



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



Reaktor Plasma Hidrogen untuk Produksi Logam yang Ramah Lingkungan dan Berkelanjutan

Profesor Zulfiadi Zulhan

**Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
12 Oktober 2024**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**REAKTOR PLASMA HIDROGEN
UNTUK PRODUKSI LOGAM
YANG RAMAH LINGKUNGAN
DAN BERKELANJUTAN**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

REAKTOR PLASMA HIDROGEN UNTUK PRODUKSI LOGAM YANG RAMAH LINGKUNGAN DAN BERKELANJUTAN

Prof. Zulfiadi Zulhan

12 Oktober 2024
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:
***Reaktor Plasma Hidrogen untuk Produksi Logam
yang Ramah Lingkungan dan Berkelanjutan***

Penulis : Prof. Zulfiadi Zulhan

Reviewer : Prof. Eddy Agus Basuki

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-591-0

e-ISBN : 978-623-297-592-7 (PDF)

ITB PRESS

© Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

"In Harmonia Progresio..."

PRAKATA

Alhamdulillah, buku orasi ilmiah ini dapat diselesaikan dan diterbitkan. Saya mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada pimpinan ITB dan jajarannya, Senat Akademik ITB, dan Forum Guru Besar ITB atas dukungan dalam pencapaian jabatan Guru Besar ini.

Buku ini membahas perkembangan teknologi produksi logam yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Produksi logam sudah dimulai sejak 5000 tahun sebelum Masehi di mana arang kayu digunakan sebagai sumber energi dan reagen pereduksi. Sejak revolusi industri pada tahun 1700-an, permintaan besi dan baja mulai meningkat yang menyebabkan arang kayu menjadi langka. Proses produksi besi dan baja kemudian beralih dari arang kayu ke batubara setelah ilmuwan Inggris, Abraham Darby, berhasil memproduksi kokas dari batubara. Saat ini, rata-rata emisi gas CO₂ dari produksi 1 ton baja adalah 1,85 ton yang berkontribusi pada sekitar 10% dari total emisi gas CO₂ yang dihasilkan di dunia dari sektor industri, transportasi, dan energi lainnya. Usaha-usaha telah dan sedang dilakukan dalam mengurangi emisi gas CO₂ di industri besi dan baja di mana salah satu di antaranya yang sedang dikembangkan adalah peleburan reduksi plasma hidrogen (HPSR, *hydrogen plasma smelting reduction*). Penelitian penggunaan reaktor plasma hidrogen skala laboratorium mulai dilakukan di Laboratorium Pirometalurgi, FTTM ITB, sejak tahun 2023. Beberapa hasil penelitian dilaporkan dalam buku ini.

Semoga buku ini bermanfaat bagi pembaca.

Bandung, 12 Oktober 2024

Zulfiadi Zulhan

SINOPSIS

Para ahli seluruh dunia sepakat bahwa pemanasan global dan perubahan iklim diakibatkan salah satunya oleh emisi gas CO₂ dan gas rumah kaca lainnya. Saat ini, industri logam berkontribusi sekitar 10% dari total emisi gas CO₂ di sektor industri, transportasi, dan energi lainnya atau sekitar 26% dari total emisi di sektor industri. Pada Juli 2024, kenaikan temperatur muka bumi yang disinyalir diakibatkan oleh emisi gas rumah kaca ini sudah mencapai 1,58 °C di mana acuannya adalah masa awal revolusi industri tahun 1850. Sementara itu, Konferensi Perubahan Iklim (COP21) 2015 di Paris menyepakati bahwa peningkatan suhu rata-rata global tidak boleh melebihi 2 °C untuk mengurangi dampak perubahan iklim yang jauh lebih parah, termasuk kekeringan, gelombang panas, dan curah hujan besar yang tidak teratur. Oleh karenanya, usaha-usaha untuk menurunkan emisi gas CO₂ ini sangat gencar dilakukan di berbagai sektor.

Usaha untuk menurunkan emisi gas CO₂ sedang dan terus dilakukan di industri logam untuk menyubstitusi penggunaan energi fosil dengan biomassa dan gas hidrogen. Di industri logam, kontribusi emisi gas CO₂ dari industri baja lebih dari 85%. Fokus utama saat ini adalah pengurangan emisi CO₂ di industri besi dan baja. Teknologi tanur tiup (BF, *blast furnace*) merupakan penyumbang emisi tertinggi di industri baja karena lebih dari 60% lelehan besi dihasilkan dengan teknologi ini. Usaha-usaha untuk menurunkan emisi gas CO₂ di tanur tiup sedang dilakukan, misal dengan injeksi gas hidrogen. Selain itu, tanur tiup digantikan dengan kombinasi teknologi reduksi langsung (DR, *direct reduction*) dan tanur listrik (EF, *electric furnace*). Gas hidrogen digunakan sebagai agen pereduksi di teknologi DR yang saat ini menggunakan gas alam atau batubara. Selain teknologi DR, teknologi plasma hidrogen kembali menjadi perhatian para peneliti sejak tahun 2017.

Laboratorium Pirometalurgi, FTTM – ITB, mulai melakukan penelitian penggunaan plasma hidrogen sebagai media peleburan dan reduksi logam oksida dari mineral-mineral yang terkandung di dalam bijih. Dalam bahasa Inggris, teknologi ini disebut dengan *hydrogen plasma smelting reduction* yang disingkat dengan HPSR. Hasil pengujian di Laboratorium Pirometalurgi menunjukkan bahwa bijih besi gigit dapat diproses menjadi logam besi dalam

waktu kurang dari 3 menit dalam reaktor HPSR. Selain bijih besi, bijih nikel laterit dan bijih kromium juga sudah diteliti pada tahun 2024. Logam feronikel dapat dihasilkan dalam waktu 3 menit dari bijih nikel laterit. Logam ferokromium dihasilkan dalam waktu yang lebih lama, yaitu 4 menit karena kromium oksida lebih sulit mengalami penghilangan oksigen di dalamnya dibandingkan dengan besi oksida dan nikel oksida. Logam-logam yang dihasilkan dalam reaktor plasma hidrogen ini pada prinsipnya tidak mengandung karbon. Karbon dalam jumlah yang sangat kecil (kurang dari 50 ppm) dapat masuk ke dalam logam jika menggunakan elektroda grafit. Selain itu, kadar sulfur dan fosfor sudah sangat rendah karena reaktor HPSR juga berfungsi sebagai reaktor pemurnian, selain peleburan dan reduksi. Oleh karenanya, ferokromium yang dihasilkan dalam reaktor HPSR dapat langsung digunakan sebagai bahan baku produksi baja tahan karat (*stainless steel*), tanpa membutuhkan AOD (*argon oxygen decarburization*) konverter dan / atau VOD (*vacuum oxygen decarburization*). Penelitian produksi baja tahan karat austenitik seri 300 dari campuran bijih nikel laterit dan bijih kromium tanpa membutuhkan AOD / VOD juga sudah dilakukan dalam skala laboratorium di ITB.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	VII
SINOPSIS	IX
DAFTAR ISI.....	XI
DAFTAR GAMBAR	XIII
DAFTAR TABEL.....	XVII
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Produksi Material dan Logam serta Emisi Gas CO ₂	1
1.2 Proses Produksi Logam.....	3
1.3 Perkembangan Teknologi Produksi Besi dan Baja.....	5
1.4 Usaha untuk Mengurangi Emisi Gas CO ₂ di Industri Besi Baja	12
2. PELEBURAN REDUKSI DENGAN PLASMA HIDROGEN	17
2.1 Termokimia Reduksi Oksida dengan Plasma Hidrogen	17
2.2 Temperatur Plasma	19
2.3 Penelitian Sebelumnya	20
3. AKTIVITAS PENELITIAN HPSR DI LABORATORIUM PIROMETALURGI ITB.....	25
3.1 Ekstraksi Logam Besi dari Residu Pelindian Bijih Nikel Laterit.....	27
3.2 Produksi Baja dari Bijih Besi Limonit	30
3.3 Produksi Feronikel dari Bijih Nikel Laterit.....	34
3.4 Produksi Ferkromium dari Bijih Kromium.....	41
3.5 Produksi Baja Tahan Karat dari Campuran Bijih Nikel Laterit dan Bijih Kromium	45
4. PENUTUP	51
5. UCAPAN TERIMA KASIH	53
DAFTAR PUSTAKA.....	57
CURRICULUM VITAE.....	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Material dan logam yang dihasilkan di dunia pada tahun 2022 (diolah dari USGS, Worldsteel, Statistita).....	1
Gambar 1.2	Persentase emisi GRK dari tiap-tiap sektor (Ritchi, 2020).....	2
Gambar 1.3	Peningkatan temperatur muka bumi dari 1850 hingga Juli 2024 (berkeleyearth.org).	3
Gambar 1.4	Dari bijih dan skrap menjadi logam.	4
Gambar 1.5	Tahapan proses produksi logam.	4
Gambar 1.6	Produksi baja dan perkembangan teknologi dari tahun 1900 hingga 2020 (diolah dan dilengkapi dari Worldsteel, Jahrbuch Stahl).	7
Gambar 1.7	Dinamika produksi baja bergantung pada situasi politik dan ekonomi dunia (diolah dari Worldsteel, Jahrbuch Stahl).	8
Gambar 1.8	Data jumlah produksi besi (kiri) dan baja (kanan) serta teknologi yang digunakan (diolah dari Worldsteel).	9
Gambar 1.9	Jalur proses dan teknologi produksi besi dan baja (diolah dari SMS Group).....	10
Gambar 1.10	Jalur proses produksi besi dan baja dari bahan baku pasir besi di New Zealand Steel (www.nzsteel.co.nz).	10
Gambar 1.11	Pabrik-pabrik di dunia yang menggunakan pasir besi atau titanomagnetit sebagai bahan baku produksi besi dan baja (Vermeulen, 2009).....	11
Gambar 1.12	Logam besi dalam bentuk butiran granul yang keluar di permukaan pelet campuran konsentrat pasir besi dan batubara.	12
Gambar 1.13	Perkiraan emisi gas CO ₂ dari jalur proses BF-BOF-CCM-HRM.....	13
Gambar 1.14	Perkiraan emisi gas CO ₂ dari jalur proses DR-EAF-CCM-HRM, gas alam sebagai reduktor dan sumber energi di DR, energi listrik berasal dari EBT.	13
Gambar 1.15	Perkiraan emisi gas CO ₂ dari jalur proses EAF-CCM-HRM, energi listrik berasal dari EBT.	13

Gambar 1.16	Perkiraan emisi gas CO ₂ dari jalur proses DR-EAF-CCM-HRM, energi listrik berasal dari EBT, hidrogen sebagai reduktor dan bahan bakar.	14
Gambar 1.17	Pengembangan teknologi HPSR (<i>hydrogen plasma smelting reduction</i>) pada proyek SuSteel oleh K1-MET GmbH di Austria (Zarl, 2023).....	16
Gambar 2.1	Kesetimbangan gas hidrogen sebagai fungsi dari temperatur (dihitung dengan FactSage 8.2).	17
Gambar 2.2	Diagram Ellingham mempertimbangkan unsur H monoatomik dan ion H ⁺ dalam keadaan plasma (diolah dari Coudurier dkk., 1978; Dembovsky, 1987; Hibler dan Plaul, 2004)	18
Gambar 2.3	Perubahan fasa Fe ₂ O ₃ sebagai fungsi temperatur (dihitung dengan FactSage 8.2).....	19
Gambar 2.4	Zona-zona pada peleburan dengan plasma dan perkiraan temperatur (Barcza dkk. 1990; Hibler dan Plaul, 2004).	20
Gambar 2.5	Peralatan percobaan plasma hidrogen (Kamiya, 1984).....	21
Gambar 2.6	Jalur proses produksi baja konvensional dan penggunaan tanur plasma (Tsvetkov, 1999)	22
Gambar 2.7	Percobaan peleburan reduksi plasma hidrogen di Montanuniversitaet Leoben (Seftejani, 2020).	23
Gambar 2.8	Pembentukan logam besi dari bijih besi hematit sebagai fungsi waktu dalam reaktor plasma hidrogen (diolah dari Souza Filho dkk, 2021).	24
Gambar 3.1	a.Percobaan pendahuluan di bengkel, b. Bijih nikel laterit sebelum dilebur dalam reaktor plasma hidrogen, c. Hasil peleburan dalam waktu kurang dari 5 menit.	25
Gambar 3.2	Skematik alat HPSR a. Reaktor, b. Inverter untuk menghasilkan plasma, c. Sistem pendingin, d. Burner untuk membakar sisa gas hidrogen (Islam, 2024).	26
Gambar 3.3	Partisipasi dalam International Symposium on Hydrogen Metallurgy, Changsha, China, 4 – 6 September 2024.	27
Gambar 3.4	Diagram alir proses pelindian bijih nikel laterit dan potensi pemanfaatan <i>tailing</i> (Zulhan, 2020).	28

