bidang metalurgi ekstraksi untuk mengembangkan *urban mining*, proses untuk mengekstrak logam dari sumber daya sekunder, seperti ekstraksi logam tembaga dari limbah elektronik melalui pengembangan konsep *recovery*, *reuse*, dan *recycling*, serta ekstraksi logam berharga dari hasil samping proses pengolahan logam lainnya.

Hasil samping proses pengolahan bijih tembaga dengan cara piro dan elektrometalurgi menghasilkan lumpur anoda yang mengandung logam-logam penting untuk pengembangan material maju. Lumpur anoda yang dihasilkan dari proses *electrorefining* tembaga mengandung unsur-unsur emas, perak, platina, kadmium, telurium, selenium, indium, yang mempunyai nilai ekonomis tinggi. Oleh karena itu, ke depannya teknologi untuk mengekstrak logam-logam tersebut dari lumpur anoda perlu dikembangkan.

Terkait keinginan untuk mendapatkan proses yang lebih ramah lingkungan, proses yang perlu mendapat perhatian ke depan adalah proses bihidrometalurgi; cabang dari hidrometalurgi yang menggunakan mikro organisme untuk mengekstrak logam dari bijih, konsentrat, limbah, dan sumber daya sekunder. Biohidrometalurgi memberi harapan untuk membantu menyelesaikan masalah lingkungan pada proses ekstraksi logam dari sumber daya primer maupun sekunder.

V. KESIMPULAN

Kesenjangan antara kebutuhan bahan logam yang makin meningkat dengan makin terbatasnya sumber daya mineral merupakan permasalahan bidang metalurgi ekstraksi pada tatanan global yang telah mendorong para peneliti metalurgi ekstraksi untuk melakukan penelitian pemanfaatan sumber daya mineral berkadar rendah dan kompleks.

Pada tatanan nasional, permasalahan yang sedang dihadapi dalam bidang metalurgi ekstraksi adalah belum berkembangnya teknologi proses ekstraksi untuk dapat memanfaatkan sumber daya mineral Indonesia, khususnya bijih ilmenit, nikel laterit kadar rendah, dan malasit.

Melalui kegiatan penelitian di Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI, telah dikembangkan teknologi proses untuk memanfaatkan dan meningkatkan nilai tambah bijih ilmenit, nikel laterit kadar rendah, serta bijih tembaga malasit yang dimiliki Indonesia.

Pengembangan teknologi proses pengolahan ilmenit Indonesia telah mampu menghasilkan teknologi untuk membuat TiO_2 dari ilmenit Indonesia, yang mempunyai struktur kompleks, melalui tahapan proses dekomposisi ilmenit dengan NaOH pada temperatur 400–800°C untuk menghasilkan senyawa natrium titanat, dilanjutkan dengan proses pelarutan menggunakan asam sulfat 15% pada temperatur 60°C, untuk menghasilkan larutan TiOSO_4 , dan pengendapan TiO_2 dari larutan TiOSO_4 dengan cara hidrolisis. Proses ini telah mendapatkan paten dengan nomor IDP 000067106⁵

Pengembangan teknologi proses pengolahan bijih nikel laterit kadar rendah telah mampu menghasilkan beberapa teknologi penting, yaitu.

- 1) Teknologi proses untuk mengolah bijih nikel laterit kadar rendah melalui tahapan proses reduksi bijih nikel laterit dengan karbon atau gas CO dari batu bara pada temperatur 800°C, dilanjutkan dengan proses pelarutan kalsin hasil proses reduksi dalam larutan asam sulfat encer sehingga dihasilkan larutan nikel sulfat. Proses ini telah mendapatkan paten dengan nomor ID. 0002994⁶.
- 2) Teknologi proses *thermal upgrading* untuk meningkatkan kadar nikel dalam bijih nikel laterit kadar rendah, melalui tahapan proses reduksi campuran bijih nikel laterit kadar rendah dan natrium sulfat oleh karbon dari batu bara, dilanjutkan dengan proses pemisahan magnet untuk menghasilkan konsentrat nikel dengan kadar nikel 10%⁴¹.
- 3) Teknologi proses untuk membuat logam nikel kemurnian 99,7% dari nikel matte dengan cara *electrorefining*⁴⁷
- 4) Teknologi proses untuk membuat logam nikel dari nikel matte dengan cara hidro-elektro metalurgi, melalui tahapan pelarutan nikel matte dalam media klorida, yang dilanjutkan dengan tahap pemurnian larutan nikel klorida, dan tahap pengendapan nikel dari larutan nikel klorida dengan cara *electrowinning*⁵³.

Untuk pemanfaatan sumber daya mineral malasit, telah berhasil dikembangkan proses untuk membuat logam tembaga dari malasit melalui tahapan pelarutan malasit dalam larutan asam sulfat untuk menghasilkan larutan tembaga sulfat⁵⁵, pengendapan tembaga dari larutan tembaga sulfat dengan proses sementasi menggunakan besi⁵⁷.

VI. PENUTUP

Kegiatan penelitian dalam bidang metalurgi ekstraksi telah mampu menghasilkan teknologi proses untuk membuat TiO_2 dari ilmenit Indonesia, meningkatkan kandungan nikel dalam bijih nikel laterit kadar rendah Indonesia, membuat logam nikel dengan kemurnian 99,7%, dan membuat logam tembaga dari bijih malasit.

Teknologi proses pengolahan mineral yang dihasilkan menjadi modal dasar untuk menciptakan kemandirian industri nasional guna memanfaatkan dan meningkatkan nilai tambah sumber daya mineral Indonesia, melengkapi mata rantai industri nasional, serta mengurangi ketergantungan impor TiO_2 , logam nikel dan tembaga.

Untuk dapat memanfaatkan hasil penelitian dalam industri, dibutuhkan komitmen, kerja sama, dukungan, dan keterlibatan para pemangku kepentingan, meliputi pemerintah Republik Indonesia dan para calon pengambil manfaat, baik pihak industri maupun penyandang dana.

Pemerintah Indonesia diharapkan memberikan dukungan kebijakan untuk mendorong terlaksananya penerapan hasil penelitian dalam industri. Kebijakan pemberian keringanan pajak bagi para calon pengguna teknologi merupakan bentuk dukungan positif dari pemerintah, demikian juga kemudahan perizinan untuk mengembangkan industri, tentu akan mempermudah proses implementasi hasil penelitian dalam industri. Selain itu, untuk calon pengguna teknologi yang berasal dari BUMN, pemerintah perlu membuat kebijakan untuk meningkatkan keberpihakan BUMN terhadap hasil-hasil penelitian yang akan diterapkan dalam industri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur saya sampaikan kepada Allah Swt. yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada saya untuk menyusun naskah Orasi Profesor Riset ini.

Naskah orasi ilmiah ini merupakan cermin dari perjalanan karier saya sebagai peneliti di Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI, yang terkristalisasi dari hasil proses pemikiran yang panjang melalui interaksi dengan berbagai pihak terutama para karyawan dan karyawanati Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI. Oleh karena itu, perkenankan saya menyampaikan ucapan terima kasih kepada: Presiden Republik Indonesia; Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional, Dr. Laksana Tri Handoko; Plh Kepala Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Dr. Agus Haryono; yang telah memberikan kesempatan dan dukungan yang luas kepada saya untuk dapat melaksanakan kegiatan penelitian dalam bidang Metalurgi Ekstraksi di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Dr. Ir. Bambang Subiyanto M.Agr.; Sekretaris Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Dr. Gadis Sri Haryani; Tim Penelaah Naskah Orasi Ilmiah: Prof. Dr. Ir. F. Firdiyono; Prof. Dr. Silvester Tursiloadi; dan Prof. Dr. Ir. Johny Wahyuadi, M.DEA; yang telah membimbing, memberi arahan, dan masukan untuk kesempurnaan naskah orasi ilmiah ini.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada Deputy bidang Ilmu Pengetahuan Teknik LIPI, Dr. Agus Haryono; Sekretaris Utama LIPI, Nur Tri Aries Suestiningtyas, S.IP, M.A; Kepala Biro Organisasi dan Sumber daya Manusia LIPI, Dr. Heru Santoso, M.App.Sc; Kepala Puslit Metalurgi dan Material

LIPI, Prof. Dr. Nurul Taufiq Rochman, M.Eng.; para senior di LIPI dan Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI: Prof. Dr. Lukman Hakim, M.Sc.; Prof. Dr. Jan Sopaheluwakan; Ir. Djoewito; Ir. Sukarna Djaya; Ir. Sulaiman; Ir. Yusuf; almarhum Dr. Nilyardi Kahar; Drs. Tun A. Saanin yang telah membimbing saya dalam mengembangkan ilmu pengetahuan di Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI, dan juga kepada Prof. Dr. Andika Widya Pramono dan Dr. Djusman Sajuti, yang telah mendorong saya untuk segera menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini.

Saya juga ingin secara khusus menyampaikan ucapan terima kasih yang tidak terhingga kepada kedua orang tua saya almarhum Bapak E.S. Sulaeman dan Ibunda R.A. Sukati yang telah melahirkan saya, membesarkan saya dengan penuh kasih sayang, mendidik saya sehingga saya dapat berdiri di sini pada mimbar yang terhormat pada hari ini.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada istri saya, Dra. Siti Hafsa, yang telah dengan setia mendampingi saya, dan kepada anak-anak saya, Wahyudi Setia Darma, S.Kom., M.S.E. dan drg. Andina Rangga Pratiwi, Sp.KG, almarhumah Hana Sakurawati, S.Adm., yang telah menumbuhkan semangat kepada saya untuk menyelesaikan naskah orasi ini.

Semoga amal baik dari Bapak, Ibu, dan Saudara mendapat limpahan Rahmat dari Allah Swt.