Gambar 3.5	Hasil peleburan yang dicetak dalam resin (kiri), foto SEM dengan 1500 kali pembesaran (tengah), dan pemetaan unsur sulfur dengan EDS (kanan) (Zulhan dkk., 2024a).	29
Gambar 3.6	Perubahan komposisi kimia logam pada saat diproses dalam reaktor HPSR (Zulhan dkk., 2024a).	30
Gambar 3.7	Peleburan bijih besi gutit dalam reaktor HPSR selama 60 detik (Hakim, 2024).	32
Gambar 3.8	Peleburan bijih besi gutit dalam reaktor HPSR selama 120 detik (Hakim 2024).	32
Gambar 3.9	Produksi feronikel dengan teknologi <i>rotary kiln – electric furnace</i>	35
Gambar 3.10	Reaksi bijih nikel laterit dengan gas hidrogen sebagai fungsi temperatur (Islam, 2024).	37
Gambar 3.11	Bijih nikel laterit sebelum dan sesudah proses peleburan dalam reaktor plasma hidrogen (Islam, 2024).	37
Gambar 3.12	Bijih nikel laterit sesudah proses peleburan dalam reaktor plasma hidrogen, tanpa kalsinasi (kiri), dengan kalsinasi (kanan) (Islam, 2024).	38
Gambar 3.13	Jalur proses produksi feronikel menggunakan reaktor plasma hidrogen/HPSR (Islam, 2024).	38
Gambar 3.14	Pemetaan unsur oksigen, besi dan nikel dalam logam dan terak, atas: 30 detik, bawah: 60 detik (Islam, 2024).	39
Gambar 3.15	Perubahan komposisi kimia logam feronikel seiring dengan peningkatan durasi proses peleburan dalam HPSR (Islam, 2024).	40
Gambar 3.16	Perubahan komposisi kimia oksida seiring dengan peningkatan durasi proses peleburan dalam HPSR (Islam, 2024).	40
Gambar 3.17	Perkiraan persen ekstraksi nikel dan besi (Islam, 2024).	41
Gambar 3.18	Pemetaan unsur oksigen, kromium dan besi dalam ferokromium dan oksida produk HPSR (Dale, 2024).	43
Gambar 3.19	Perubahan komposisi kimia logam ferokromium seiring dengan peningkatan durasi proses peleburan dalam HPSR (Dale, 2024).	44

Gambar 3.20	Perubahan komposisi kimia oksida pada produksi ferokromium dalam HPSR (Dale, 2024).	44
Gambar 3.21	Perkiraan persen ekstraksi kromium dan besi (Dale, 2024).....	45
Gambar 3.22	Produksi baja tahan karat dari 2009-2020 (diolah dari www.worldstainless.org).	46
Gambar 3.23	Jalur proses produksi baja tahan karat yang tidak terintegrasi dengan pabrik peleburan nikel.	47
Gambar 3.24	Jalur proses produksi baja tahan karat yang terintegrasi dengan pabrik peleburan nikel.	47
Gambar 3.25	Perubahan komposisi kimia logam dalam campuran bijih kromium dan bijih nikel selama 180 detik dalam HPSR (Taimullah, 2024).	48
Gambar 3.26	Perubahan komposisi kimia oksida (terak) dalam campuran bijih kromium dan bijih nikel selama 180 detik dalam HPSR (Taimullah, 2024).	49

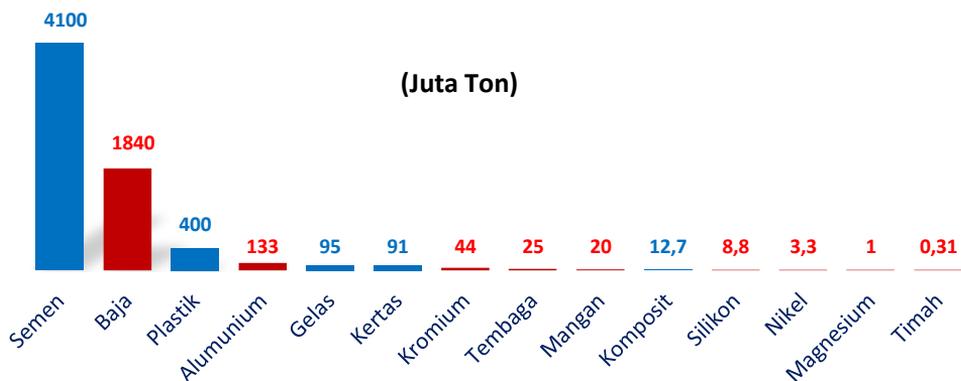
DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Dekarbonisasi produksi besi dan baja (Draxler, 2021).	15
Tabel 3.1	Komposisi kimia residu pelindian nikel skala pilot dalam persen berat (Zulhan dkk., 2024a)	28
Tabel 3.2	Komposisi kimia bijih besi gutit dalam persen berat (Hakim, 2024a).....	31
Tabel 3.3	Komposisi kimia bijih nikel laterit tipe saprolit dalam persen berat (Islam, 2024).	37
Tabel 3.4	Komposisi kimia bijih kromium dalam persen berat (Dale, 2024)	42
Tabel 3.5	Komposisi kimia beberapa tipe baja tahan karat (Stahlschluessel, 2007).	46

1. PENDAHULUAN

1.1 Produksi Material dan Logam serta Emisi Gas CO₂

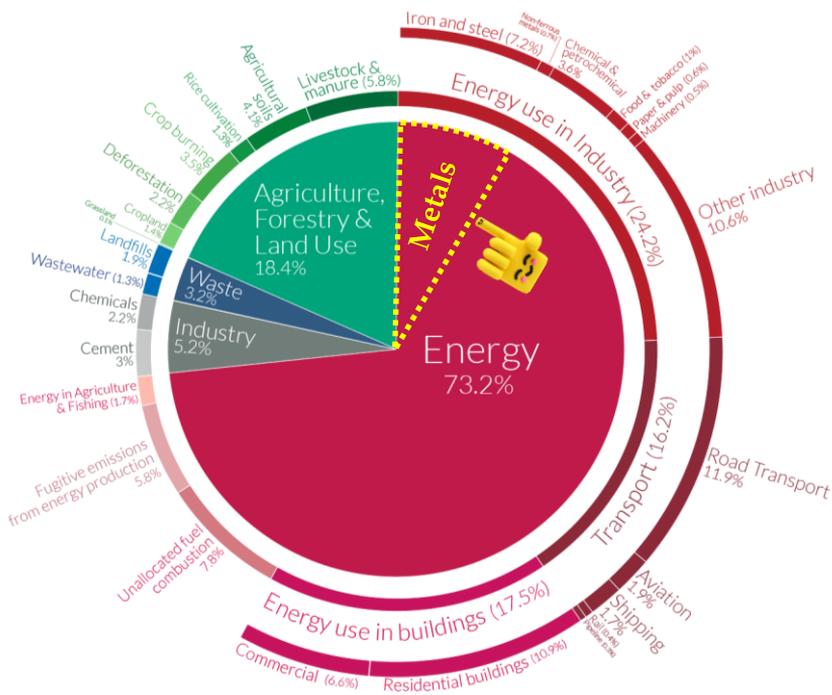
Kebutuhan material dan logam untuk kebutuhan sehari-hari di dunia berdasarkan data pada tahun 2022 diperlihatkan pada Gambar 1.1. Semen merupakan material yang paling banyak diproduksi, yaitu 4,1 miliar ton yang dibutuhkan untuk pembangunan rumah, apartemen, gedung, jalan, jembatan, pelabuhan, bandar udara, dan lain-lain. Semen pada penggunaannya membutuhkan baja di mana lebih dari 50% baja yang dihasilkan digunakan untuk kebutuhan konstruksi. Produksi baja pada tahun 2022 sudah melebihi 1,8 miliar ton. Material berikutnya yang diproduksi adalah plastik. Dikarenakan berat jenis plastik sekitar 1 dibandingkan dengan baja sekitar 7,8 maka plastik sangat sering dijumpai dalam kehidupan sehari-hari di mana volume plastik yang dihasilkan sekitar 1,7 kali lebih banyak dibandingkan dengan baja. Logam berikutnya yang banyak dihasilkan adalah aluminium diikuti oleh material gelas, material kertas, logam kromium, logam tembaga, dan seterusnya.



Gambar 1.1 Material dan logam yang dihasilkan di dunia pada tahun 2022 (diolah dari USGS, Worldsteel, Statistita).

Pada proses produksi material dan logam tersebut, gas CO₂ yang dihasilkan berdampak pada pemanasan global dan perubahan iklim. Detail persentase emisi gas CO₂ untuk tiap-tiap sektor diperlihatkan pada Gambar 1.2 di mana industri logam berkontribusi sebesar 7,9% dengan rincian 7,2% berasal dari industri besi baja dan 0,7% berasal dari industri logam lainnya. Jika hanya mempertimbangkan sektor industri, sektor transportasi, dan

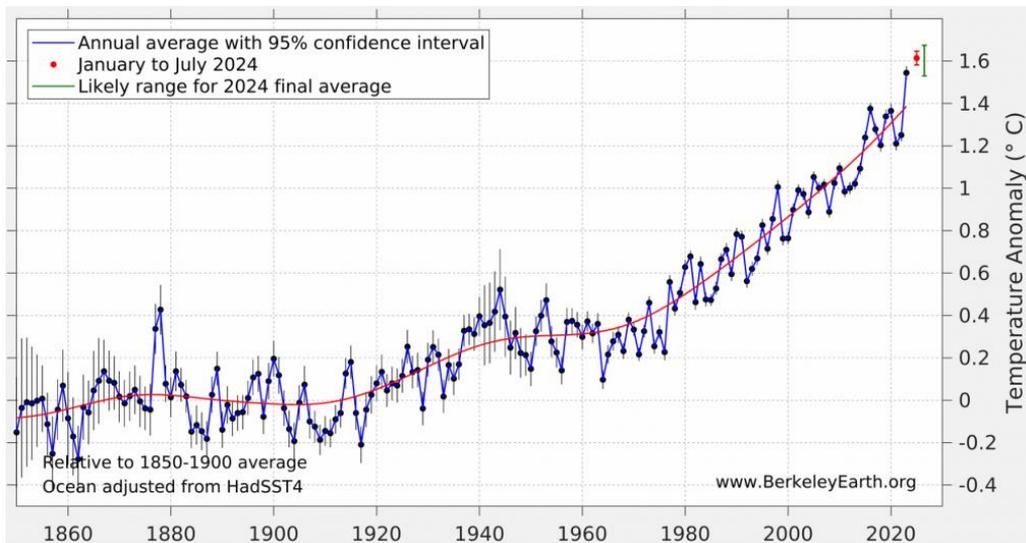
sektor energi lainnya, kontribusi industri logam sekitar 10%. Untuk sektor industri sendiri, kontribusi industri logam sekitar 26%. Pada sektor industri logam, kontribusi gas CO₂ dari industri besi dan baja lebih dari 85% karena produksi besi dan baja lebih dominan dibandingkan dengan produksi logam-logam lainnya.



OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world’s largest problems.
 Source: Climate Watch, the World Resources Institute (2020). Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie (2020).

Gambar 1.2 Persentase emisi GRK dari tiap-tiap sektor (Ritchi, 2020).

Konferensi Perubahan Iklim PBB (COP21) di Paris tahun 2015 telah menyepakati untuk menjaga peningkatan suhu rata-rata global jauh di bawah 2 °C di mana acuannya adalah tahun 1800-1850 pada saat awal revolusi industri. Dalam beberapa tahun terakhir, para pemimpin dunia telah menekankan pentingnya membatasi pemanasan global tidak melebihi 1,5 °C pada abad 21 ini untuk mengurangi risiko dampak perubahan iklim yang jauh lebih parah termasuk kekeringan yang lebih sering, gelombang panas, dan curah hujan besar yang tidak teratur (United Nations Climate Change). Data pada Gambar 1.3 menunjukkan bahwa faktanya kenaikan temperatur rata-rata muka bumi sudah melebihi 1,5 °C pada bulan Juli tahun 2024. Oleh karenanya, usaha-usaha mengurangi emisi gas CO₂ pada tiap-tiap sektor perlu dilakukan.



Gambar 1.3 Peningkatan temperatur muka bumi dari 1850 hingga Juli 2024 (berkeleyearth.org).

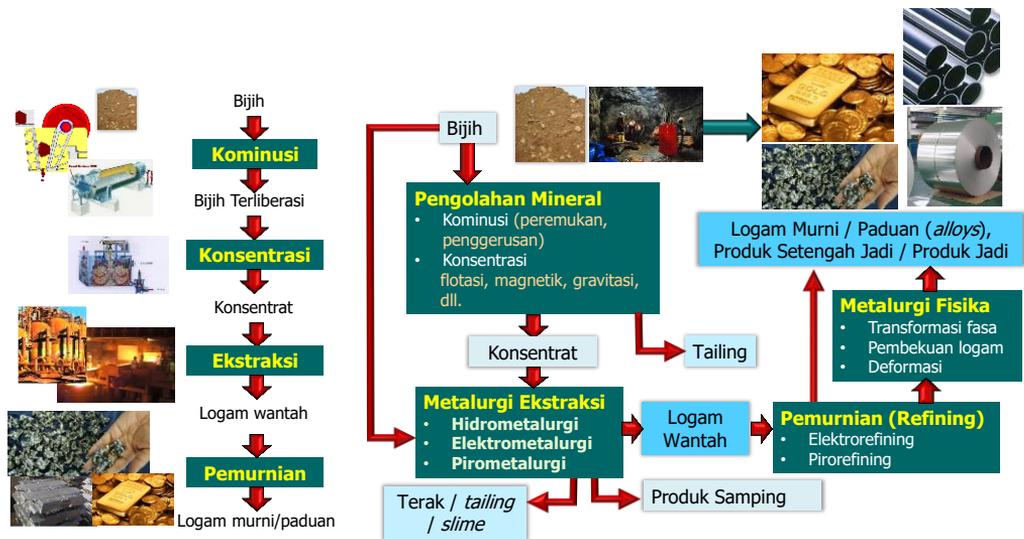
1.2 Proses Produksi Logam

Bahan baku produksi logam dapat berasal dari alam berupa bijih yang ditambang atau berupa skrap (logam bekas) yang didaur ulang. Proses produksi logam ini membutuhkan keahlian lintas disiplin, dimulai dengan teknik metalurgi, teknik mesin, teknik elektro, instrumentasi dan kendali, teknik sipil, teknik kimia, kimia, teknik lingkungan, dan lainnya seperti ditunjukkan pada Gambar 1.4. Tahapan proses dari bijih menjadi logam ditampilkan pada Gambar 1.5. Bijih dari alam dapat dilakukan proses konsentrasi untuk meningkatkan kadar logam menghasilkan konsentrat, misal kadar tembaga di alam sekitar 0,5% ditingkatkan menjadi 20-30% dalam konsentrat. Untuk bijih yang belum memungkinkan dilakukan proses konsentrasi, misal bijih nikel laterit, atau kadar logam berharga sudah tinggi, misal bijih besi hematit dengan kadar besi sudah lebih dari 62%, bijih tersebut dapat langsung dikirimkan ke pabrik metalurgi yang diproses melalui jalur hidrometalurgi (proses metalurgi temperatur rendah, $T < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ menggunakan air sebagai media) atau pirometalurgi (proses metalurgi temperatur tinggi, $T > 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) atau elektrometalurgi misal pada proses produksi logam aluminium dengan teknologi *Hall-Heroult*. Selain menghasilkan produk antara baik berupa logam maupun senyawa logam, proses tersebut menghasilkan produk samping berupa terak (*slag*), *tailing*,

maupun *slime* yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk industri berikutnya.



Gambar 1.4 Dari bijih dan skrap menjadi logam.



Gambar 1.5 Tahapan proses produksi logam.

Penelitian-penelitian untuk mengekstraksi kembali logam berharga dalam terak atau *tailing* telah dilakukan di laboratorium pirometalurgi ITB sejak tahun 2017. Terak peleburan nikel dapat digunakan sebagai bahan baku produksi logam magnesium (Zulhan dan Agustina, 2021a; Levina, 2021). Besi dapat diekstraksi dari terak peleburan tembaga dan sebagai bahan baku

produksi feromangansilikon jika dicampurkan dengan bijih mangan (Zulhan dkk., 2020). Besi pada residu bauksit (*red mud*) dari proses produksi alumina dapat diekstraksi sebagai bahan baku produksi baja (Zamzammi, 2018; Grahita dkk., 2022). Besi dapat diekstraksi dari residu pelindian (*tailing*) bijih nikel laterit dengan asam sulfat dan gas sulfur dioksida digunakan sebagai bahan baku produksi asam sulfat yang kemudian dikembalikan pada proses pelindian (Zulhan dkk., 2022a; Saputri, 2023; Zulhan dkk., 2024a). Konsep ini menjadikan *waste to resources* untuk industri berikutnya yang mempunyai keuntungan sebagai berikut:

- tidak memerlukan penambangan sumber-sumber logam tersebut sebagai konservasi sumber daya alam,
- tidak ada aktivitas penambangan yang berdampak positif pada tidak adanya deforestasi dan tidak ada emisi CO₂ dari aktivitas tersebut, dan
- tidak membutuhkan lahan yang luas untuk penempatan residu tersebut (terak, *tailing*, dan *slime*).

Selain pemanfaatan terak dan residu pelindian sebagai bahan baku untuk industri lain, sampah rumah tangga (*municipal solid waste*) juga sudah diteliti sebagai alternatif reduktor pengganti batubara (Zulhan dkk., 2024b). Dengan demikian, ketergantungan pada energi fosil dapat dikurangi, permasalahan sampah dapat diatasi, dan ekonomi sirkular dapat diwujudkan.

1.3 Perkembangan Teknologi Produksi Besi dan Baja

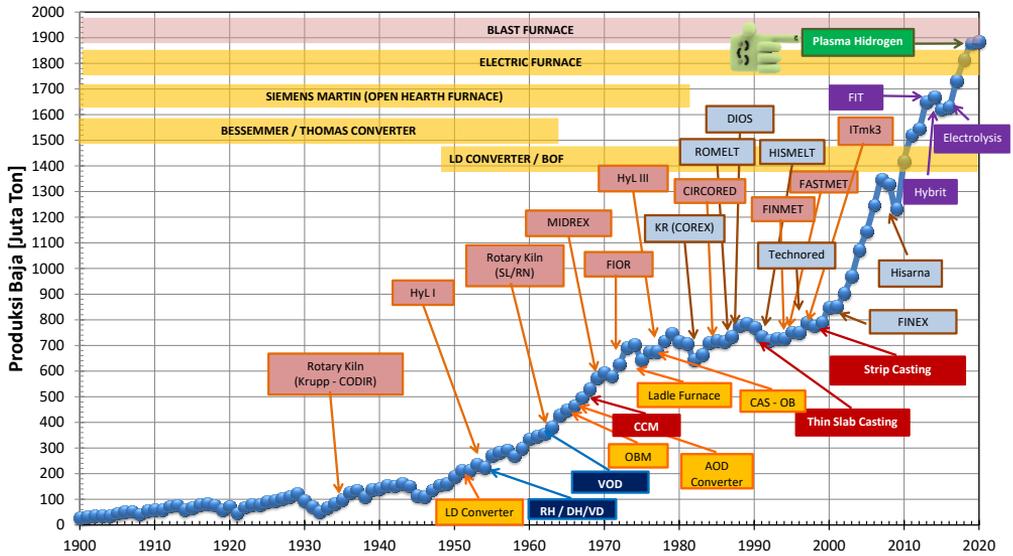
Besi yang digunakan oleh manusia pada awalnya berasal dari meteor di mana buktinya telah didapatkan pada piramida di Mesir dengan kandungan nikel 5-26% atau yang sering disebut dengan “*metal from heaven*” (Rickard, 1941). Peleburan besi pertama di dunia yang tercatat ditemukan pada dinding makam di Mesir yang diperkirakan berasal sekitar tahun 3000 sebelum Masehi (Wakelin dan Ricketts, 1999). Pada peleburan tersebut, bijih besi dan bahan bakar yang belum diketahui jenisnya direaksikan dengan udara yang diembuskan melalui *bellow* yang dioperasikan dengan kaki. Teknologi pembuatan besi ini terus berkembang hingga menjadi cikal bakal tanur tiup (BF, *blast furnace*) modern. Hingga tahun 1700-an Masehi, arang kayu telah digunakan sebagai sumber energi dan agen pereduksi besi oksida menjadi besi logam. Dikarenakan permintaan besi terus meningkat dan kelangkaan arang kayu sebagai sumber energi dan agen pereduksi, pada tahun 1708,

ilmuwan Inggris Abraham Darby berhasil mengoperasikan tanur tiup menggunakan kokas yang berasal dari batubara yang merupakan awal dari revolusi industri (Wakelin dan Ricketts, 1999). Sejak revolusi industri tersebut, kokas secara bertahap menggantikan arang kayu. Namun, besi yang dihasilkan dari tanur tiup masih belum dapat digunakan karena kandungan karbonnya yang tinggi (sekitar 4,5%) yang membuatnya getas.

Untuk menghasilkan logam yang ulet, kadar karbon dalam besi tersebut harus dikurangi hingga lebih kecil dari 2%, yang dikenal dengan baja. Dalam usaha produksi baja ini, teknik yang pertama digunakan dalam skala industri adalah *puddling* yang diperkenalkan oleh Peter Onion pada tahun 1783 dan Henry Cort pada tahun 1784 di Inggris (Flemings dan Ragone, 2009). Kadar karbon dalam besi yang dihasilkan dari teknik *puddling* ini sudah lebih rendah dari 2% yang sering dikenal dengan *puddle iron* digunakan salah satunya untuk membangun menara Eiffel di Prancis tahun 1889 (toureiffel.paris). Proses yang berlangsung dalam tanur *reverberatory* yang digunakan pada teknik *puddling* sangat lama yang kemudian disempurnakan oleh Carl Wilhelm Siemens (ilmuwan Jerman) pada tahun 1857 dan Pierre-Emile Martin (insinyur Prancis) pada tahun 1868 menjadi *open hearth furnace* menggunakan besi wantah (*pig iron*) dan skrap baja sebagai bahan baku (Fruehan, 1998). Henry Bessemer pada tahun 1855 mematenkan proses pemurnian baja dengan mengembuskan udara langsung ke dalam lelehan besi wantah dari tanur tiup menggunakan konverter (Wilder, 1949). Proses konverter Bessemer kemudian disempurnakan oleh Thomas pada tahun 1879. Sejak oksigen berhasil dipisahkan dari udara oleh Linde pada tahun 1930-an, ide penggunaan oksigen untuk pemurnian lelehan besi wantah mulai muncul dan berhasil dilakukan di Linz dan di Donawitz, Austria, pada tahun 1952 yang dikenal dengan LD konverter atau BOF (*basic oxygen furnace*) secara umum.

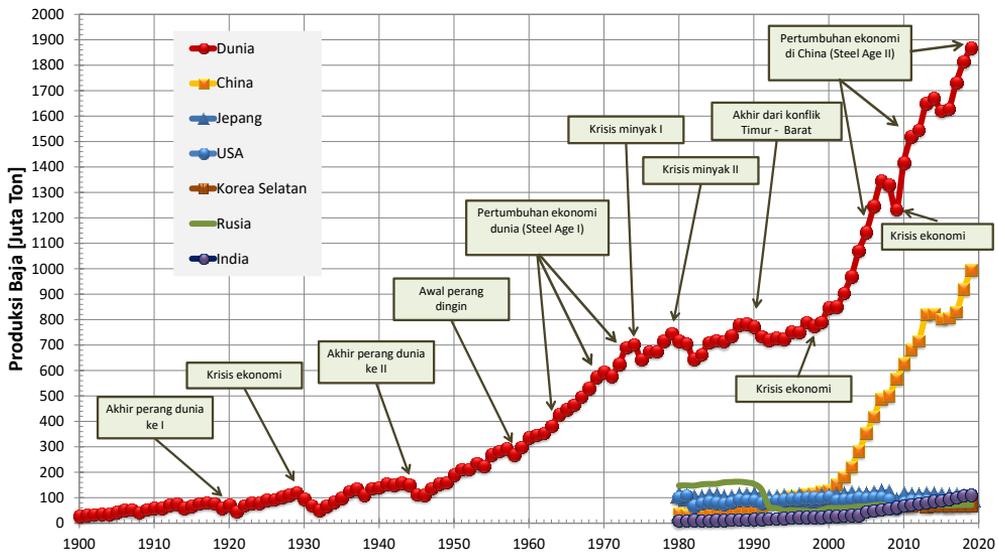
Daur ulang skrap baja dalam tanur *open hearth* (tanur Siemens Martin) membutuhkan waktu lebih dari 10 jam. Pada tahun 1878, Carl Wilhelm Siemens mematenkan proses peleburan skrap baja menggunakan tanur busur listrik (EAF, *electric arc furnace*) arus searah (DC, *direct current*) (English patents, 1879). Tanur listrik ini berkembang dengan pesat hingga saat ini baik menggunakan tanur arus searah maupun arus bolak balik (AC, *alternatic current*) (Jones, 2014). Selain itu, muncul teknologi-teknologi lain untuk menyempurnakan rangkaian produksi besi dan baja seperti ditunjukkan pada

Gambar 1.6 seiring dengan peningkatan produksi baja kurang dari 50 juta ton pada tahun 1900 menjadi 1,9 miliar ton pada tahun 2020.



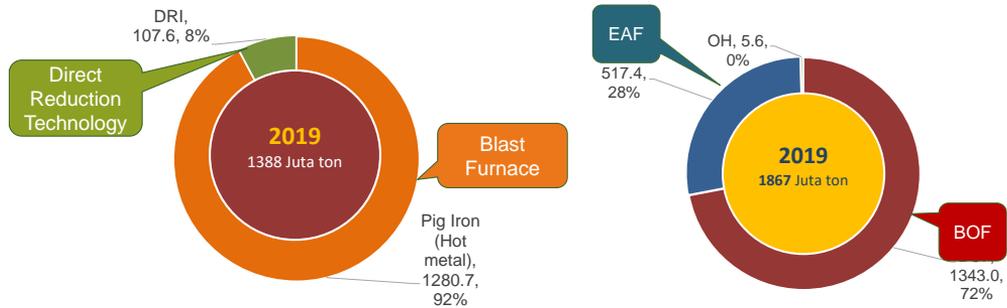
Gambar 1.6 Produksi baja dan perkembangan teknologi dari tahun 1900 hingga 2020 (diolah dan dilengkapi dari Worldsteel, Jahrbuch Stahl).

Jumlah produksi baja sangat dinamik (Gambar 1.7) bergantung pada situasi politik dan ekonomi dunia. Kebutuhan baja meningkat pada saat perang dunia pertama dan kedua karena baja dibutuhkan untuk peralatan perang seperti tank, kapal laut, kapal selam, senapan, dan kebutuhan lainnya. Produksi baja langsung menurun setelah perang dunia tersebut termasuk saat konflik blok timur (Pakta Warsawa dipimpin oleh Unisovyet) dan blok barat (NATO) berakhir. Situasi ekonomi dunia juga sangat memengaruhi produksi baja. Saat ekonomi dunia membaik, kebutuhan baja meningkat karena permintaan peralatan transportasi (motor, mobil, kereta, dan kapal) meningkat, kebutuhan perumahan dan gedung meningkat, permintaan minyak meningkat yang menyebabkan konsumsi pipa-pipa untuk operasi minyak dan gas meningkat.



Gambar 1.7 Dinamika produksi baja bergantung pada situasi politik dan ekonomi dunia (diolah dari Worldsteel, Jahrbuch Stahl).