Wabillahi taufiq wal hidayah, wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

DAFTAR PUSTAKA

1. Langkau S, Espinoza LAT. Technological change and metal demand over time: What can we learn from the past? *Sustain Mater Technol* 2018; 16 (February): 54–9.
2. Pamungkas. Indonesia mineral and coal information 2015. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber daya Mineral Republik Indonesia; 2015.
3. Kementerian Perdagangan RI. perkembangan impor non migas periode 2015–2019. Jakarta: Kementerian Perdagangan RI; 2020.
4. Badan Pusat Statistik Indonesia. Statistik perdagangan luar negeri. Jakarta: Badan Pusat Statistik Indonesia; 2020.
5. **Subagja R**, Royani A, Andriyah L, Suharyanto A, Prasetyo P. Pembuatan TiO_2 dari ilmenit. Paten Indonesia No. IDP000067106. 2020 Februari 5.
6. **Subagja R**, Djohari A, Firdiyono F. Proses pengolahan bijih nikel laterit. Paten Indonesia No ID. 0002994. 1998 Juli 24.
7. Habashi F. A short history of hydrometallurgy. *Hydrometallurgy* 2005; 79: 15–22.
8. Zhang W, Zhu Z, Cheng CY. A literature review of titanium metallurgical processes. *Hydrometallurgy* 2011; 108: 177–88.
9. Oxley A, Smith ME, Caceres O. Why heap leach nickel laterites? *Miner Eng* 2016; 88: 53–60.
10. Crundwell FK, Moats MS, Ramachandran V, Robinson TG, Davenport WG. Production of nickel concentrate from ground sulfide ore. *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals*, Elsevier. 2011: 171–89.
11. Mudd GM. Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites. *Ore Geol Rev* 2010; 38: 9–26.

12. Dalvi AD, Bacon WG, Osborne RC. The past and the future of nickel laterites. PDAC 2004 International Convention, Trade Show & Investors Exchange. 7–10 Maret 2004: 1–27.
13. Keskinilic E. Nickel laterite smelting processes and some examples of recent possible modifications to the conventional route. *Metals (Basel)* 2019; 9: 974.
14. Burkin AR. *Extractive metallurgy of nickel*. New York, NY: John Wiley & Sons; 1987.
15. Crundwell FK, Moats MS, Ramachandran V, Robinson TG, Davenport WG. Smelting laterite concentrates to sulfide matte. Dalam: *Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum group metals*. New York: Elsevier; 2011: 95–107.
16. Dry M. Technical & Cost Comparison of Laterite Treatment Processes part 3. Dalam: *Nickel-Cobalt-Copper Proceedings*; 2015: 1–23.
17. Zhiyun J, Haque N, Bhattacharya S. Process simulation and energy analysis of two nickel laterite processing technologies. *Int J Miner Process* 2017; 161: 83–93.
18. Emmanuel B, Ajayi JA, Makhatha E. Investigation of copper recovery rate from copper oxide ore occurring as coarse grains locked in porphyritic fine grain alumina and silica. *Energy Procedia* 2019; 157: 972–6.
19. **Subagja R**. Termodinamika proses peleburan tembaga. *Metallurgi* 1995; 10: 46.
20. Schlesinger ME, King MJ, Sole KC, Davenport WG. *Extractive metallurgy of copper*. Amsterdam: Elsevier; 2011.
21. Watling H. Chalcopyrite hydrometallurgy at atmospheric pressure: Review of acidic chloride process options. *Hydrometallurgy* 2014; 146: 96–110.
22. Debernardi G, Gentina JC, Albistur P, Slanzi G. Evaluation of processing options to avoid the passivation of chalcopyrite. *Int J Miner Process* 2013; 125: 1–4.

23. Dakubo F, Baygents JC, Farrell J. Peroxodisulfate assisted leaching of chalcopyrite. *Hydrometallurgy* 2012; 121–124: 68–73.
24. Zhao H, Wang J, Gan X, Hu M, Tao L, Qiu G. Role of pyrite in sulfuric acid leaching of chalcopyrite: An elimination of polysulfide by controlling redox potential. *Hydrometallurgy* 2016; 164: 159–165.
25. Nakazawa H, Nakamura S, Odashima S, Hareyama W. Effect of carbon black to facilitate galvanic leaching of copper from chalcopyrite in the presence of manganese (IV) oxide. *Hydrometallurgy* 2016; 163: 69–76.
26. Veloso TC, Peixoto JJ, Pereira MS, Leao VA. Kinetics of chalcopyrite leaching in either ferric sulphate or cupric sulphate media in the presence of NaCl. *International Journal of Mineral Processing*. 2016; 148: 147–54.
27. Granata G, Takahashi K, Kato T, Tokoro C. Mechanochemical activation of chalcopyrite: Relationship between activation mechanism and leaching enhancement. *Miner Eng* 2019; 131: 280–5.
28. Nazarudin N. Potensi dan prospek investasi di sektor pertambangan dan energi. Jakarta: Departemen Pertambangan dan Energi; 1998.
29. Royani A, Lalasari LH, Firdiyono, **Subagja R**, Solihin. Pengaruh temperatur hidrotermal pada ekstraksi titanium dari bijih ilmenit Bangka menggunakan Jalur sulfat. Dalam: Seminar Material Metalurgi 2011. Pusat Penelitian Metalurgi LIPI, Tangerang Selatan 2011: 101.
30. **Subagja R**, Andriyah L, Lalasari LH. Decomposition of ilmenite from Bangka Island – Indonesia with KOH solutions. *Asian Transactions on Basic and Applied Sciences* 2013; 03(02): 59–64.
31. Lalasari LH, **Subagja R**, Yuwono AH, Firdiyono F, Harjanto S, Suharno B. Sulfuric acid leaching of Bangka Indonesia ilmenite ore and ilmenite decomposed by NaOH. *Adv Mater Res*. 2013; 789: 522.

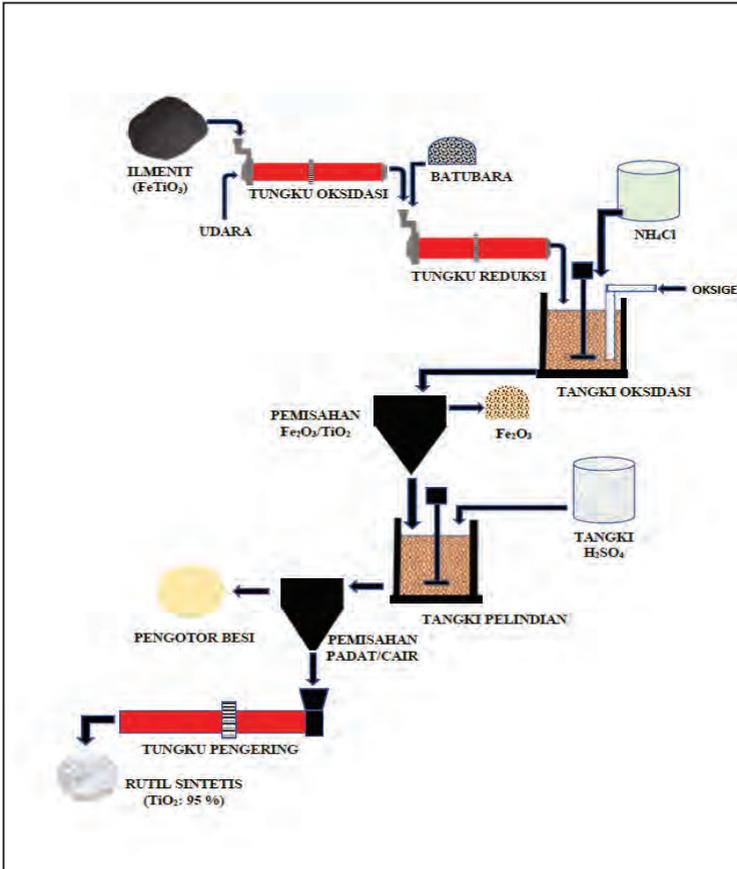
32. **Subagja R**, Royani A, Prasetyo P. Pengaruh penambahan NaOH, temperatur, dan waktu terhadap pembentukan fasa natrium titanat dan natrium ferit pada proses pemanggangan ilmenit Bangka. *Metalurgi* 2012; 27: 241.
33. Royani A, **Subagja R**, Prasetyo P. Pengaruh penambahan Na_2CO_3 , temperatur, dan waktu pemanggangan terhadap dekomposisi ilmenit Bangka. Dalam: *Prosiding Seminar Material Metalurgi 2012*. Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI, Tangerang Selatan 2012: 65–72.
34. **Subagja R**, Andriyah L, Lalasari LH. Titanium dissolution from Indonesian ilmenite. *Int J Basic Appl Sci IJBAS-IJENS* 2013; 13(04): 97–103.
35. Royani A, **Subagja R**. Proses pencucian air terhadap kalsin hasil pemanggangan campuran bahan FeTiO_3 -NaOH. Dalam: *Prosiding Seminar Metalurgi Material 2013*, Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI, Tangerang Selatan 2013: 21.
36. **Subagja R**, Royani A. Titanium dissolution from decomposed ilmenite using NaOH into the aqueous sulphuric acid solutions. Dalam: *IOP Conf Series: Materials Science and Engineering* 541. 2019: 1–6.
37. Firdiyono F, **Subagja R**, Lalasari LH, Setiawan I, Indah N. Recovery TiO_2 dari larutan TiOSO_4 hasil ekstraksi bijih ilmenit Bangka menggunakan proses solgel. *Metalurgi* 2010; 25: 49.
38. **Subagja R**, Royani A, Suharyanto A, Andriah L, Natasha NC. Pengaruh temperatur dan waktu kalsinasi terhadap perubahan fasa TiO_2 . *Metalurgi* 2014; 3: 245.
39. Quast K, Connor JN, Skinner W, Robinson DJ, Addai-mensah J. Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores part 1: Literature review. *Miner Eng* 2015; 79: 261–8.
40. Setiawan I, Harjanto S, Rustandi A, **Subagja R**. Reducibility of low nickel lateritic ores with presence of calcium sulfate. *Int J Eng Technol IJET-IJENS* 2014; 14: 56.

41. **Subagja R**, Prasetyo AB, Mayangsari W. Peningkatan kadar nikel dalam laterit jenis limonit dengan cara peletasi, pemanggang-an reduksi, dan pemisahan magnet campuran bijih, batu bara, dan Na_2SO_4 . *Metalurgi* 2016; 31: 103.
42. Setiawan I, Harjanto S, **Subagja R**. Low-Temperature carboth-ermic reduction of indonesia nickel lateritic ore with sub-bitumi-nous coal. Dalam: *IOP Conf Series: Materials Science and Engi-neering* 202. 2017: 1–9
43. Shofi A, Ramadini C, Samuel R, Nurjaman F, Suharno B, **Subagja R**. Effect of the first thermal stage temperature and retention time in two-stage thermal upgrading of low-grade nickel lateritic ore. Dalam: *IOP Conf Series: Materials Science and Engineering* 478. 2019: 1–5
44. **Subagja R**, Firdiyono F, Tjahyono ED, Arif A, Rustiadi, Rahardjo B, dkk. Pengolahan bijih nikel laterit. Serpong: Puslitbang Meta-lurgi LIPI; 1993.
45. **Subagja R**, Firdiyono F. Kinetika reaksi pelarutan nikel dari kalsin nikel laterit. *Metalurgi* 2015; 30: 71
46. **Subagja R**. Pengendapan nikel dari larutan nikel sulfat dengan natrium sulfide Na_2S . *Metalurgi* 1999; 14: 2.
47. **Subagja R**. Pembuatan logam nikel dari nikel matte dengan cara elektrolisis dalam larutan elektrolit nikel klorida. *Tekmol Indone-sia* 2008; 31: 1.
48. **Subagja R**. Pelarutan nikel dan kobal dari nikel matte dengan menggunakan larutan HCL. Dalam: *Prosiding Pemaparan Hasil Litbang Ilmu Pengetahuan Teknik, Kedeputian IPT LIPI, Ban-dung* 1999: 302–307.
49. **Subagja R**. Proses pelarutan nikel dan kobal dari nikel matte menggunakan larutan *spent* elektrolit nikel klorida. *Metalurgi* 2006; 21: 39.
50. **Subagja R**. Penghilangan ion tembaga dari larutan nikel klori-da dengan cara sementasi menggunakan nikel matte. *Metalurgi*. 2003; 18: 23.

51. **Subagja R.** Penghilangan ion besi dari larutan nikel klorida. *Metalurgi* 2006; 21: 12.
52. **Subagja R.** Pemisahan ion kobal dari larutan nikel klorida dengan cara *solvent* ekstraksi. *TeknoL Indonesia* 2011; 34: 102.
53. **Subagja R.** Nickel extraction from nickel matte. Dalam: IOP Conf Series: Materials Science and Engineering 285. 2018: 1–10.
54. **Subagja R.** Potensial pH diagram sistem Cu-Fe-H₂O berbasis komputer. Dalam: Prosiding Seminar Material Metalurgi, Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI, Tangerang Selatan 2013: 311–319.
55. **Subagja R,** Andriyah L. Kinetika reaksi pelarutan tembaga dari *Malachite* ke dalam larutan asam sulfat. *Metalurgi* 2013; 28: 203.
56. **Subagja R,** Sufiandi D. Pengaruh pH dan spesies ionic dalam larutan terhadap ekstraksi tembaga oleh *Kelex 100* dari larutan tembaga sulfat. *Metalurgi* 1991; 9(52).
57. **Subagja R.** Pengendapan tembaga dari larutan tembaga sulfat dengan cara sementasi menggunakan besi. *Metalurgi* 2014; 29: 161.
58. Napitupulu E, **Subagja R.** Percobaan pendahuluan proses pengendapan tembaga secara elektrolisa dari larutan tembaga sulfat. *Metalurgi* 1982; 2: 2.
59. Natasha NC, **Subagja R.** Pengendapan tembaga dari larutan tembaga sulfat dengan metoda elektrolisis. Dalam: Seminar Nasional Material dan Metalurgi (SENAMM VIII), Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 2015: 54–8.
60. Napitupulu E, **Subagja R,** Haryono A. Percobaan pendahuluan proses pengendapan tembaga secara elektrolisa dari larutan tembaga sulfat. Bandung: Lembaga Metalurgi Nasional LIPI; 1982.
61. Pusat Komunikasi Publik. Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional 2015–2035. Jakarta: Kementerian Perindustrian RI; 2015.

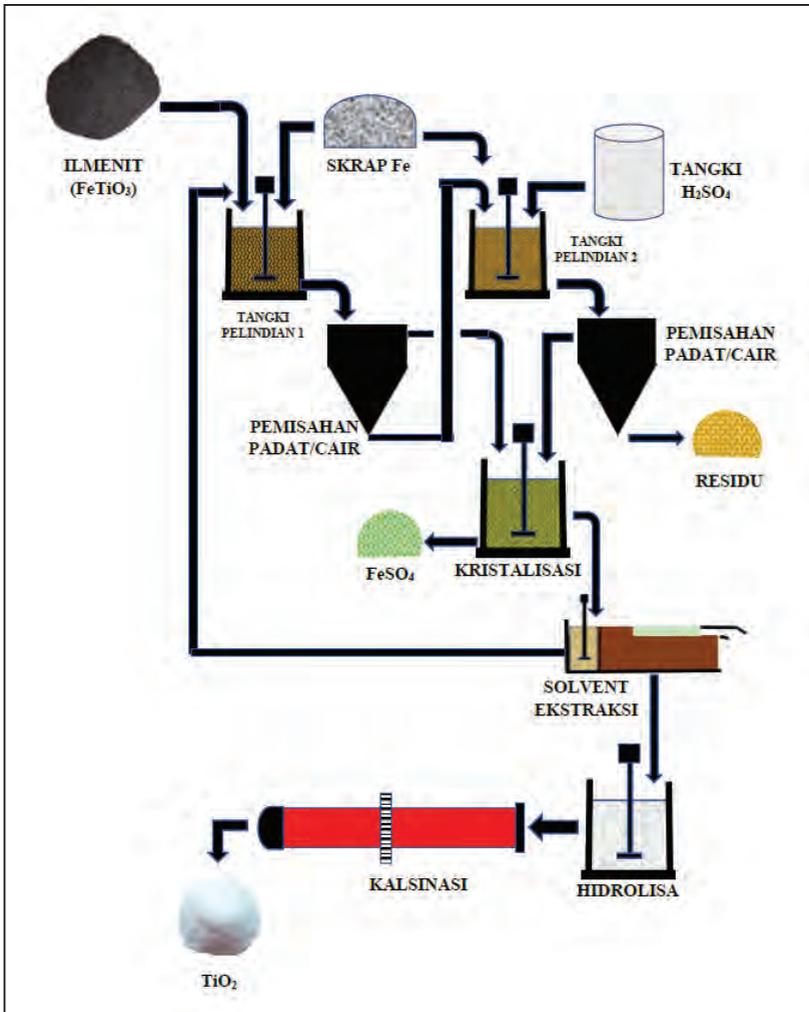
62. Opra DP, Gnedenkov SV, Sinebryukhov SL. Recent efforts in design of TiO_2 (B) anodes for high-rate lithium-ion batteries: A review. *J Power Sources* 2019; 442(Juli): 227225.
63. **Subagja R.** Monasit Bangka dan alternatif proses pengolahannya. *Metalurgi* 2014; 29: 79–90.
64. Aherwar A, Singh AK, Patnaik A. Review article cobaltbased alloy: A better choice biomaterial for hip implants. *Trends in Biomaterials & Artificial Organs* 2016; 30(1): 50–55.

LAMPIRAN



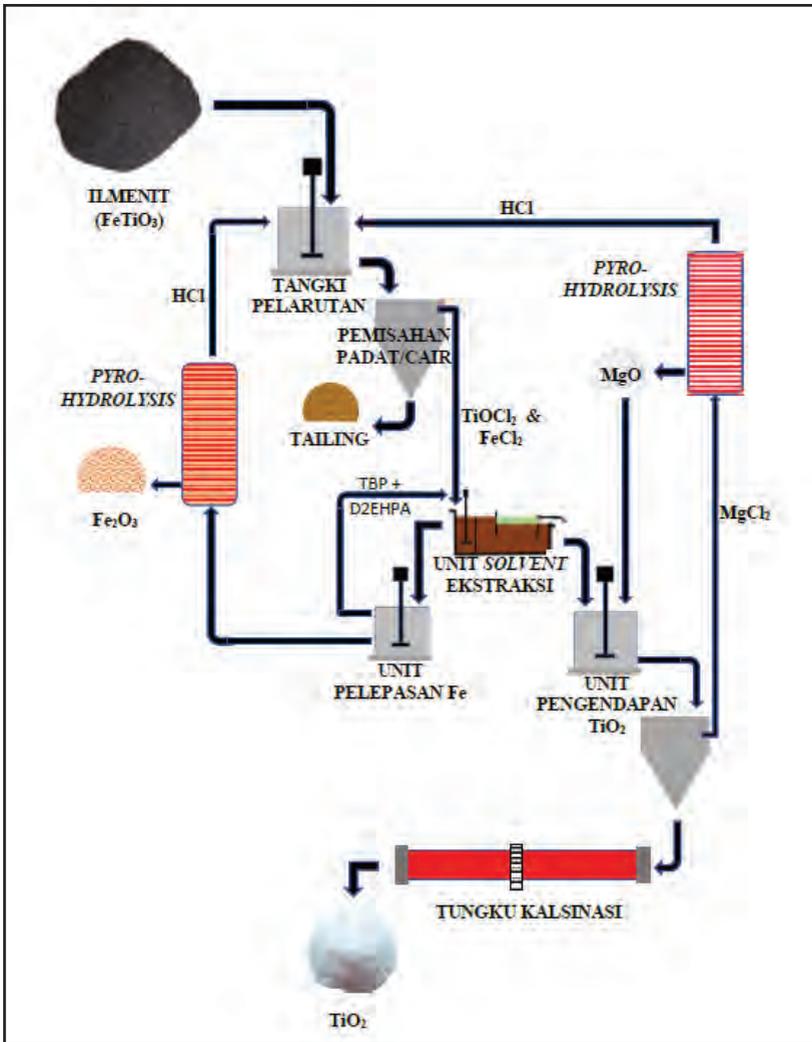
Sumber: Zhang, Zhu, Cheng (2011).