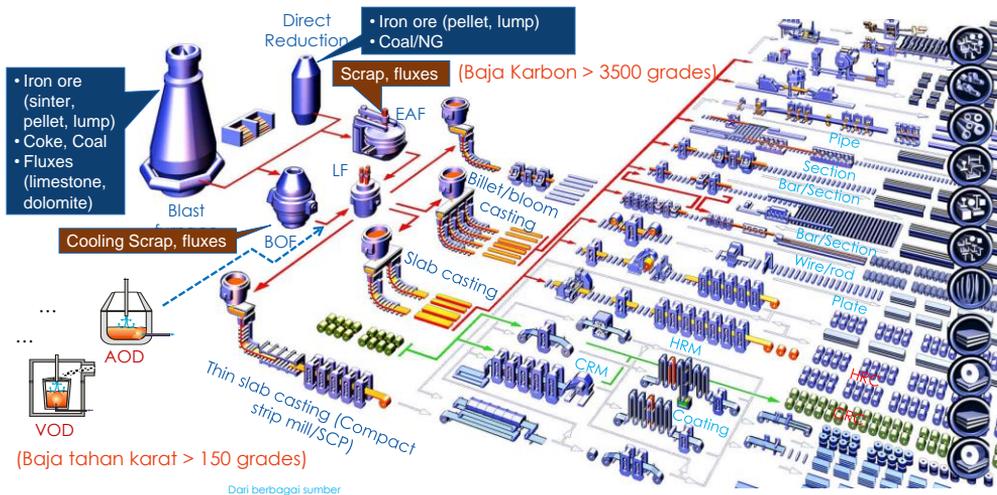
Proses alternatif produksi besi selain tanur tiup mulai dikembangkan pada tahun 1930-an, yaitu teknologi reduksi langsung (DR, *direct reduction*) seperti *rotary kiln*, HyL, Midrex, FIOR, Circored, Finmet, dan Fastmet (Gambar 1.6). Teknologi reduksi langsung ini menghasilkan besi spon (*sponge iron*) atau DRI (*direct reduced iron*) yang kemudian dilebur dalam EAF. Teknologi reduksi langsung saat ini didominasi oleh Midrex, HyL (Energiron), dan *rotary kiln*. Proses peleburan reduksi (*smelting reduction*) juga bermunculan untuk menyubstitusi tanur tiup seperti Corex, Romelt, Dios, Hismelt, Technored, Finex, dan Hisarna. Dari teknologi tersebut, hanya Corex yang kemudian disempurnakan menjadi Finex yang berhasil hingga tahap komersialisasi dalam skala industri menghasilkan lelehan besi wantah, sering dikenal dengan *hot metal* yang mirip dengan tanur tiup. Lelehan besi wantah kemudian diproses lebih lanjut dalam BOF, sama seperti jalur produksi baja dengan tanur tiup. Data produksi besi dan baja serta teknologi diperlihatkan pada Gambar 1.8.



Gambar 1.8 Data jumlah produksi besi (kiri) dan baja (kanan) serta teknologi yang digunakan (diolah dari Worldsteel).

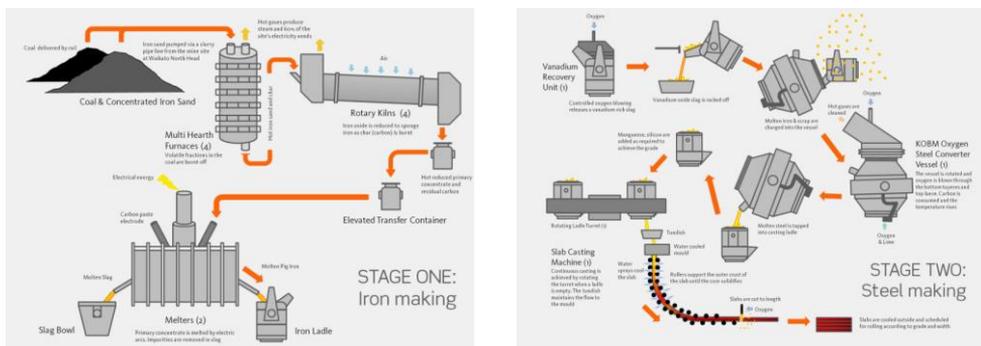
Teknologi pemurnian baja juga telah dikembangkan mulai dari teknologi vakum pada tahun 1950-an, yaitu RH (*Ruhrstahl-Heraeus*) dan VTD (*vacuum tank degasser*). Teknologi *ladle furnace* (LF) dan CAS OB (*composition adjustment by sealed argon bubbling – oxygen blowing*) dikembangkan tahun 1970-an untuk memudahkan mengendalikan temperatur lelehan baja, menambahkan unsur paduan, dan memurnikan lelehan baja, seperti desulfurisasi termasuk mengontrol inklusi dalam baja. Teknologi pengecoran juga telah dikembangkan pada tahun 1960-an akhir mulai dari pengecoran kontinu (CCM, *continuous casting machine*) untuk menggantikan pengecoran dalam bentuk ingot. Setelah itu, pengecoran kontinu slab tipis (*thin slab casting*) dan pengecoran kontinu strip (*strip casting*) juga dikenalkan.

Jalur produksi besi dan baja secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 1.9. Tipe baja karbon yang dihasilkan saat ini lebih dari 3000 untuk berbagai kebutuhan mulai dari baja tulangan (umum dikenal dengan besi beton), baja untuk pemesinan termasuk industri otomotif, baja silikon untuk trafo dan motor listrik (*electrical steel / silicon steel*), baja perkakas (*tool steel*), baja pegas (*spring steel*), baja laher (*bearing steel*), baja rel, baja tahan peluru (*armour steel*), baja untuk kapal (*ship building steel*), baja untuk ban mobil (*tyre cord steel*), dan lain sebagainya. Selain itu, lebih dari 150 tipe baja tahan karat (*stainless steel*) diproduksi dengan teknologi AOD (*argon oxygen decarburization*) dan / atau VOD (*vacuum oxygen decarburization*).



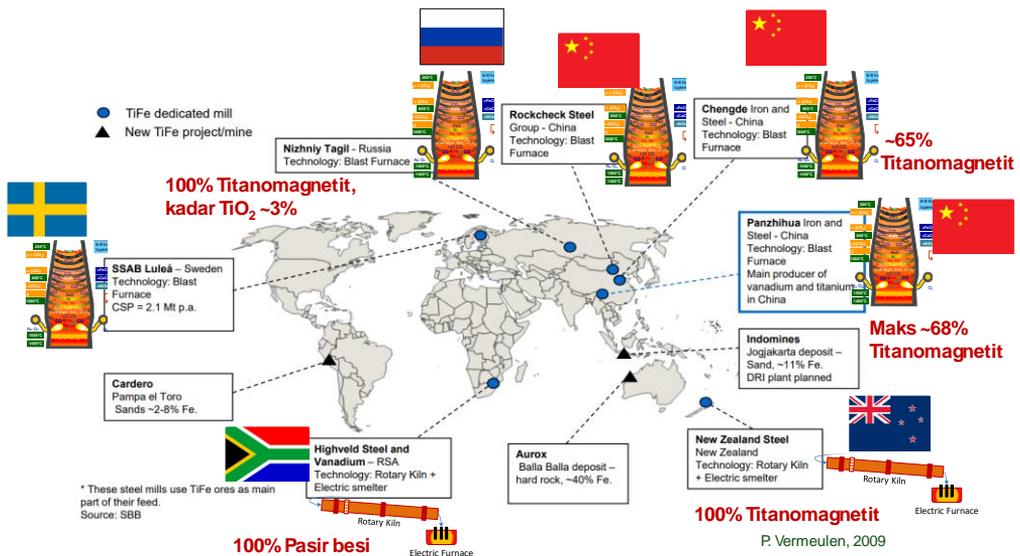
Gambar 1.9 Jalur proses dan teknologi produksi besi dan baja (diolah dari SMS Group).

Jalur produksi besi dan baja di atas menggunakan bahan baku bijih besi primer berupa hematit dan magnetit. Untuk peleburan pasir besi atau titanomagnetit, teknologi RKEF (*rotary kiln – electric furnace*) merupakan satu-satunya teknologi yang teruji saat ini di skala industri yang telah dioperasikan oleh New Zealand Steel di Selandia Baru dan Evraz Highveld Steel & Vanadium di Afrika Selatan (Ure, 2000; Steinberg dkk., 2011). Gambar 1.10. memperlihatkan proses produksi baja di New Zealand Steel. Selain menghasilkan baja, pada tahap pembuatan besi dihasilkan terak dengan kadar TiO_2 sekitar 35% dan pada tahap pembuatan baja dihasilkan terak kaya titanium (*V-slag*) untuk ekstraksi logam vanadium.



Gambar 1.10 Jalur proses produksi besi dan baja dari bahan baku pasir besi di New Zealand Steel (www.nzsteel.co.nz).

Jumlah sumberdaya dan cadangan pasir besi Indonesia pada tahun 2023 adalah 295 juta ton (terukur) dan 136 juta ton (terbukti), secara berurutan (Badan Geologi, 2023). Hingga tahun 2024, hanya sebagian kecil dari konsentrat pasir besi digunakan sebagai bahan baku industri baja melalui pencampuran dengan bijih besi primer yang kemudian diumpankan ke dalam tanur tiup. Sebagai referensi, Gambar 1.11 memperlihatkan lokasi pabrik di dunia yang menggunakan pasir besi atau titanomagnetit sebagai bahan baku. Teknologi RKEF dapat menggunakan 100% bahan baku berasal dari pasir besi atau titanomagnetit, sementara teknologi tanur tiup mencampur pasir besi atau titanomagnetit dengan bijih primer, bergantung pada kadar TiO_2 dalam pasir besi atau titanomagnetit.



Gambar 1.11 Pabrik-pabrik di dunia yang menggunakan pasir besi atau titanomagnetit sebagai bahan baku produksi besi dan baja (Vermeulen, 2009).

Serangkaian penelitian telah dilakukan di Laboratorium Pirometalurgi, FTTM – ITB, sejak tahun 2014 untuk memanfaatkan pasir besi sebagai bahan baku di industri besi dan baja. Pada pencampuran pasir besi dengan batubara dan diproses pada temperatur tetap (isothermal), didapatkan bahwa temperatur minimum untuk menghasilkan logam besi dari pasir besi dengan derajat metalisasi lebih besar dari 90% adalah 1100 °C (Zulhan dkk., 2021b). Metode pemisahan besi dan titanium dengan mengombinasikan proses isothermal dan non isothermal (isothermal – gradien temperatur) didapatkan bahwa besi dapat terpisah dari titanium jika pelet konsentrat pasir besi dipanaskan dari 1000 hingga 1380 °C dengan pola temperatur tertentu (Zulhan

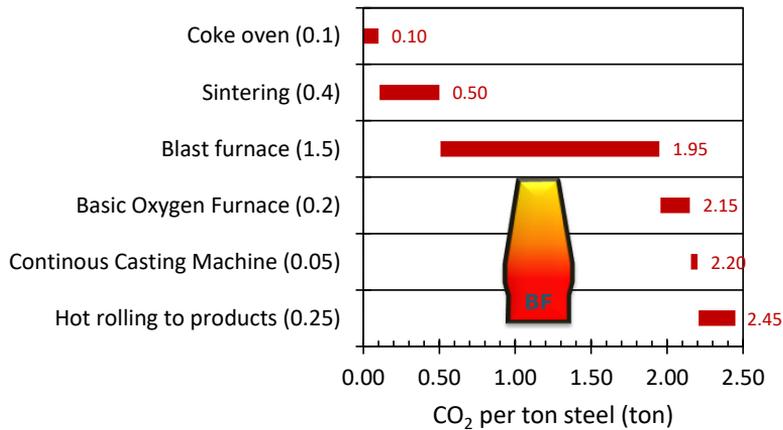
dkk., 2022b). Besi logam dalam bentuk butiran granul (*nugget*) dapat dipisahkan dari oksida lainnya dengan mencampurkan pasir besi dengan batubara dan dipanaskan dengan kombinasi isothermal – gradien temperatur dengan pola tertentu (Zulhan dkk., 2021c; Zulhan dkk., 2022c; Zulhan dkk., 2022d). Salah satu hasil percobaan pada penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 1.12. Teknologi untuk memisahkan logam besi dari konsentrat pasir besi dalam bentuk granul belum ada hingga saat ini dan perlu dikembangkan mulai dari skala pilot.



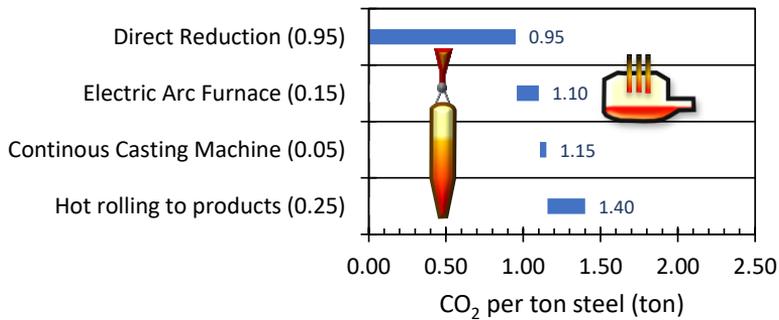
Gambar 1.12 Logam besi dalam bentuk butiran granul yang keluar di permukaan pelet campuran konsentrat pasir besi dan batubara.

1.4 Usaha untuk Mengurangi Emisi Gas CO₂ di Industri Besi Baja

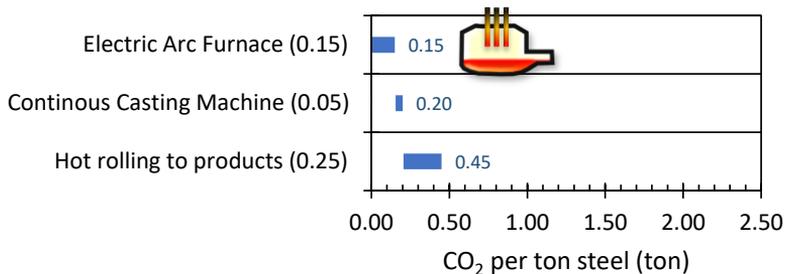
Produksi besi dan baja dengan jalur proses tanur tiup – konverter (BF-BOF), pengecoran kontinu (CCM) hingga produk baja canai panas (HRC, *hot rolled coil*) menggunakan HRM (*hot rolling mill*), menghasilkan emisi gas CO₂ sekitar 2,45 ton per ton baja (Gambar 1.13). Jalur proses teknologi reduksi langsung menggunakan gas alam sebagai reduktor dan tanur listrik untuk peleburan (DR-EAF) hingga HRC adalah sekitar 1,40 ton per ton baja (Gambar 1.14). Energi listrik untuk operasi EAF berasal dari EBT (energi baru terbarukan). Dalam usaha untuk mengurangi emisi gas CO₂, bahan baku produksi baja berasal dari skrap baja (baja bekas) untuk didaur ulang dan energi listrik berasal dari EBT, emisi gas CO₂ dari pabrik baja jalur proses EAF turun menjadi 0,45 ton/ton baja (Gambar 1.15).