Gambar 1. Proses Betcher - pembuatan TiO_2 dari ilmenit⁸.



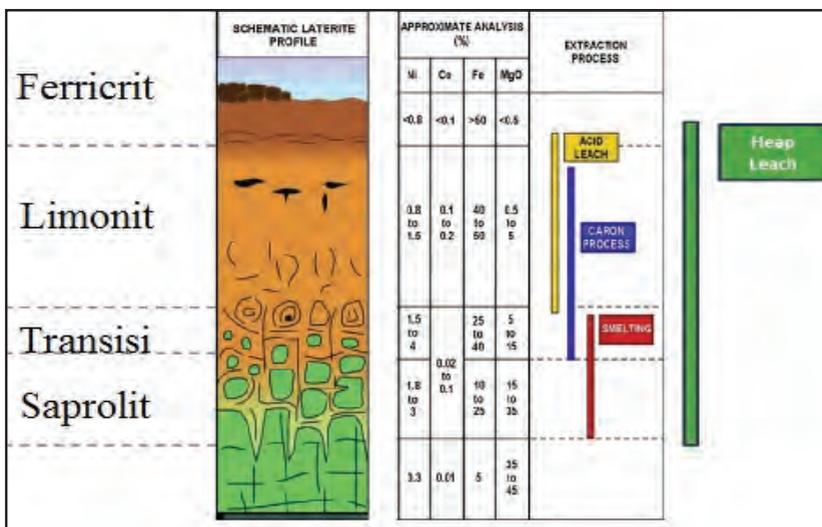
Sumber: Zhang, Zhu, Cheng (2011).

Gambar 2. Proses sulfat dimodifikasi unit *solvent* ekstraksi⁸.



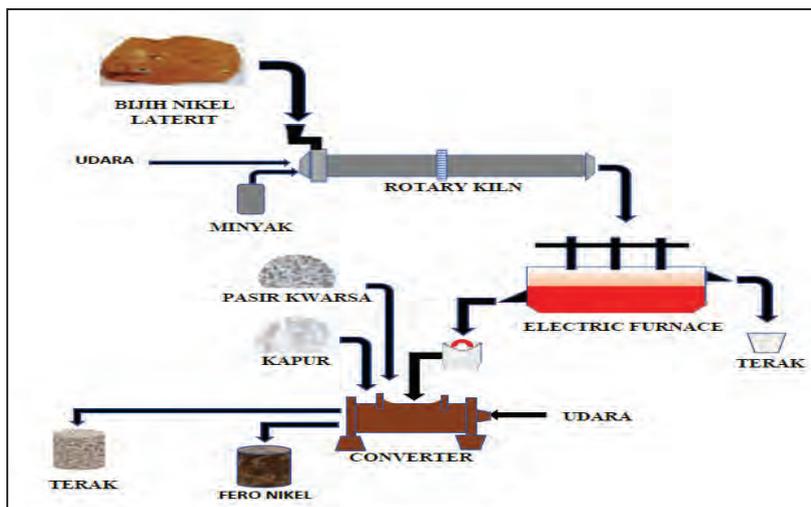
Sumber: Zhang, Zhu, Cheng (2011).

Gambar 3. Pembuatan TiO₂ dengan proses klorida⁸.



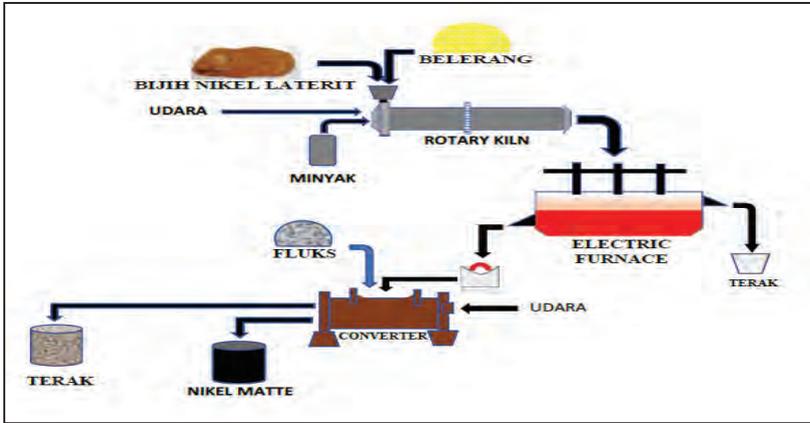
Sumber: Oxley, Smith, Caceres, 2016.

Gambar 4. Skema profil endapan laterit⁹.



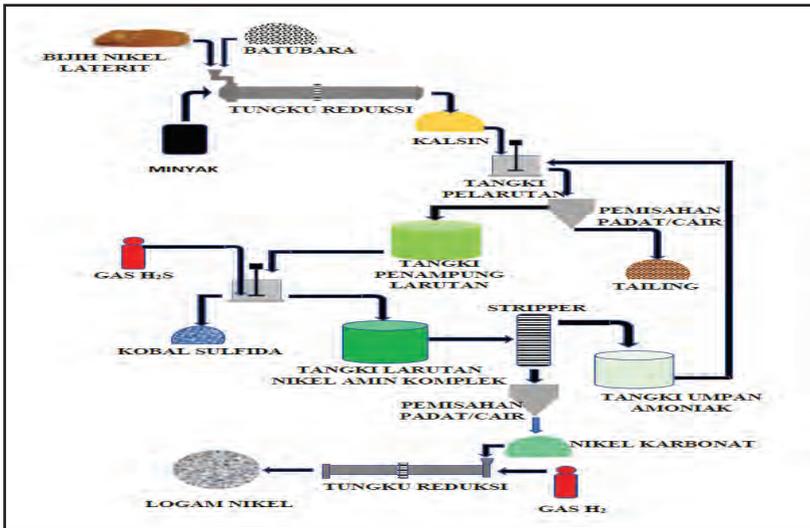
Sumber: Diolah kembali dari Keskinkilic (2019).

Gambar 5. Pembuatan feronikel dari bijih nikel laterit¹³.



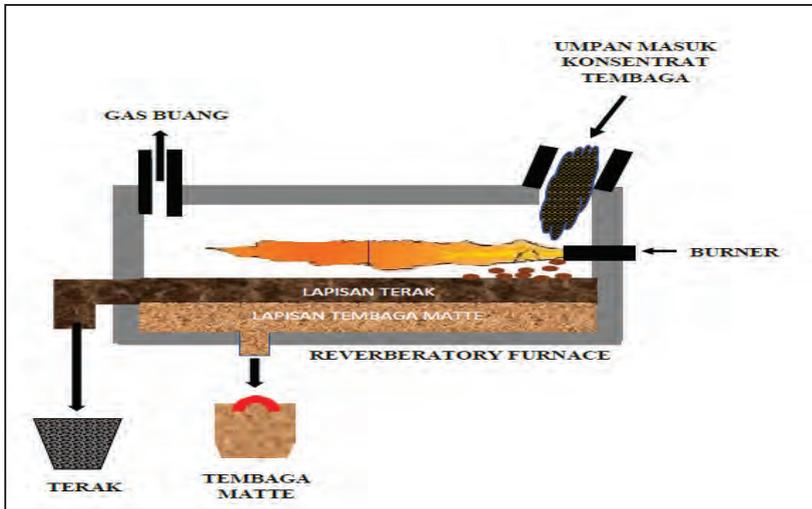
Sumber: Diolah kembali dari Burkin (1987); Crundwell (2011).

Gambar 6. Pembuatan nikel matte dari nikel laterit^{14,15}.



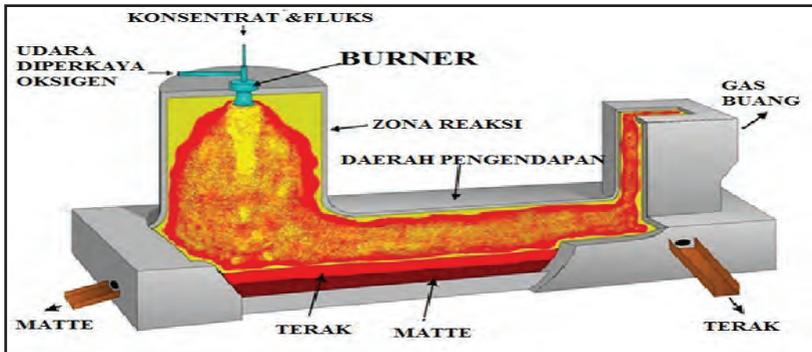
Sumber: Diolah kembali dari Burkin (1987); Dry (2015).

Gambar 7. Pembuatan logam nikel dengan proses Caron^{14,16}.



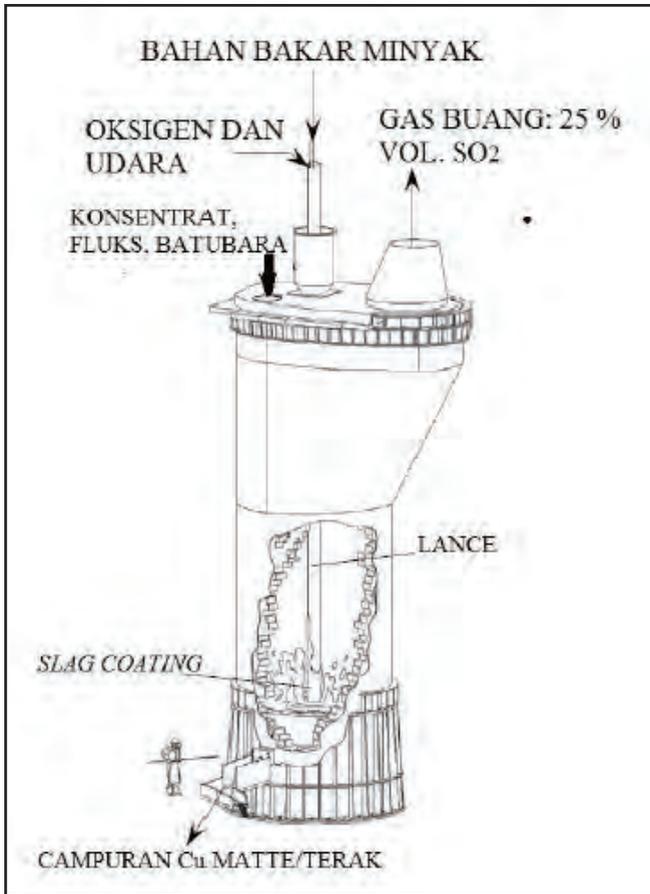
Sumber: Schlesinger, King, Sole, Davenport (2011).

Gambar 8. Reverberatory furnace²⁰.



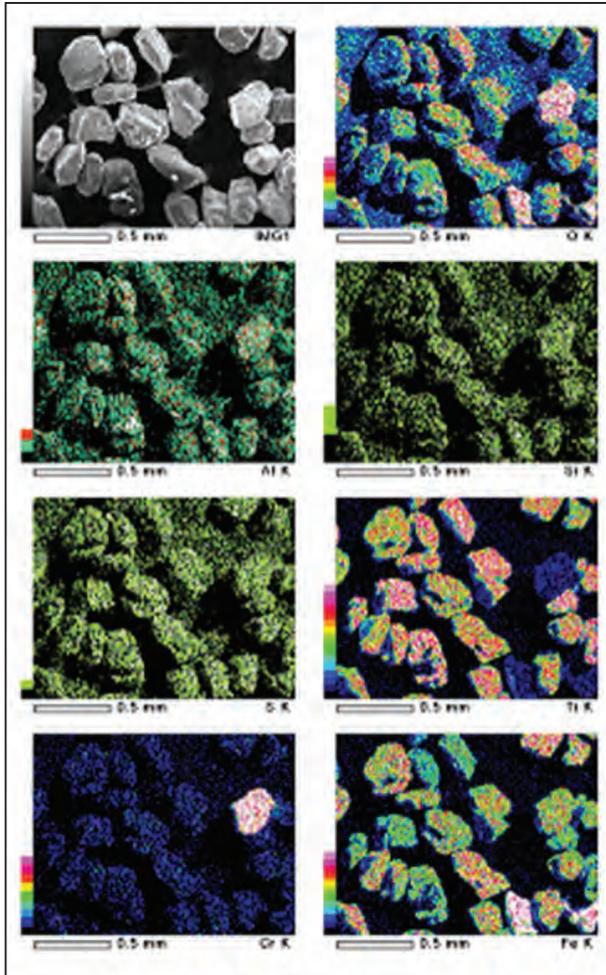
Sumber: Schlesinger, King, Sole, Davenport (2011).

Gambar 9. Peleburan tembaga dengan *Flash Smelter*²⁰.



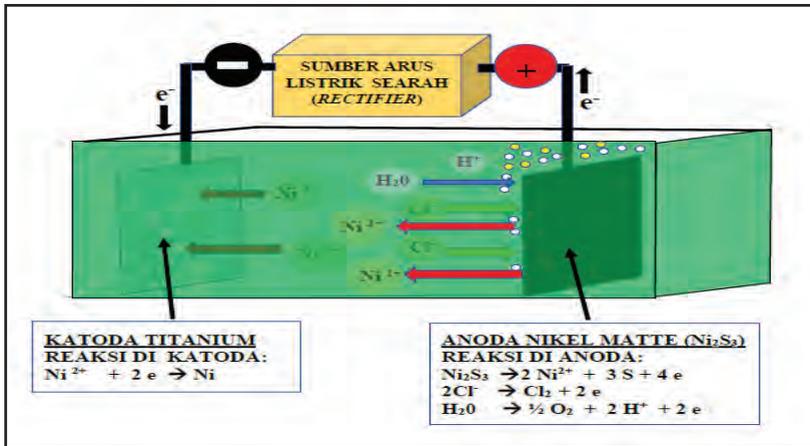
Sumber: Schlesinger, King, Sole, Davenport (2011).

Gambar 10. Proses peleburan tembaga *isasmelt*²⁰.



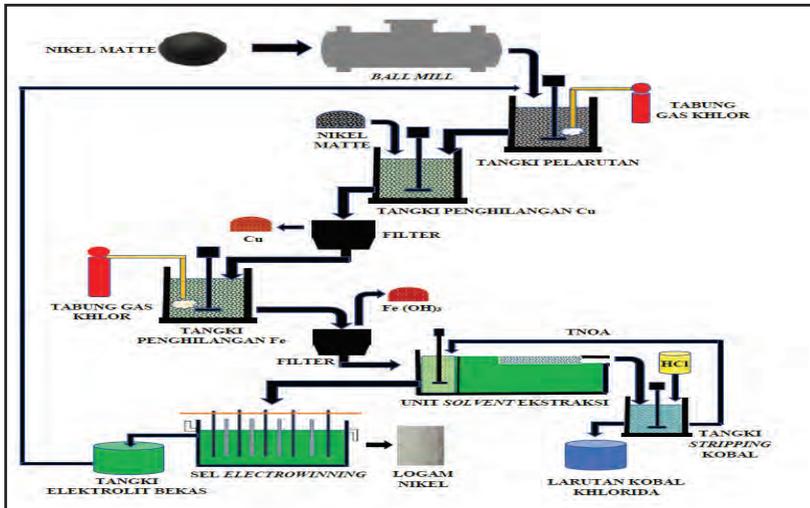
Sumber: Subagja (2013).

Gambar 11. Struktur mikro ilmenit³⁰.



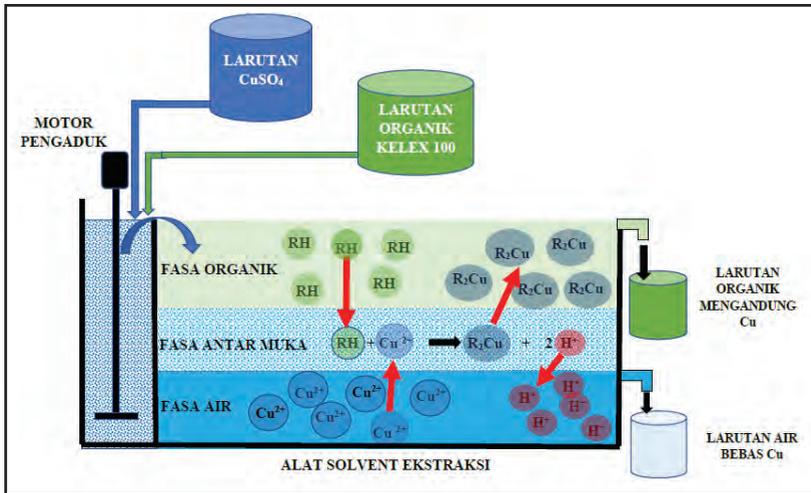
Sumber: Subagja (2008).

Gambar 12. Matte *Electrorefining*⁴⁷.



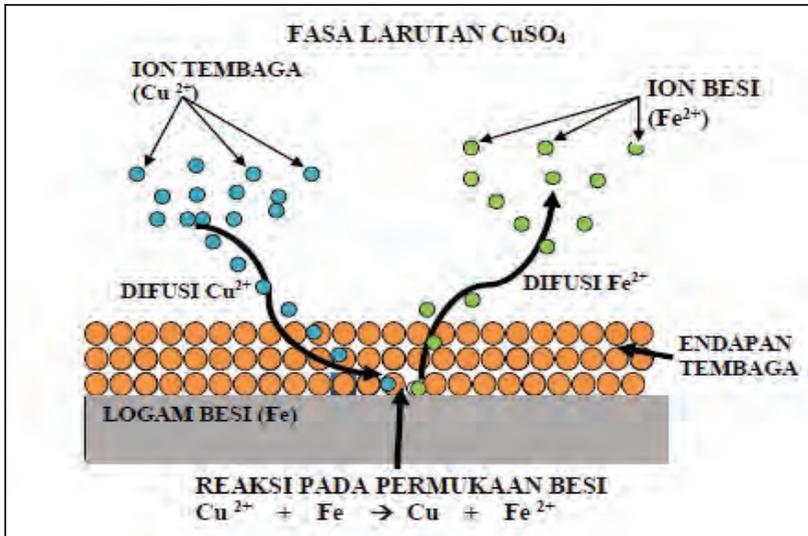
Sumber: Subagja (2017).

Gambar 13. Pembuatan logam nikel dengan hidro–elektrometalurgi⁵³.



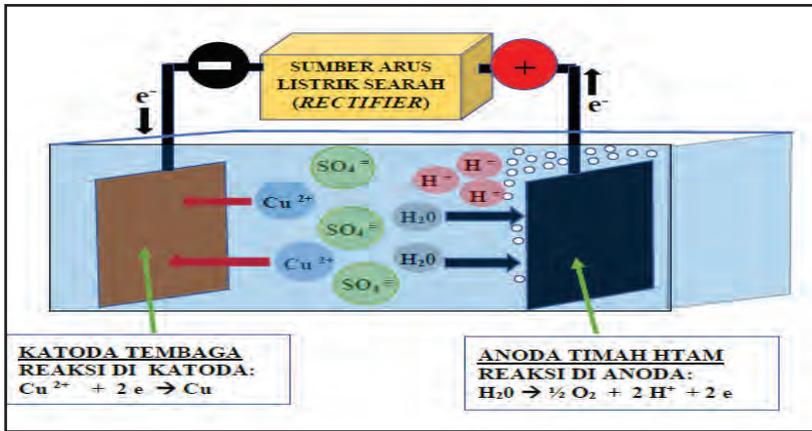
Sumber: Subagja, Sufiandi (1991).