Gambar 1.13 Perkiraan emisi gas CO₂ dari jalur proses BF-BOF-CCM-HRM.



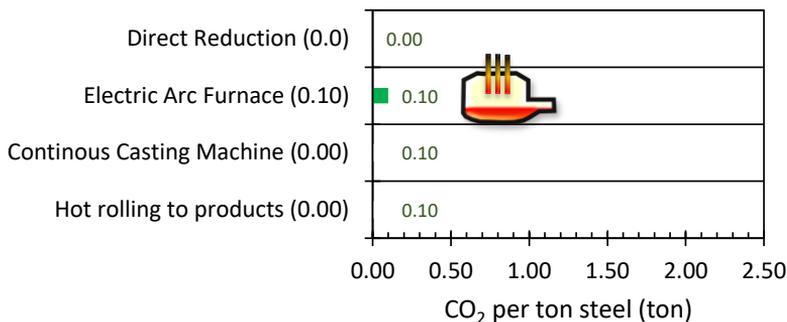
Gambar 1.14 Perkiraan emisi gas CO₂ dari jalur proses DR-EAF-CCM-HRM, gas alam sebagai reduktor dan sumber energi di DR, energi listrik berasal dari EBT.



Gambar 1.15 Perkiraan emisi gas CO₂ dari jalur proses EAF-CCM-HRM, energi listrik berasal dari EBT.

Dalam rangka menurunkan emisi gas CO₂ pada produksi baja dari bahan baku bijih besi, gas hidrogen digunakan sebagai reduktor di pabrik DR, sebagai bahan bakar pada proses pemanasan *tundish* di CCM, dan pemanasan

slab di HRM. Energi listrik untuk pemanasan gas hidrogen di pabrik DR dan untuk melebur DRI berasal dari EBT. Dengan cara ini, emisi gas CO₂ di pabrik ini adalah sekitar 0,1 ton per ton baja (Gambar 1.16). Gas CO₂ masih dihasilkan dari elektroda grafit dan juga dari batubara jenis antrasit atau kokas yang digunakan untuk pembentukan buih terak (*slag foaming*) di EAF. Usaha-usaha untuk mendapatkan elektroda dan pembentukan buih terak dari biokarbon sedang dilakukan saat ini.



Gambar 1.16 Perkiraan emisi gas CO₂ dari jalur proses DR-EAF-CCM-HRM, energi listrik berasal dari EBT, hidrogen sebagai reduktor dan bahan bakar.

Pada tahun 2024, dua pabrik DR sedang dibangun menggunakan hidrogen sebagai reduktor, yaitu di Jerman oleh Thyssen Krupp (greensteelworld.com) dan di Swedia oleh SSAB bersama dengan Vattenfall dan LKAB (www.hydrogeninsight.com). Pabrik di Swedia menggunakan teknologi Hybrit (*hydrogen breakthrough ironmaking technology*) yang merupakan kombinasi DR menggunakan hidrogen dan EAF menggunakan pembangkit listrik tenaga air. Thyssen Krupp menggantikan tanur tiup (BF) dengan teknologi DR – SAF (*submerged arc furnace*) menghasilkan produk lelehan besi wantah (*hot metal*) yang kemudian diproses pada pabrik eksisting dengan BOF. Kedua pabrik ini beroperasi pada tahun 2026.

Selain itu, usaha untuk menurunkan emisi gas CO₂ di tanur tiup juga dilakukan, misal dengan injeksi biokarbon untuk menggantikan PCI (*pulverized coal injection*) dan injeksi gas hidrogen ke dalam tanur tiup (Ökvist dkk., 2024; www.thyssenkrupp-steel.com). Alternatif teknologi lain yang sedang dikembangkan adalah elektrolisis pada temperatur tinggi, elektrolisis pada temperatur rendah, dan plasma hidrogen. Elektrolisis temperatur tinggi (MOE, *molten oxide electrolysis*) mulai diteliti di MIT pada tahun 1996 oleh Donald Sadoway dan saat ini sedang dikembangkan oleh Boston Metal di USA

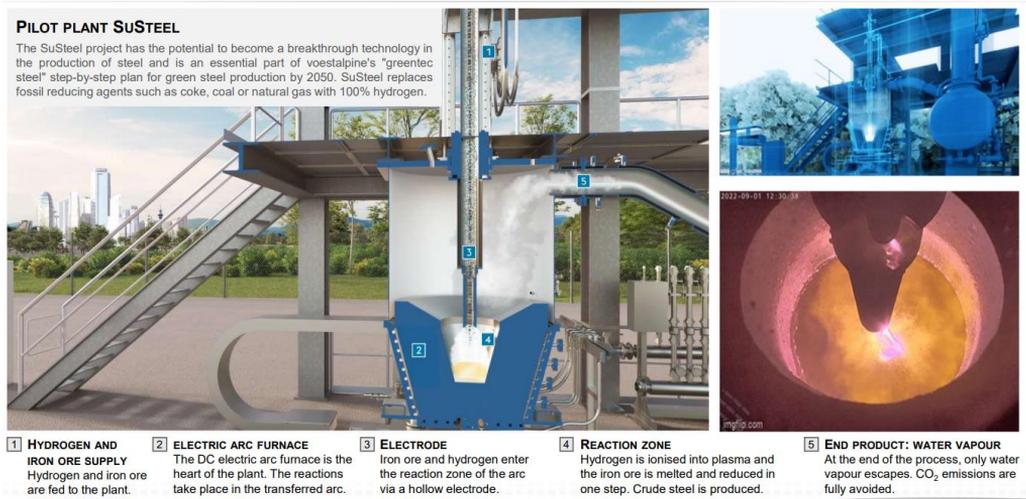
ke tahap pilot (Roan, 2024). Teknologi peleburan reduksi dengan plasma hidrogen (HPSR, *hydrogen plasma smelting reduction*) telah kembali menarik perhatian para peneliti di Montanuniversitaet Leoben, Austria, dan *Max-Planck-Institute für Eisenforschung* (MPIE), Jerman, serta di belahan dunia lainnya. Tabel 1.1 memberikan informasi pengembangan teknologi produksi besi dan baja untuk dekarbonisasi.

Tabel 1.1 Dekarbonisasi produksi besi dan baja (Draxler, 2021).

Technology	TRL development			Economic assessment	Reference projects ¹
	2020	2030	2050		
Hydrogen-based direct reduction (utilisation of 100% H₂)	TRL 6-8	TRL 7-9	TRL 9 (ind. deployed)	20-80% cost increase; production costs: ~€532-640/t CS	HYBRIT, SALCOS, tkH ₂ Steel, Hydrogen Hamburg
Hydrogen plasma smelting reduction	TRL 5	TRL 6	TRL 9 (ind. deployed)	No information on CAPEX or OPEX	SuSteel
Alkaline iron electrolysis	TRL 5-6	TRL 6-8	TRL 9	CAPEX + OPEX: ~€645-828/t CS	ULCOS (SP5-13-14), IERO, VALORCO, SIDERWIN
Molten oxide electrolysis	TRL 2	TRL 3-4	TRL 9	CAPEX: ~€1 K/t CS annual capacity; OPEX: increase of 50-80% compared to conventional route	ULCOS, IERO, VALORCO
Carbon oxide conversion	TRL 8 (conversion) TRL 4-5 (impl.)	TRL 9	Ind. deployed	CAPEX increase of ~€13/t CS OPEX increase of €408-629/t CS	Carbon2Chem, Carbon4PUR, STEELANOL
Iron bath reactor smelting reduction	TRL 6	TRL 8	Ind. deployed	CAPEX: €500 M (for a 1.15 Mt/year plant excl. O ₂ plant) Neg. OPEX (-25 to -€30/t CS), due to efficiency gains	Hlsarna
Gas injection into the blast furnace	TRL 5-8 (preparation / gas reforming) TRL 9 (H ₂ rich)	TRL 8-9	Ind. deployed (in 2040)	CAPEX: €80-110 / €110-150/t CS (without / with CCUS) OPEX: €0-10 / €40-50/t CS (without / with CCUS).	ULCOS
Substitution of fossil energy carriers by biomass	TRL 2-7	TRL 8	TRL9 (ind. depl. in 2035)	CAPEX relatively low and OPEX depends mainly on the raw materials	SHOCOM, GREENEAF2, ACASOS
High-quality steelmaking with increased scrap usage	TRL 4-8	TRL 7-9	Ind. deployed	OPEX: significant depending on the scrap price	FLEXCHARGE, ADAPTEAF, SSIA, LCS

Dari Tabel 1.1. terlihat bahwa teknologi HPSR pada tahun 2020 mempunyai TRL 5 dan akan menjadi TRL 6 pada tahun 2030. Pada tahun 2050, teknologi ini siap diaplikasikan dalam skala industri. Ada beberapa proyek penelitian saat ini sedang berlangsung di Eropa seperti SuSteel (*sustainable steelmaking*) pada Gambar 1.17 dan H2PlasmaRed (<https://h2plasmared.eu/>).

Peleburan reduksi plasma hidrogen saat ini juga sedang dilakukan penelitian di Laboratorium Pirometalurgi, FTTM – ITB.

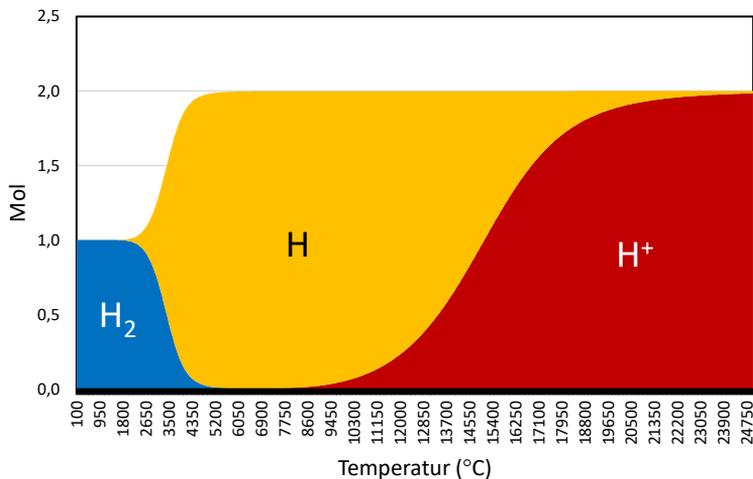


Gambar 1.17 Pengembangan teknologi HPSR (*hydrogen plasma smelting reduction*) pada proyek SuSteel oleh K1-MET GmbH di Austria (Zarl, 2023).

2. PELEBURAN REDUKSI DENGAN PLASMA HIDROGEN

2.1 Termokimia Reduksi Oksida dengan Plasma Hidrogen

Pada temperatur tinggi, gas hidrogen diatomik (H_2) dapat berubah menjadi gas hidrogen monoatomik (H) dan ion H^+ . Keseimbangan gas hidrogen sebagai fungsi temperatur yang dihitung menggunakan program termokimia FactSage 8.2 diperlihatkan pada Gambar 2.1. Pada temperatur 2000 °C, gas hidrogen diatomik (H_2) mulai terdisosiasi menjadi $2H$ dan stabil dalam bentuk gas hidrogen monoatomik pada temperatur lebih tinggi dari 5000 °C. Pada temperatur 8500 °C, hidrogen monoatomik mulai terionisasi menjadi ion H^+ dengan melepaskan elektron. Pada temperatur lebih tinggi dari 15.000 °C, ion H^+ lebih stabil dibandingkan dengan hidrogen monoatomik.

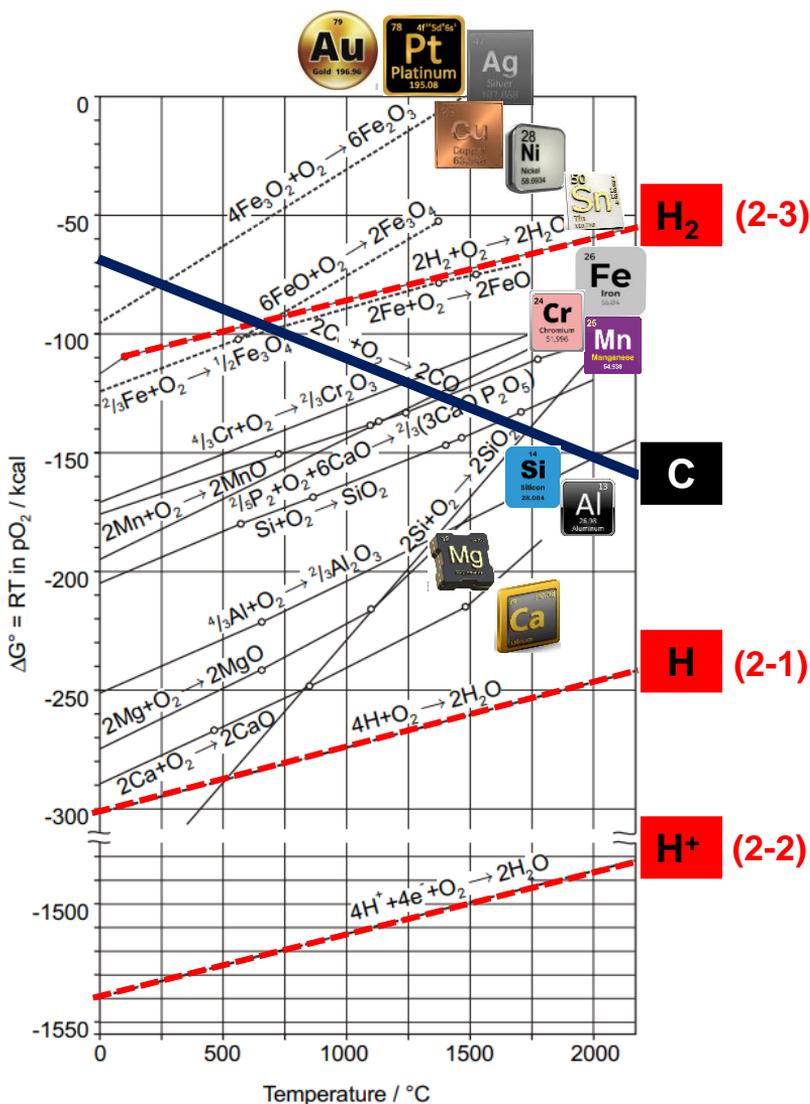


Gambar 2.1 Keseimbangan gas hidrogen sebagai fungsi dari temperatur (dihitung dengan FactSage 8.2).

Garis persamaan reaksi gas hidrogen monoatomik dengan oksigen (Persamaan 2-1) dan ion H^+ dengan oksigen (Persamaan 2-2) dialurkan dalam diagram Ellingham pada Gambar 2.2.



Kedua garis berdasarkan dua persamaan reaksi tersebut dibandingkan dengan garis reaksi gas hidrogen diatomik dengan oksigen yang telah umum terdapat pada diagram Ellingham:



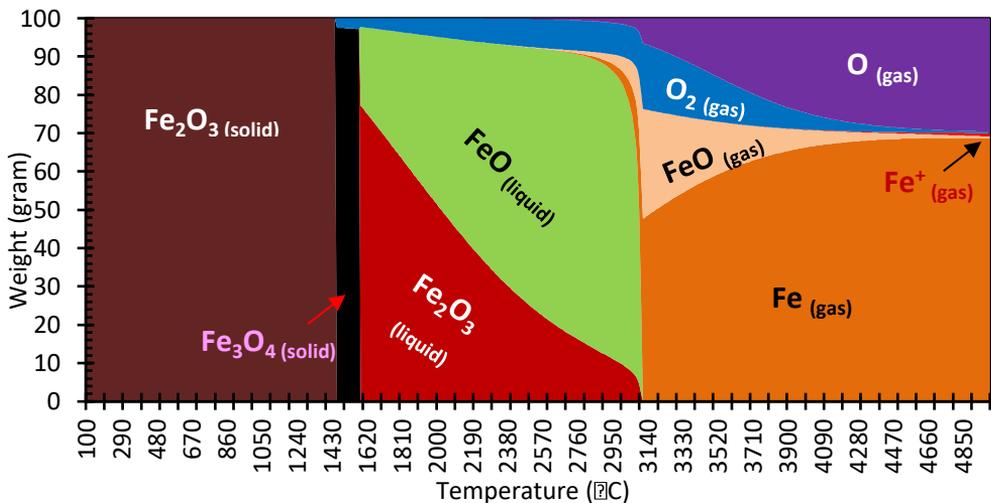
Gambar 2.2 Diagram Ellingham mempertimbangkan unsur H monoatomik dan ion H⁺ dalam keadaan plasma (diolah dari Coudurier dkk., 1978; Dembovsky, 1987; Hibler dan Plaul, 2004)

Dari diagram Ellingham pada Gambar 2.2 terlihat bahwa garis persamaan reaksi 4H⁺ dengan O₂ dan 4e⁻ menjadi 2H₂O (Persamaan 2-2) terletak jauh di bawah dari garis-garis lainnya yang mengindikasikan bahwa ion H⁺ yang terbentuk pada temperatur tinggi dalam lingkungan plasma dapat mereduksi oksida-oksida yang terdapat di atasnya membentuk logam. Garis persamaan reaksi 4H dengan O₂ menjadi 2H₂O (Persamaan 2-1) terletak sedikit di bawah

garis kesetimbangan pembentukan CaO. Hal ini juga memberikan informasi bahwa hidrogen monoatomik dapat mereduksi oksida-oksida di atasnya.

2.2 Temperatur Plasma

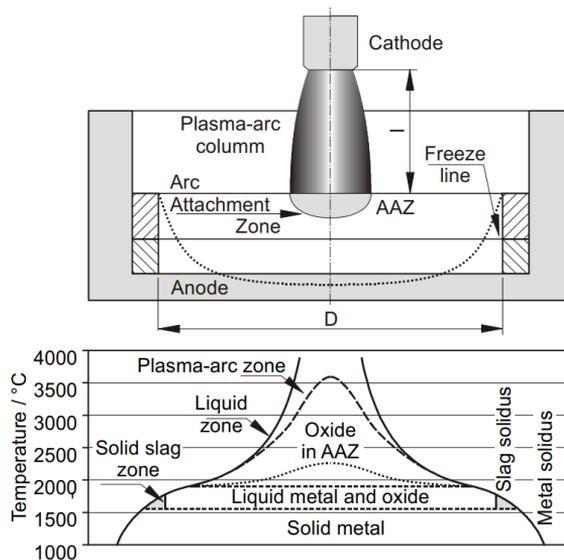
Plasma terbentuk akibat loncatan bunga api listrik dari kutub satu ke kutub lainnya melalui udara atau gas lainnya akibat perbedaan potensial yang besar antara kedua kutub tersebut. Tipikal temperatur plasma berkisar antara 5000 hingga 25.000 °C (Sabat dan Murphy, 2018). Pada temperatur lebih tinggi dari 3500 °C, sebagian besar oksida logam dan logam berubah menjadi fasa gas. Gambar 2.3 memperlihatkan kestabilan Fe_2O_3 sebagai fungsi dari temperatur. Pada temperatur lebih tinggi dari 3150 °C, Fe_2O_3 berubah menjadi gas Fe, gas FeO, gas O_2 , gas O, dan ion Fe^{2+} . Pada kenyataannya, temperatur plasma pada saat mencapai permukaan material yang dilebur berada jauh di bawah 5000 °C (Sabat dan Murphy, 2018).



Gambar 2.3 Perubahan fasa Fe_2O_3 sebagai fungsi temperatur (dihitung dengan FactSage 8.2).

Barcza dkk., 1990, mendeskripsikan zona-zona pada saat peleburan dalam lingkungan plasma dan profil temperatur seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Zona tersebut adalah zona busur plasma (*plasma arc zone*), AAZ (*arc attachment zone*), zona lelehan logam dan lelehan oksida, dan zona padatan slag. Barcza dkk., 1990, memperkirakan temperatur dalam kolom busur plasma (*plasma arc column*) berkisar antar 10.000 hingga 20.000 °C, temperatur pada antarmuka plasma dan lelehan (AAZ) sekitar 2000 – 3000 °C,

dan temperatur dinding reaktor 1000 – 1500 °C. Jika diembuskan hidrogen ke dalam plasma dan pada temperatur AAZ antara 2000 – 3000 °C, gas hidrogen stabil dalam bentuk diatomik dan monoatomik sesuai dengan Gambar 2.1. Hidrogen dalam bentuk ion H^+ tidak stabil dalam temperatur 2000 – 3000 °C. Dari data ini dapat disimpulkan bahwa oksida logam bereaksi dengan gas H_2 dan gas H, bukan dengan ion H^+ .



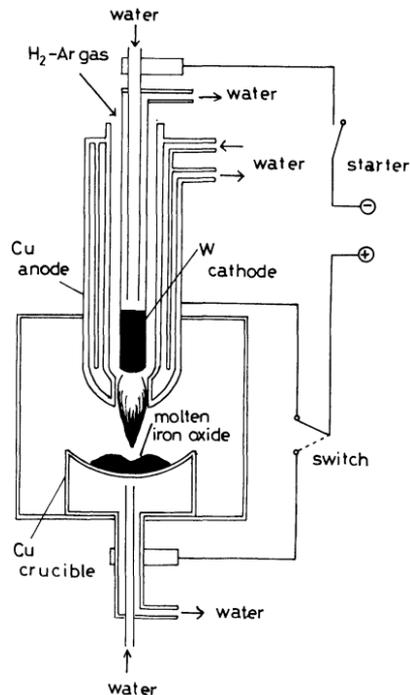
Gambar 2.4 Zona-zona pada peleburan dengan plasma dan perkiraan temperatur (Barcza dkk. 1990; Hibler dan Plaul, 2004).

2.3 Penelitian Sebelumnya

Kamiya dkk., 1984, di National Research Institute for Metals, Jepang, telah mereduksi lelehan besi oksida murni dan terak mengandung FeO dengan plasma Ar + 7% H_2 dalam krusibel tembaga. Berat sampel 25 hingga 75 gram, laju alir campuran gas 20 L/menit, daya listrik arus searah 8,3 kW, dan durasi percobaan maksimum 15 menit. Skematik reaktor yang digunakan diperlihatkan pada Gambar 2.5. Hasil percobaan menunjukkan bahwa reduksi lelehan besi oksida murni berlangsung linier dengan waktu dan laju reaksi berbanding lurus dengan tekanan parsial hidrogen monoatomik. Laju reaksi terak yang mengandung FeO lebih lambat dibandingkan dengan lelehan besi oksida murni dan proporsional terhadap kadar FeO dalam terak.

Penelitian reduksi bijih besi menggunakan tanur listrik arus searah dalam lingkungan hidrogen dan metana telah dilakukan di RWTH Aachen, Jerman, dan dilaporkan (Weigel, 1984; Vogel, 1988). Penelitian serupa telah diteruskan

di Montanuniversität Leoben, Austria (Sormann, 1992; Bäck, 1998; Wiesinger, 2000).

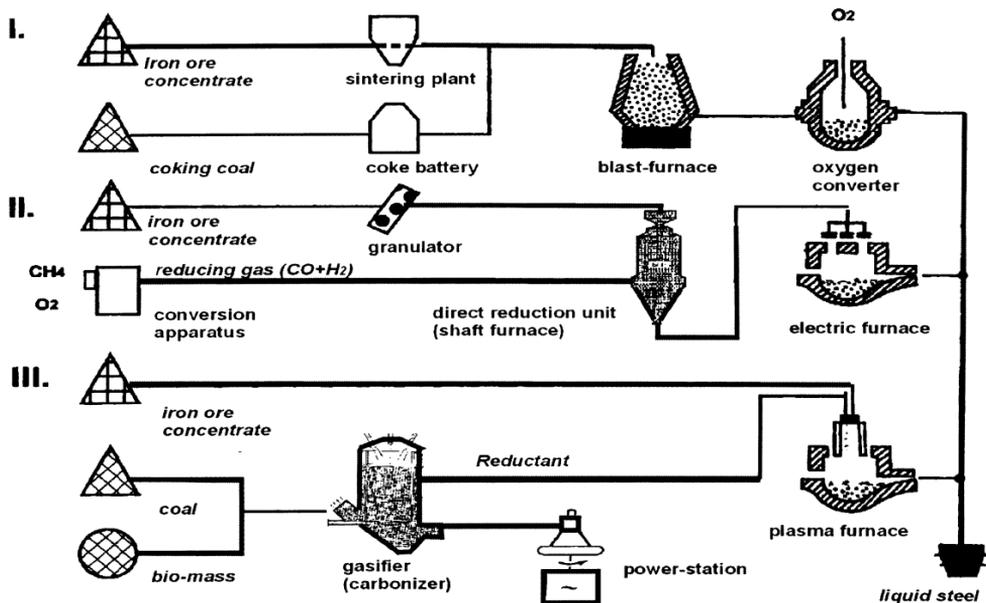


Gambar 2.5 Peralatan percobaan plasma hidrogen (Kamiya, 1984).

Tsvetkov, 1999, dari Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of Russian Academy of Sciences, Rusia, melaporkan penggunaan plasma hidrogen untuk produksi logam wolfram dan molibdenum di Chirchik dan di Vladikavkaz, Rusia. Bahan baku berupa bijih dan gas reduktor diumpungkan ke dalam tanur melalui elektroda grafit berongga di bagian tengah (*hollow graphite electrode*). Ia juga sudah menyarankan penggunaan plasma hidrogen untuk menghasilkan baja langsung dari bijih besi dalam satu reaktor seperti diperlihatkan pada Gambar 2.6.

Badr, 2007, di Montanuniversitaet Leoben, Austria, menggunakan gas Ar + H₂ dan gas Ar + CH₄ untuk mereduksi bijih besi hematit dari Carajas, Brazilia, dengan ukuran butiran 0,01 hingga 1 mm. Hidrogen plasma dibangkitkan menggunakan trafo dengan daya maksimum 8 kW, tegangan 110 V, dan arus 70 A. Peleburan dilakukan di atas krusibel bahan yang didinginkan dengan air dan diberikan pin untuk ignisi karena kutub positif dihubungkan dengan krusibel baja dan kutub negatif dengan elektroda grafit pada bagian atas. Pada

setiap percobaan, 100 gram bijih besi dimasukkan ke dalam krusibel baja. Saat percobaan, tegangan terukur antara 30 hingga 35 V dan arus antara 95 hingga 100 A. Hasil percobaan mengindikasikan bahwa elektroda grafit lebih baik digunakan dibandingkan dengan elektroda wolfram. Utilisasi gas hidrogen sekitar 40% pada penggunaan gas Ar + H₂. Penggunaan gas Ar + CH₄ memperlihatkan laju reaksi 3,5 – 4 kali lebih cepat dibandingkan dengan gas Ar + H₂.



Gambar 2.6 Jalur proses produksi baja konvensional dan penggunaan tanur plasma (Tsvetkov, 1999)

Guo dkk., 2018, melaporkan penggunaan plasma hidrogen untuk deoksidasi lelehan besi menggunakan krusibel tembaga yang didinginkan dengan air dengan daya 6 kW. Sekitar 30 gram besi elektrolitik dengan kadar oksigen sekitar 100 ppm. Percobaan dilakukan dengan memvariasikan gas H₂ dari 10 hingga 40% dan sisanya adalah gas argon. Percobaan berdurasi 0,5 hingga 120 menit. Hasil percobaan mengindikasikan bahwa kadar oksigen berkurang dari 100 ppm menjadi 30 ppm dalam waktu 120 menit.