Gambar 14. Peralatan *solvent* ekstraksi tembaga⁵⁶.



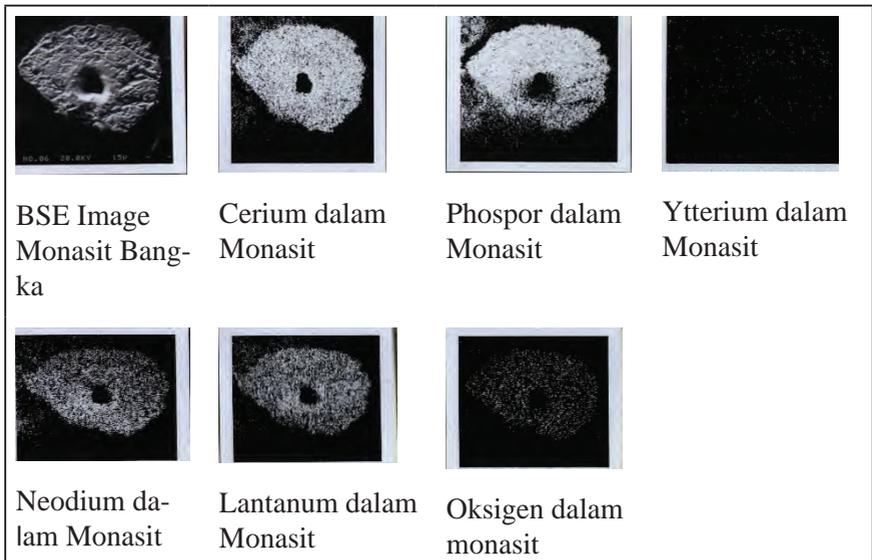
Sumber: Subagja (2014).

Gambar 15. Mekanisme sementasi tembaga oleh besi⁵⁷.



Sumber: Napitupulu (1982).

Gambar 16. Proses elektrolisa tembaga⁵⁸.



Sumber: Subagja (2014).

Gambar 17. Struktur mikro monasit⁶³.

Tabel 1. Distribusi ukuran serbuk tembaga.

Ukuran	+100	-100 +150	-150+200	-200+230	-230+325	- 325
#						
%	4,06	23,96	21,27	18,99	16,96	14,14

Sumber: Subagja (1996).

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Jurnal Internasional

1. Setiawan I, Harjanto S, Rustandi A, **Subagja R**. Reducibility of low nickel lateritic ores with presence of calcium sulfate. *Int J Eng Technol IJET-IJENS* 2014; 14: 56.
2. Lalasari LH, **Subagja R**, Yuwono AH, Firdiyono F, Harjanto S, Suharno B. Sulfuric acid leaching of Bangka Indonesia ilmenite ore and ilmenite decomposed by NaOH. *Adv Mater Res* 2013; 789: 522.
3. **Subagja R**, Andriyah L, Lalasari LH. Titanium dissolution from Indonesian ilmenite. *Int J Basic Appl Sci IJBAS-IJENS* 2013; 13(04): 97–103.
4. **Subagja R**, Andriyah L, Lalasari LH. Decomposition of ilmenite from Bangka Island – Indonesia with KOH solutions. *Asian Transactions on Basic and Applied Sciences* 2013; 03(02): 59–64.
5. **Subagja R**. The copper, nickel and aluminium industri in Indonesia. *Petrominer* 1995; (91): 17–20.
6. **Subagja R**. A Study on processing of complex sulphide ores through hydrometallurgical. *Waseda Daigaku Koho*. 1990; (2072): 1–2.
7. **Subagja R**, Fuwa A. A study on copper ferrite dissolution in sulphuric acid. *Shigen to Sozai* 1989; 105: 49–54.
8. **Subagja R**, Kobayasi A, Takenaka H, Fuwa A. Fundamental study on zinc sulfation roasting reaction. *J Min Mater Process Inst Japan* 1989; 105: 639–44.
9. Takada Y, **Subagja R**, Fuwa A. A study on the relation between passivation behavior and microstructure of copper anode. *J Min. Metall. Inst. Japan* 1988; 104: 289–95.
10. **Subagja R**, Fuwa A. New hydrometallurgical process development for lead recovery from their minerals. *J. Min. Metall. Inst. Japan* 1988; 5: 1.

Jurnal Nasional

11. Febriana E, Prasetyo AB, Mayangsari W, Irawan J, Hakim MI, Prakasa TA, Juniarsih A, Suharyanto A, Setiawan I, **Subagja R**. Effect of sulfur addition to nickel recovery of laterite ore. *J Kim Sains dan Apl* 2020; 23(1): 14–20.
12. Rafdli M, Setiawan I, Febriana E, **Subagja R**, Harjanto S. Reaksi karbotermik nickel ferrous sintetik dengan campuran batu bara sub-bituminous dan sulfur kadar tinggi. *Metalurgi* 2019; 3: 131–40.
13. Royani A, **Subagja R**. Ekstraksi kalsium dari bijih dolomit terkalsinasi menggunakan pelarut asam klorida. *J Teknol Miner dan Batu Bara* 2019; 15: 13–22.
14. **Subagja R**, Firdiyono F. Kinetika reaksi pelarutan nikel dari kalsin nikel laterit. *Metalurgi* 2015; 30: 71.
15. **Subagja R**. Pengendapan tembaga dari larutan tembaga sulfat dengan cara sementasi menggunakan besi. *Metalurgi* 2014; 29: 161.
16. **Subagja R**. Monasit bangka dan alternatif proses pengolahannya. *Metalurgi* 2014; 29: 79–90.
17. **Subagja R**, Royani A, Suharyanto A, Andriah L, Natasha NC. Pengaruh temperatur dan waktu kalsinasi terhadap perubahan fasa TiO_2 . *Metalurgi* 2014; 3.
18. **Subagja R**, Andriyah L. Kinetika reaksi pelarutan tembaga dari *Malachite* ke dalam larutan asam sulfat. *Metalurgi* 2013; 28: 203.
19. **Subagja R**, Royani A, Prasetyo P. Pengaruh penambahan NaOH, temperatur, dan waktu terhadap pembentukan fasa natrium titanat dan natrium ferit pada proses pemanggangan ilmenit Bangka. *Metalurgi* 2012; 27: 241–9.
20. **Subagja R**. Pemisahan ion kobal dari larutan nikel klorida dengan cara *solvent* ekstraksi. *Teknol Indonesia* 2011; 34: 102–10.
21. Firdiyono F, **Subagja R**, Lalasari LH, Setiawan I, Indah N. Recovery TiO_2 dari larutan $TiOSO_4$ hasil ekstraksi bijih ilmenit Bangka menggunakan proses solgel. *Metalurgi* 2010; 25: 49.

22. **Subagja R.** Pembuatan logam nikel dari nikel matte dengan cara elektrolisis dalam larutan elektrolit nikel klorida. *Teknologi Indonesia* 2008; 31: 1.
23. **Subagja R.** Proses pelarutan nikel dan kobal dari nikel matte menggunakan larutan *spent* elektrolit nikel klorida. *Metalurgi* 2006; 21: 39.
24. **Subagja R.** Penghilangan ion besi dari larutan nikel klorida. *Metalurgi* 2006; 21: 12.
25. **Subagja R.** Penghilangan ion tembaga dari larutan nikel klorida dengan cara sementasi menggunakan nikel matte. *Metalurgi* 2003; 18: 23.
26. **Subagja R.** Pengendapan nikel dari larutan nikel sulfat dengan natrium sulfida Na_2S . *Metalurgi* 1999; 14: 2.
27. **Subagja R.** Thermodinamika proses peleburan tembaga. *Metalurgi* 1995; 10: 46.
28. **Subagja R, Sufiandi D.** Pengaruh pH dan spesies ionic dalam larutan terhadap ekstraksi tembaga oleh *Kelex 100* dari larutan tembaga sulfat. *Metalurgi* 1991; 9(52).
29. **Subagja R, Napitupulu E, Firdiyono F, Purawiard R.** Studi feromangan. *Metalurgi* 1983; 3: 53–63.
30. Djaja S, Efendi EH, **Subagja R.** Operasi percobaan pilot plant pengolahan yarosit. *Metalurgi* 1982; 2: 10.
31. Napitupulu E, **Subagja R.** Percobaan pendahuluan proses pengendapan tembaga secara elektrolisa dari larutan tembaga sulfat. *Metalurgi* 1982; 2: 2.

Prosiding Internasional

32. Setiawan I, Febrina E, Prasetyo AB, **Subagja R, Firdiyono F.** The effect of iron content on the reduction of nickel laterite by direct reduction method. Dalam: *IOP Conf Series: Materials Science and Engineering* 2019; 541: 012039.

33. Setiawan I, Febriana E, **Subagja R**, Harjanto S, Firdiyono F. Investigations on mineralogical characteristics of Indonesian nickel laterite ores during the roasting process. Dalam: IOP Conf Series: Material Science and Engineering 2019; 541: 012038.
34. **Subagja R**, Royani A. Titanium dissolution from decomposed ilmenite using NaOH into the aqueous sulphuric acid solutions. Dalam: IOP Conf Series: Materials Science and Engineering 2019; 541: 1–6.
35. Lalasari LH, Setiawan I, **Subagja R**, Firdiyono F, Indah N. The coagulant influence and characterization of TiO_2 recovery from $TiOSO_4$ solution resulted in the extraction of Bangka ilmenite. Proceeding of The International Conference QiR (quality on research), Bali 2011: 1315–21.
36. Lalasari LH, C NI, **Subagja R**. Preparation, characterization, and kinetic of the dissolution of Bangka ilmenite in HCl solution. Dalam: 12th International Conference on Quality in Research (QiR), Bali 2011: 1164–71.
37. Yusuf, **Subagja R**. Sulfuric acid leaching of used catalyst. Prosiding Asia Pasific Minerals Engineering, Bandung 1993: 1.
38. **Subagja R**, Fuwa A. Do, Namari, Aen, Tetsu Ryuka Ko no Ryuusangka Baisho ni Kangsuru Kenkyu. Dalam: MMIJ Annual Spring Meeting, Tokyo; 1987.
39. **Subagja R**, Fuwa A. Ryusan ni Okeru Do Feraitono Shishutsu. Dalam: MMIJ Annual Spring Meeting, Tokyo; 1987.

Prosiding Nasional

40. Irawan D, Soemardi TP, **Subagja R**. Pemilihan material untuk elektroda elektrolizer tipe alkaline dan penempatan material lokal dengan metode Ashby-Saty. Prosiding Seminar Material Metalurgi 2014, Pusat Penelitian Metalurgi LIPI, Tangerang Selatan 2014: 125–33.
41. Royani A, **Subagja R**. Proses pencucian air terhadap kalsin hasil pemanggangan campuran bahan $FeTiO_3$ -NaOH. Prosiding Seminar Metalurgi Material 2013, Pusat Penelitian Metalurgi LIPI, Tangerang Selatan 2013: 21–26.

42. **Subagja R.** Potensial pH diagram sistem Cu-Fe-H₂O, berbasis komputer. Prosiding Seminar Material Metalurgi 2013, Pusat Penelitian Metalurgi LIPI, Tangerang Selatan 2013: 311–319.
43. Royani A, **Subagja R**, Prasetyo P. Pengaruh penambahan Na₂CO₃, temperatur dan waktu pemanggangan terhadap dekomposisi ilmenit Bangka. Prosiding Seminar Material Metalurgi 2012, Pusat Penelitian Metalurgi LIPI, Tangerang Selatan 2012: 65–72.
44. Royani A, Sufiandi D, **Subagja R.** Percobaan pendahuluan pembuatan lithium mangan oksida sebagai bahan elektroda baterai. Dalam: Seminar Material Metalurgi. 2011, Pusat Penelitian Metalurgi LIPI, Tangerang Selatan 2011: 107–110.
45. Royani A, Lallasari LH, Firdiyono, **Subagja R**, Solihin. Pengaruh temperatur hidrotermal pada ekstraksi titanium dari bijih ilmenit Bangka menggunakan jalur sulfat. Dalam: Seminar Material Metalurgi 2011, Pusat Penelitian Metalurgi LIPI, Tangerang Selatan 2011: 101.
46. Yuswono, **Subagja R.** Tar batu bara sebagai bahan baku pembuatan serat karbon. Prosiding Seminar Kaltim Babel, Kedepatian IPK LIPI, Jakarta 2007: 26–37.
47. Sopaheluwakan J, **Subagja R.** Program riset kompetitif Kalimantan Timur-Bangka Belitung dalam perspektif ketahanan wilayah dan masyarakat pesisir: Tinjauan dan cakrawala ke depan. Prosiding Seminar Kaltim Babel, Kedepatian IPK LIPI, Jakarta 2007: 1–12.
48. Adjiantoro B, **Subagja R.** Pembuatan grafit sintetis menggunakan *filler* kokas batu bara dan binder *acid sludge* limbah pengolahan minyak bumi Kalimantan Timur. Prosiding Seminar Material Metalurgi, Puslit Metalurgi LIPI, Serpong 2006: 292–8.
49. Adjiantoro B, **Subagja R.** Pengaruh perlakuan impregnasi berulang terhadap karakteristik grafit sintetis. Prosiding Seminar Material Metalurgi, Puslit Metalurgi LIPI, Serpong 2006: 305–13.

50. **Subagja R.** Pengalaman Pusat Penelitian Metalurgi LIPI dalam penelitian pemanfaatan bijih besi dan pemanfaatan pasir besi titan. Dalam: Lokakarya Bahan Baku Lokal, PT Krakatau Steel, Cilegon 2005.
51. **Subagja R.** Studi reduksi campuran oksidasi besi, neodim dan boron dengan reduktor CaH_2 . Prosiding Seminar Material Metalurgi, Puslit Metalurgi, Serpong 2004: 372–81.
52. Binudi R, **Subagja R**, Firdiyono F. Pembuatan prototip pabrik briket limbah batu bara halus di daerah Kaltim. Dalam: Seminar Nasional Metalurgi, Puslit Metalurgi, Serpong 2003: 119–25.
53. Yuswono, **Subagja R.** Pelapisan titanium nitrida (TiN) untuk pembuatan baja perkakas melalui proses deposit uap reaksi kimia (CVD). Prosiding Pemaparan Hasil Litbang Ilmu Pengetahuan Teknik, Kedepatian IPT LIPI, Bandung 2000: 108–15.
54. **Subagja R.** Pelarutan nikel dan kobal dari nikel matte dengan menggunakan larutan HCl. Prosiding Pemaparan Hasil Litbang Ilmu Pengetahuan Teknik, Kedepatian IPT LIPI, Bandung 1999: 302–307.
55. **Subagja R.** Proses Pembuatan Logam Nikel dari Nikel Matte dengan Cara Elektrolisis. Prosiding Seminar Material, Puslit Metalurgi LIPI, Jakarta 1997: 39.
56. **Subagja R**, Binudi R, Arif A, Sudaryat, Hidayat UA. Percobaan pembuatan serbuk tembaga dalam skala pilot plant. Prosiding Pemaparan Hasil Litbang Ilmu Pengetahuan Teknik, Kedepatian IPT LIPI, Bandung 1996.
57. Hans K, Sudjono K, Muljadi, **Subagja R**, Nugroho P. Pengujian struktur mikro dan sifat termal $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Prosiding Seminar Super Konduktor, LFN, Serpong 1990.
58. **Subagja R.** Masalah SO_2 dan penanggulangannya. Dalam: Seminar Metalurgi bukan Besi, LMN, Bandung 1981.

DAFTAR PUBLIKASI LAINNYA

1. **Subagja R.** Pengolahan sumber daya primer: Pengendapan tembaga dari larutan CuSO_4 . Serpong: Pusat Penelitian Metalurgi LIPI; 2014.
2. **Subagja R.** Pembuatan material TiO_2 dari mineral lokal Indonesia untuk pengembangan material maju. Serpong: Pusat Penelitian Metalurgi LIPI; 2014.
3. **Subagja R.** Pengolahan sumber daya primer: Pelarutan tembaga dari bijih tembaga *malasit*. Serpong: Pusat Penelitian Metalurgi LIPI; 2013.
4. **Subagja R.** Pembuatan material TiO_2 dari mineral lokal Indonesia untuk pengembangan material maju. Serpong: Pusat Penelitian Metalurgi LIPI; 2013.
5. **Subagja R.** Pembuatan material TiO_2 dari mineral lokal Indonesia untuk pengembangan material maju. Serpong: Pusat Penelitian Metalurgi LIPI; 2012.
6. **Subagja R.**, Sudaryat, Rustiadi, Waluyo. Pengembangan bahan magnet Fe-Nd-B. Serpong: Puslitbang Metalurgi LIPI; 2000.
7. **Subagja R.** Pembuatan logam nikel dan kobal dari nikel matte dengan cara hidro dan elektrometalurgi. Jakarta: Kantor Menteri Negara Riset dan Teknologi, Dewan Riset Nasional; 2000.
8. **Subagja R.** Penelitian penguasaan teknologi. Serpong: Puslitbang Metalurgi LIPI; 2000.
9. **Subagja R.**, Sufiandi D. Pembuatan titanium nitrida dari TiCl_4 untuk menunjang industri kecil menengah. Serpong: Puslitbang Metalurgi; 1999.
10. **Subagja R.**, Sufiandi D. Pembuatan TiO_2 dari TiCl_4 . Serpong: Puslitbang Metalurgi LIPI; 1998.
11. Mitsutomi K, Djohari A, Firdiyono F, **Subagja R.** Sulfuric acid leaching of the reduction roast pellet of nickel laterite. Serpong: Research and Development Centre for Metallurgy LIPI; 1991.

12. **Subagja R**, Napitupulu E, Firdiyono F, Rustiadi P. Studi ferromangan. Bandung: Lembaga Metalurgi Nasional LIPI; 1983.
13. Napitupulu E, **Subagja R**, Haryono A. Percobaan pendahuluan proses pengendapan tembaga secara elektrolisa dari larutan tembaga sulfat. Bandung: Lembaga Metalurgi Nasional LIPI; 1982.
14. Djaja S, Effendi EH, **Subagja R**, Somantri O, Nursaid, Suranata W. Operasi percobaan *pilot plant* pengolahan yarosit. Bandung: Lembaga Metalurgi Nasional LIPI; 1982.
15. Effendi EH, **Subagja R**, Haryono A. Studi permintaan dan penyediaan logam tembaga di Indonesia. Bandung: Lembaga Metalurgi Nasional LIPI; 1981.
16. Effendi EH, **Subagja R**. Market analysis for copper and copper product, in feasibility study on copper cathode plant. Bandung: National Institute for Metallurgy LIPI; 1981.