Seftejani, 2020, melanjutkan penelitian yang dilakukan oleh Badr, 2007. Peralatan penelitian peleburan reduksi plasma hidrogen ditunjukkan pada Gambar 2.7. Pada percobaan variasi basisitas terak, bijih besi hematit yang digunakan adalah 100 gram. Pada basisitas 1,6, percobaan dilakukan dengan memvariasikan berat bijih besi hematit 75 gram dan 50 gram. Percobaan juga dilakukan dengan pengumpanan bijih besi secara kontinu sebanyak 80 gram

dan dimasukkan ke dalam krusibel sebanyak 20 gram. Lingkungan yang digunakan adalah 50% Ar + 50% H₂ dengan laju 5 NL/menit. Percobaan dibagi menjadi 4 tahap, yaitu inertisasi dengan gas argon, peleburan dalam lingkungan argon selama 180 detik, reduksi dengan plasma (*arcing*) dengan mengalirkan gas 50% Ar + 50% H₂ selama 1920 detik, dan inertisasi dengan gas nitrogen selama 600 detik.

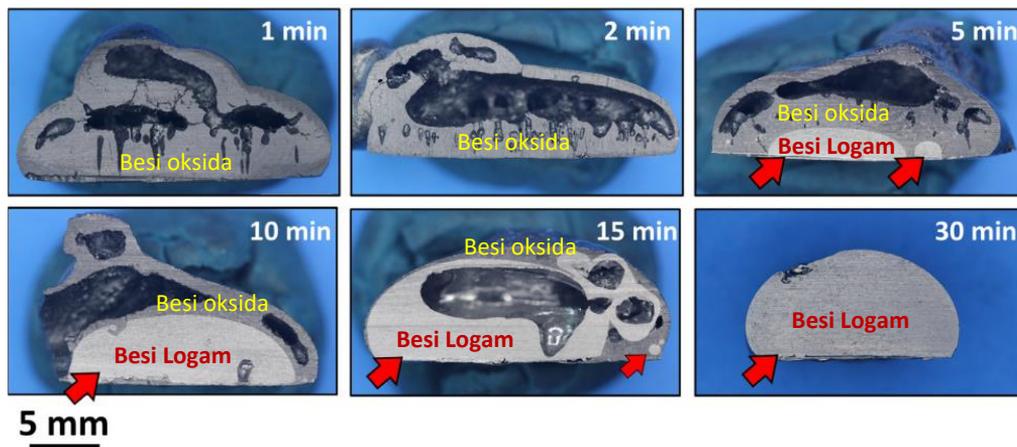


Gambar 2.7 Percobaan peleburan reduksi plasma hidrogen di Montanuniversitaet Leoben (Seftejani, 2020).

Hasil percobaan mengindikasikan bahwa utilisasi gas hidrogen sekitar 60% pada saat awal proses kemudian menurun hingga akhir proses dengan utilisasi rata-rata sekitar 28%. Defosforisasi dapat dilakukan secara bersamaan dengan pengaturan basisitas terak. Pada saat pengumpanan bijih besi secara kontinu, utilisasi gas hidrogen dapat dijaga konstan. Temperatur maksimum yang dapat dicapai sekitar 13.000 °C.

Souza Filho dkk., 2021, di Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Jerman, memublikasikan hasil penelitian reduksi bijih besi hematit dalam reaktor plasma di mana gas hidrogen diembuskan dari samping. Sampel bijih besi hematit sekitar 9 gram dimasukkan ke dalam tanur peleburan busur listrik (*arc melting*) yang dilengkapi dengan elektroda wolfram yang kemudian diisi dengan campuran gas argon dan gas hidrogen (Ar + 10% H₂). Untuk melebur dan mereduksi sampel bijih besi hematit tersebut, busur listrik plasma dinyalakan pada bagian ujung elektroda wolfram dan sampel yang dialiri arus listrik 800 A dan tegangan 44 V. Jarak rata-rata ujung elektroda ke permukaan

sampel sekitar 6 mm. Percobaan dilakukan dari 1, 2, 5, 10, 15, dan 30 menit. Hasil percobaan diperlihatkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Pembentukan logam besi dari bijih besi hematit sebagai fungsi waktu dalam reaktor plasma hidrogen (diolah dari Souza Filho dkk., 2021).

Gambar 2.8 memperlihatkan bahwa besi logam mulai terbentuk pada durasi percobaan 5 menit dan semua besi oksida dalam bijih besi hematit tereduksi menjadi besi logam setelah 30 menit. Selain itu, pada penelitian ini juga diamati terjadi proses pemurnian besi logam dari unsur-unsur pengotor terutama fosfor dan sulfur. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa teknologi HPSR dapat digunakan untuk melebur, mereduksi, dan memurnikan logam yang dihasilkan dalam satu reaktor.

Kannan dkk., 2024, melakukan penelitian produksi logam besi dari bahan baku bubuk hematit dengan kemurnian 99,99% dan ukuran 35 μm . Plasma hidrogen dihasilkan dengan DC Hybrid Arc Welding dengan TIG (*tungsten inert gas*) menggunakan campuran Ar + 2% H₂ dengan laju alir 7-9 L/menit. Arus yang digunakan pada percobaan 160 A dan tegangan 16,4 V. Jumlah bubuk hematit yang dicoba adalah 0,9 gram dalam bentuk briket. Waktu divariasikan dari 0 detik, 15 detik, 45 detik, 1 menit, dan 2 menit yang dihitung setelah bubuk hematit melebur yang membutuhkan waktu 20 detik. Hasil percobaan menunjukkan bahwa dalam waktu 2 menit, sekitar 80% reduksi hematit menjadi logam besi dapat dicapai menggunakan campuran gas Ar + 2% H₂.

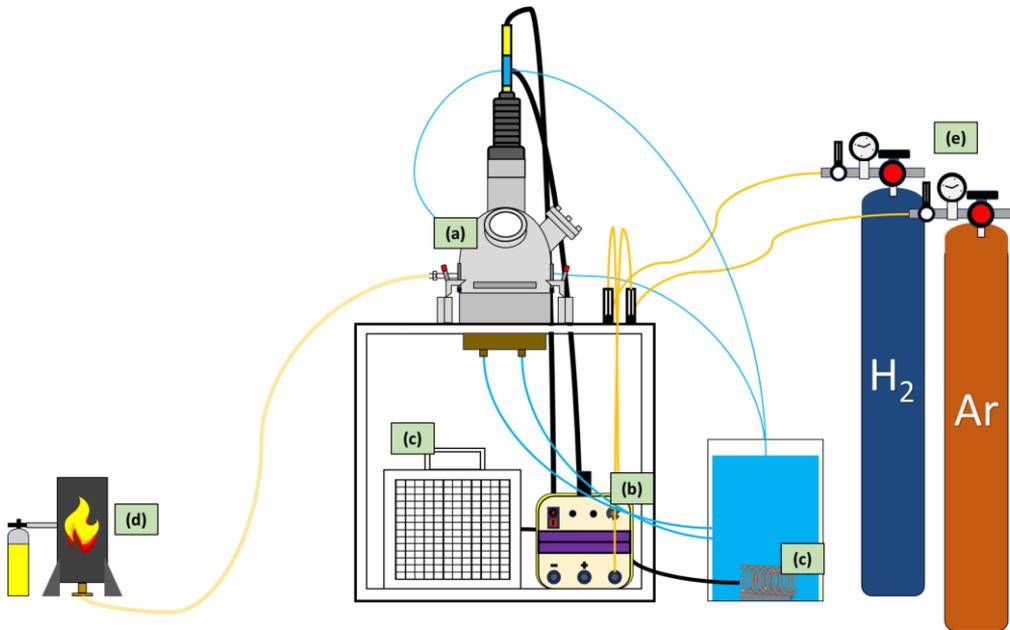
3. AKTIVITAS PENELITIAN HPSR DI LABORATORIUM PIROMETALURGI ITB

Teknologi HPSR mulai dikembangkan di Laboratorium Pirometalurgi, FTTM-ITB, pada bulan April 2023. HPSR skala laboratorium dirancang dengan memodifikasi alat pemotong baja berupa *plasma cutter* yang sudah banyak tersedia di pasaran. Nozel *plasma cutter* dimodifikasi sehingga kutub positif dan kutub negatif berada dalam satu nozel. Udara yang umumnya digunakan pada *plasma cutter* disubstitusi dengan argon dan campuran argon dengan hidrogen. Percobaan awal dilakukan pada bulan Juni hingga Agustus 2023 di bengkel milik Bapak Yopi Hendrawan, salah satu teknisi laboratorium di FTTM ITB, berlokasi di Ujung Berung, Bandung. Gambar 3.1 memperlihatkan percobaan dan hasil percobaan pendahuluan di mana logam feronikel dapat dihasilkan dalam waktu kurang dari 5 menit.



Gambar 3.1 a. Percobaan pendahuluan di bengkel, b. Biji nikel laterit sebelum dilebur dalam reaktor plasma hidrogen, c. Hasil peleburan dalam waktu kurang dari 5 menit.

Skematik alat HPSR diperlihatkan pada Gambar 3.2. Bagian bawah reaktor lokasi penempatan sampel terbuat dari tembaga yang didinginkan dengan air. Dinding reaktor terbuat dari baja tahan karat. Gas argon dan gas hidrogen dialirkan melalui alat pengukur laju alir (*flow meter*) kemudian menuju reaktor plasma melalui inverter. Gas buang dialirkan keluar reaktor menuju pembakar yang sekaligus berfungsi sebagai penghalang udara dari luar masuk ke dalam reaktor.



Gambar 3.2 Skematik alat HPSR a. Reaktor, b. Inverter untuk menghasilkan plasma, c. Sistem pendingin, d. Burner untuk membakar sisa gas hidrogen (Islam, 2024).

Pada awal percobaan, setelah sampel diletakkan di atas krusibel tembaga, reaktor ditutup, argon dialirkan 1 menit untuk mengusir udara yang terdapat di dalam reaktor. Setelah itu, gas hidrogen dialirkan bersamaan dengan gas argon dengan laju alir tertentu sesuai dengan kebutuhan. Gas yang keluar dari reaktor melalui pipa menuju cerobong mini dibakar dengan korek hingga muncul nyala api. Jika nyala api sudah terbentuk, yang berfungsi sebagai *sealing* untuk mencegah udara luar masuk ke dalam reaktor, langkah berikutnya adalah melakukan ignisi untuk menghasilkan plasma. Plasma dinyalakan sesuai dengan waktu yang ditentukan sebelumnya. Setelah selesai, plasma dimatikan, gas hidrogen ditutup salurannya ke reaktor. Gas argon tetap dinyalakan hingga nyala api di cerobong mini mati, yang mengindikasikan gas hidrogen dari reaktor sudah kecil konsentrasinya dan tidak terjadi ledakan. Setelah itu, reaktor dibuka dan sampel dikeluarkan. Percobaan telah dilakukan pada ekstraksi logam besi dari residu pelindian bijih nikel laterit (*tailing*), produksi baja dari bijih besi gutit, produksi feronikel dari bijih nikel laterit, produksi ferokromium dari bijih kromium, dan produksi baja tahan karat dari campuran bijih nikel laterit dan bijih kromium. Sebagian hasil percobaan telah dipresentasikan pada International Symposium on Hydrogen Metallurgy, Changsha, China, 5 September 2024 (Gambar 3.3).

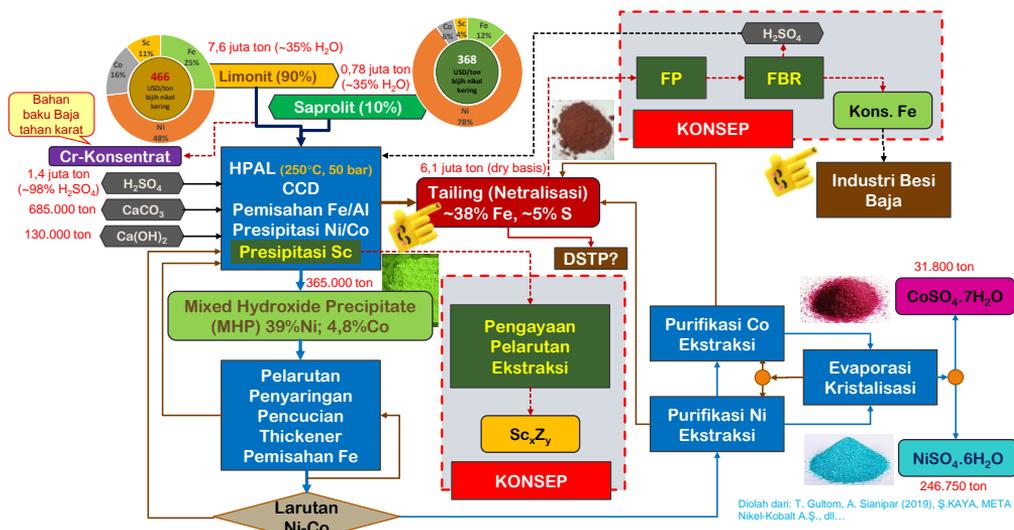


Gambar 3.3 Partisipasi dalam International Symposium on Hydrogen Metallurgy, Changsha, China, 4 – 6 September 2024.

3.1 Ekstraksi Logam Besi dari Residu Pelindian Bijih Nikel Laterit

Pelindian bijih nikel laterit tipe limonit dengan asam sulfat menghasilkan produk antara berupa MHP (*mixed hydroxide precipitate*) yang kemudian diproses lebih lanjut menghasilkan nikel sulfat dan kobalt sulfat sebagai bahan baku pembuatan baterai. Proses produksi MHP ini menghasilkan *tailing* atau residu pelindian dalam jumlah sekitar 1,1 kali dari jumlah bijih nikel yang diproses. Penempatan residu pelindian ini menjadi kendala tersendiri. Usaha-usaha untuk memanfaatkan residu pelindian telah banyak dilaporkan di mana salah satu di antaranya adalah sebagai bahan baku produksi besi dan baja. Diagram alir proses produksi MHP dari bijih nikel laterit dengan jalur hidrometalurgi serta konsep pemanfaatan residu pelindian diperlihatkan pada Gambar 3.4.