PATEN

1. **Subagja R**, Djohari A, Firdiyono F. Proses Pengolahan Bijih Nikel Laterit. Paten Indonesia No. ID 0002994. 1998 Juli 24.
2. **Subagja R**, Royani A, Andriyah L, Suharyanto A, Prasetyo P. Pembuatan TiO_2 dari Ilmenit. Paten Indonesia No. IDP 000067106. 2020 Februari 5.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. Data Pribadi

Nama lengkap	: Dr. Ir. Rudi Subagja
Tempat, Tanggal Lahir	: Bandung, 18 Februari 1955
Anak ke	: 3 dari 9 Bersaudara
Jenis Kelamin	: Laki-laki
Nama Ayah Kandung	: E.S. Sulaeman
Nama Ibu Kandung	: R.A. Sukati
Nama Istri	: Dra. Siti Hafisah
Nama Anak	: Hana Sakurawati, S.Adm : Wahyudi Setia Darma, S.Kom., MSE
Nama Instansi	: Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI
Judul Orasi	: Pengembangan Teknologi Proses Ekstraksi Titanium, Nikel, dan Tembaga untuk kemandirian In- dustri Nasional
Bidang Kepekararan	: Metalurgi Proses
No. SK Pangkat Terakhir (Pembina Utama)	: No. 23/K Tahun 2016
No. SK Peneliti Utama	: 140/M Tahun 2006

B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang	Nama Sekolah/PT	Kota, Negara	Tahun Lulus
1.	SD	Budi Isteri	Bandung	1967
2.	SLTP	SMP N VII	Bandung	1970
3.	SLTA	SMA N V	Bandung	1973
4.	S1	Institut Teknologi Bandung	Bandung	1980
5.	S2	Waseda University	Tokyo, Jepang	1986
6.	S3	Waseda University	Tokyo, Jepang	1989

C. Pendidikan Nonformal

No.	Nama Kursus/Pelatihan	Tempat, Kota, Negara	Tahun
1.	Kursus Bahasa Jepang	Waseda University, To- kyo, Jepang	1993
2.	R&D Management	LIPI Jakarta	1994
3.	Diklatpim TK III/ Se- padya	Lembaga Administrasi Negara, Bandung	1994
4.	Diklatpim TK II/ Spamen	Lembaga Administrasi Negara, Jakarta	1998
5.	Pelatihan Drafting Paten	LIPI, Jakarta	1999
6.	Leadership Development Programme (Program Pelatihan Kepemimpinan)	LIPI, Jakarta	2000
7.	Business Development Training Programme	Worthing, West Sussex, United Kingdom	2001

D. Riwayat Jabatan Struktural

No.	Nama Jabatan/ Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
1.	Kepala Balai Metalurgi Ekstraksi	Pusat Penelitian dan Pengembangan Metalurgi LIPI	1992–1997
2.	Kepala Bagian Tata Usaha	Pusat Penelitian dan Pengembangan Metalurgi LIPI	1997–2001
3.	Kepala Puslitbang Metalurgi LIPI	Pusat Penelitian dan Pengembangan Metalurgi LIPI	2000–2001
4.	Kepala Pusat Peneli- tian Metalurgi LIPI	Pusat Penelitian Metalur- gi LIPI	2001–2008

E. Riwayat Jabatan Fungsional

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1.	Asisten Peneliti	1/10/1982
2.	Ajun Peneliti Madya	1/2/1991
3.	Peneliti Muda	1/5/1996
4.	Peneliti Madya	28/06/2001
5.	Peneliti Utama	27/08/2010

F. Penugasan Khusus Nasional/Internasional

No.	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
1.	Pemimpin Proyek Penelitian dan Pengembangan Material LIPI	LIPI	1996–1997
2.	Koordinator Harian Kegiatan Penelitian Kompetitif Kaltim & Babel	LIPI	2002–2007

No.	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
3.	Verifikator Pembangunan Fasilitas Pemurnian Mineral dan Kemajuan Pembangunan Fasilitas Pemurnian Mineral	Dirjen Minerba Kementerian ESDM RI	2017–2018

G. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1.	MMIJ Annual Spring Meeting	Peserta dan Presenter	Mining Metallurgical Institute of Japan, Tokyo	1986
2.	MMIJ Annual Spring Meeting	Peserta dan Presenter	Mining Metallurgical Institute of Japan, Tokyo	1987
3.	TMS Annual Meeting	Peserta dan Presenter	American Institute of Mining and Metallurgical Engineering Las Vegas, USA	1989
4.	Pemaparan Hasil Litbang Kedepujian IPT LIPI	Peserta dan Presenter	Kedepujian IPT LIPI Bandung	1996
5.	Seminar Material '97	Peserta dan Presenter	Puslitbang Metalurgi LIPI Serpong	1997
6.	Pusat Pengkajian Teknologi dan Bisnis	Peserta dan Presenter	Petrokimia Gresik	1999
7.	Pemaparan Hasil Litbang IPT LIPI	Peserta dan Presenter	LIPI Bandung	1999

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
8.	2nd Asean–India Working Group on S&T Meeting	Peserta dan Presenter	ASEAN Committee on Science and Technology Singapore	1999
9.	Tim PME Kedeputan Bidang IPK LIPI	Anggota	LIPI Jakarta	2005– 2007
10.	Lokakarya Bahan Baku Lokal “Penyiapan Industrialisasi Bijih Besi Lokal untuk Menunjang Industri Baja Nasional”	Peserta dan Presenter	PT Krakatau Steel Cilegon	2005
11.	Paper Competition Metallurgy and Material’s Week	Juri	Departemen Teknik Metalurgi dan Material UI Depok	2012
12.	Perencanaan, Monitoring, dan Evaluasi (PME)	Anggota Tim PME	Puslit Metalurgi dan Material LIPI Tangsel	2013– 2018
13.	Indonesia Toray Science Foundation (ITSF) Seminar on Science and Technology	Reviewer	Toray Foundation Jakarta	2013– 2017
14.	Seminar Material Metalurgi	Reviewer	Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI Tangsel	2014

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
15.	Seminar Material Metalurgi	Reviewer	Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI Tangsel	2015
16.	Tim Penilai Penelitian P2MM LIPI	Ketua/ Anggota Tim	Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI Tangsel	2015– 2020
17.	3rd Biomaterial Conference	Reviewer	Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI Tangsel	2015
18.	Seminar Nasional Sains dan Teknologi	Peserta dan Presenter	Universitas Muhammadiyah Jakarta	2016
19.	Focus Group Discussion on Nuclear Forensic	Nara Sumber	Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir BATAN	2017
20.	Penelaah Buku pada Balai Media dan Reproduksi LIPI (LIPI Press)	Reviewer	Deputi Bidang Jasa Ilmiah LIPI, Jakarta	2017
21.	The 4th International Young Inventors Awards 2017	Juri	Universitas Mercu Buana Jakarta	2017
22.	1st International Conference on Mineral Processing and Technology (Mineproc'17)	Peserta dan Presenter	Balai Penelitian Teknologi Mineral-LIPI Jakarta	2017

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
23.	International Seminar on Metallurgy and Materials	Steering Committee	Research Centre for Metallurgy and Materials LIPI Serpong	2018
24.	Pemaparan dan Diskusi Pembuatan Material Nikel Sulfat	Pembicara	Balai Besar Bahan dan Barang Teknik Perindustrian Bandung	2019
25.	International Seminar on Metallurgy and Materials	Pembicara Kunci	P2MM LIPI Tangerang Selatan	2019
26.	International Seminar on Advances in Metallurgy and Materials	Peserta dan Presenter	Universitas Trisakti Jakarta	2019

H. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal Ilmiah

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/ Tugas	Tahun
1.	Majalah Metalurgi	LIPI	Editor	1991–sekarang
2.	Majalah Teknologi Indonesia	LIPI	Editor	2007–2013

I. Karya Tulis Ilmiah

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	16
2.	Bersama penulis lainnya	42
	Total	58

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	40
2.	Bahasa Inggris	12
3.	Bahasa Jepang	6
	Total	58

J. Pembinaan Kader Ilmiah

No.	Nama	PT/Universitas/ Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Basso Datu Makahanap (S1)	Institut Teknologi Bandung	Pembimbing Lapangan	1982
2.	Budi Lahardjo (S1)	Universitas Tirtayasa	Pembimbing	1995
3.	Mutia Delina (S2)	Universitas Indonesia	Penguji	2007
4.	Dedi Irawan (S2)	Universitas Indonesia	Pembimbing	2012
5.	Nurhayati Indah (S2)	Universitas Indonesia	Pembimbing	2012
6.	G.N. Anastasia Sahari (S3)	Universitas Indonesia	Penguji	2012
7.	Adji Kawigraha (S3)	Universitas Indonesia	Penguji	2013
8.	Susfa Rafsanjani Yahya (S1)	Universitas Islam Negeri Syarif Hi- dayatullah Jakarta	Pembimbing	2014
9.	Salahudin Yunus (S3)	Universitas Indonesia	Penguji	2015
10.	Kirman (S3)	Universitas Indonesia	Penguji	2015
11.	Iwan Setiawan (S3)	Universitas Indonesia	Pembimbing	2016

No.	Nama	PT/Universitas/ Instansi	Peran/Tugas	Tahun
12.	Ahmad Royani (S2)	Universitas Indonesia	Pembimbing	2016
13.	Eni Febriana (S2)	Universitas Indonesia	Penguji	2016
14.	Lia Andriyah (S2)	Universitas Indonesia	Penguji	2016
15.	Shofi Latifah N.A. & Intan Utami P	LIPI	Mentor	2016
16.	Achmad Shofi (S2)	Universitas Indonesia	Pembimbing	2018
17.	Sulaksana Per- mana (S3)	Universitas Indonesia	Penguji	2018
18.	Ahmad Mak- sum (S3)	Universitas Indonesia	Penguji	2019

K. Organisasi Profesi Ilmiah

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1.	Anggota	Masyarakat Material Indonesia	2001–sekarang
2.	Anggota	Himpenindo	2019–sekarang

L. Tanda Penghargaan

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	Satyalancana Karya Satya X Tahun	Presiden Republik Indonesia	1997
2.	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	Presiden Republik Indonesia	2001
3.	Satyalancana Pembangunan	Presiden Republik Indonesia	2004
4.	Satyalancana Karya Satya XXX Tahun.	Presiden Republik Indonesia	2013



LIPI Press

Gedung PDDI LIPI, Lantai 6
Jln. Jend. Gatot Subroto 10, Jakarta 12710
Telp. (+62 21) 573 3465
E-mail: press@mail.lipi.go.id
Website: lipipress.lipi.go.id



Buku ini tidak diperjualbelikan.