Residu pelindian yang telah dilakukan percobaan dalam reaktor HPSR berasal dari teknologi STAL (*step temperature acid leach*) yang sedang dikembangkan di Indonesia saat ini. Komposisi kimia residu pelindian tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.1. Kadar sulfur dalam residu pelindian STAL ini sekitar 1% dan lebih kecil dari residu pelindian yang umumnya dihasilkan dari teknologi HPAL (*high pressure acid leach*) yang sudah dibangun lebih dari 10 *autoclave* di Indonesia. Kadar besi dan sulfur dalam residu tersebut adalah 39,48% dan 1,55%, secara berurutan.



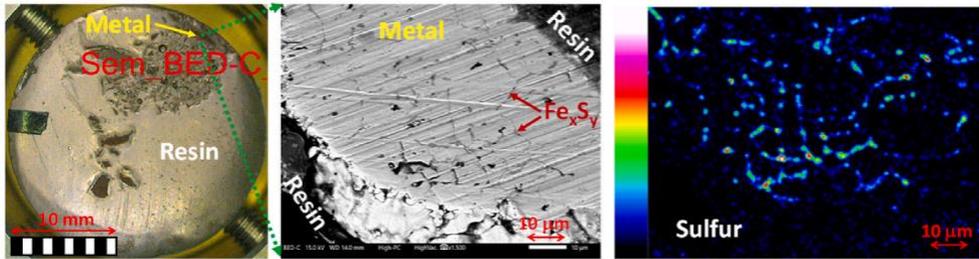
Gambar 3.4 Diagram alir proses pelindian bijih nikel laterit dan potensi pemanfaatan *tailing* (Zulhan, 2020).

Table 3.1 Komposisi kimia residu pelindian nikel skala pilot dalam persen berat (Zulhan dkk., 2024a)

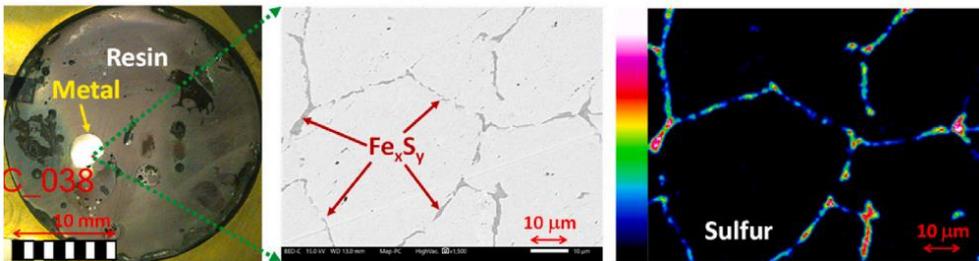
Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ (SO ₄) ₃	Cr ₂ O ₃	MgO
54,49	19,79	5,51	5,12	3,40	2,67
CaSO ₄	NiO	TiO ₂	MnO	Na ₂ O	H ₂ O
1,36	1,13	0,23	0,19	0,12	5,83

Sekitar 3 gram residu pelindian dibuat menjadi briket dengan diameter 14 mm dan tinggi 7 mm. Briket ini kemudian diletakkan di dalam krusibel tembaga dan direduksi dalam reaktor HPSR dengan mengalirkan gas campuran Ar + 80% H₂ dengan laju alir 5 L/menit. Arus searah yang dialirkan sebesar 35 A dan tegangan yang terukur berkisar antara 30 hingga 80 V dengan tegangan rata-rata sekitar 40 V. Dari data ini, daya reaktor HPSR berkisar antara 1,02 – 2,88 kW. Briket setelah diproses dalam reaktor HPSR dipreparasi untuk dianalisis dengan *scanning electron microscope* yang dilengkapi dengan *energy-dispersive spectrometer* (SEM-EDS; JEOL NeoScope JCM-7000) untuk menentukan komposisi kimia di dalamnya.

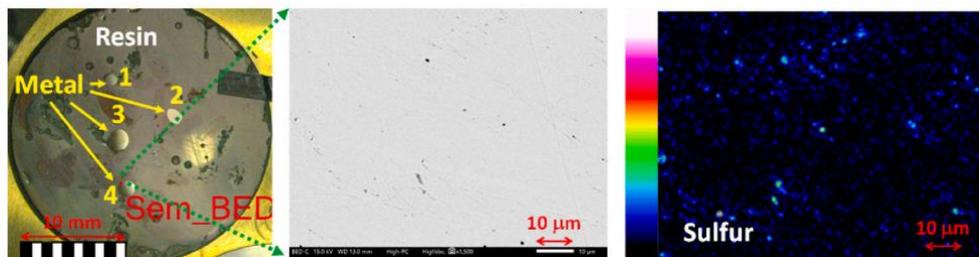
Hasil percobaan menunjukkan bahwa dalam waktu 5 detik logam besi mulai terbentuk, tetapi hanya dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop elektron dengan pembesaran 1500 ×. Setelah 10 hingga 180 detik, logam besi yang terbentuk dapat terlihat dengan mata. Gambar 3.5 memperlihatkan hasil percobaan untuk durasi 5, 60, dan 120 detik.



a. 5 detik



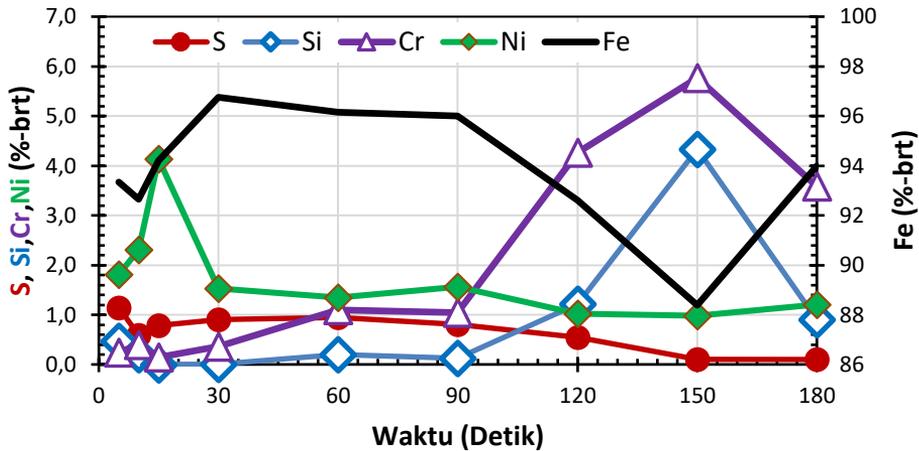
b. 60 detik



c. 180 detik

Gambar 3.5 Hasil peleburan yang dicetak dalam resin (kiri), foto SEM dengan 1500 kali pembesaran (tengah), dan pemetaan unsur sulfur dengan EDS (kanan) (Zulhan dkk., 2024a).

Perubahan komposisi kimia logam sebagai fungsi dari durasi percobaan ditunjukkan pada Gambar 3.6. Kadar sulfur dalam logam lebih tinggi dari 0,6%. Seiring dengan meningkatnya waktu proses dalam HPSR, kadar sulfur menurun hingga kurang dari 0,1% setelah 180 detik waktu proses. Kadar silikon dan kromium dalam logam meningkat dalam selang waktu proses 90 hingga 150 detik. Setelah itu, kadar silikon dan kromium cenderung menurun. Kadar kromium dalam logam dapat mencapai 5% dan kadar silikon 4%. Kadar kromium yang tinggi ini memberikan potensi penggunaan residu pelindian sebagai bahan baku untuk menghasilkan baja spesial dan baja tahan karat.



Gambar 3.6 Perubahan komposisi kimia logam pada saat diproses dalam reaktor HPSR (Zulhan dkk., 2024a).

3.2 Produksi Baja dari Bijih Besi Limonit

Seperti telah disampaikan sebelumnya, produksi baja karbon (*carbon steel*) dapat menggunakan bahan baku berupa bijih besi hematit, bijih besi magnetit, atau bijih besi limonit yang mengandung mineral gutit. Teknologi yang umum digunakan untuk memproses bijih besi tersebut adalah tanur tiup menggunakan kokas dari batubara sebagai reduktor dan sumber energi. Produk yang dihasilkan berupa besi wantah dengan kadar karbon sekitar 4,5%, silikon sekitar 0,1%, mangan sekitar 0,2%, fosfor sekitar 0,04% (bergantung pada kadar fosfor dalam bijih), dan sulfur sekitar 0,04%. Sulfur sebagian besar berasal dari kokas sebagai reduktor dan sisanya berasal dari bijih besi dan bahan imbuah.

Dalam usaha untuk mengurangi emisi gas CO₂, teknologi tanur tiup digantikan oleh teknologi DR (*direct reduction*) di mana salah satunya dan yang dominan adalah tanur tegak (*shaft furnace*), misal Midrex atau HyL / Energiron yang dikombinasikan dengan tanur listrik (ESF, *electric smelting furnace*). Proses dalam tanur tegak dapat menggunakan hidrogen, tetapi penambahan karbon berupa biomassa dibutuhkan untuk menghasilkan besi wantah yang mirip dengan yang dihasilkan oleh tanur tiup. Kadar sulfur dalam produk besi wantah lebih kecil karena tidak menggunakan kokas, walaupun demikian kadar sulfur dalam biomassa perlu diperhatikan. Kelebihan dari teknologi DR-ESF ini adalah kualitas *hot metal* mirip dengan tanur tiup, dapat menggunakan teknologi BOF untuk menghasilkan baja dan terak yang dihasilkan dapat

digunakan sebagai bahan baku pembuatan semen. Teknologi ini sedang dibangun di Duisburg, Jerman, oleh Thyssen Krupp Stahl dan beroperasi tahun 2026. Selain itu, teknologi berbasis *fluidized bed* juga sedang dikembangkan, salah satunya adalah di Korea Selatan oleh POSCO, yaitu Hyrex yang merupakan kombinasi dari teknologi DR Finmet dengan ESF.

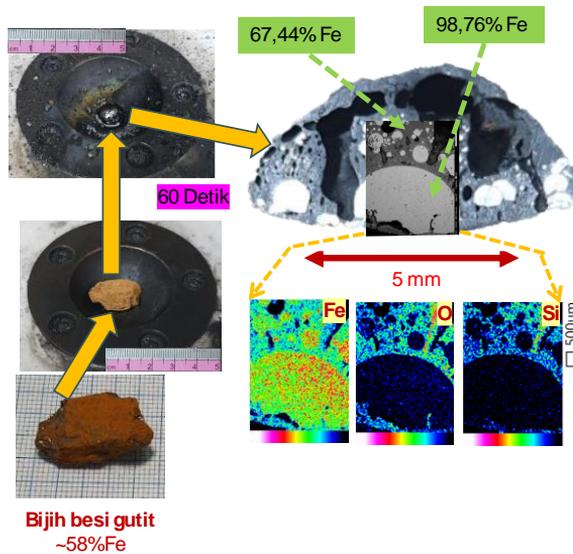
Rute lain yang dapat digunakan adalah DR-EAF yang sedang dibangun di Swedia dengan nama Hybrit (*hydrogen breakthrough iron making technology*) di Oxelösund, Swedia yang merupakan kerja sama dari 3 perusahaan, yaitu Vattenfall untuk menyuplai listrik dari PLTA, LKAB perusahaan tambang yang menyuplai bijih besi, dan SSAB perusahaan baja. Kebutuhan hidrogen untuk produksi baja dihasilkan dari elektrolisis air yang listriknya berasal dari PLTA. Perusahaan otomotif seperti Volvo sudah menggunakan produk baja yang dihasilkan oleh SSAB dari pabrik skala pilot.

Dengan menggunakan rute produksi di atas, rangkaian proses produksi baja masih panjang dan lama. Dalam hal ini, teknologi HPSR memberikan keuntungan karena proses peleburan, reduksi, dan pemurnian dapat dilakukan dalam satu tahap dan dalam waktu yang jauh lebih pendek. Komposisi kimia bijih besi gutit yang digunakan pada percobaan ini dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Komposisi kimia bijih besi gutit dalam persen berat (Hakim, 2024a)

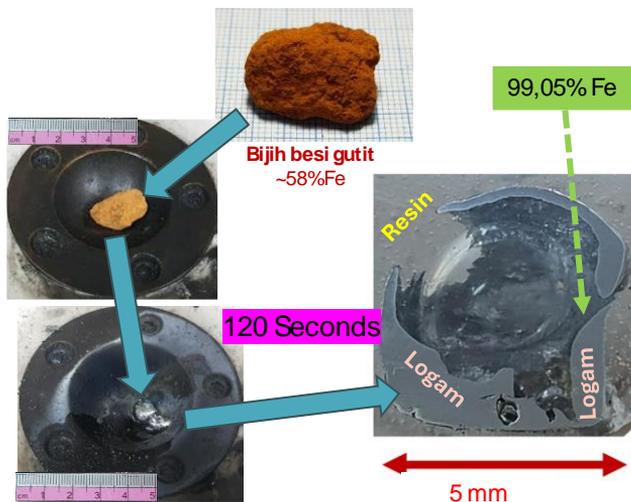
Fe ₂ O ₃ (Fe)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI
78,72 (55,06)	7,72	2,07	0,12	0,11	11,15

Hasil percobaan peleburan 5 gram bijih besi gutit dalam reaktor HPSR selama 60 detik diperlihatkan pada Gambar 3.7. Sebagian besi logam dengan kadar 98,76% Fe sudah terbentuk pada bagian bawah dan sebagian lagi berada dalam bentuk oksida dengan kadar besi 67,44%. Pada proses peleburan yang dilakukan selama 120 detik (Gambar 3.8), bijih besi gutit terkonversi menjadi logam besi dengan sempurna. Kadar Fe dalam logam tersebut adalah 99,05% Kadar unsur pengotor seperti fosfor dan sulfur tidak terdeteksi oleh alat ukur SEM-EDS. Hasil ini mengonfirmasi hasil penelitian yang sudah dipublikasi sebelumnya oleh Souza Filho dkk., 2021, di mana HPSR dapat digunakan untuk memurnikan logam besi.



Gambar 3.7 Peleburan bijih besi gigit dalam reaktor HPSR selama 60 detik (Hakim, 2024).

Variasi berat bijih besi gigit juga dilakukan, yaitu 1, 2, 3, 4, dan 5 gram dalam waktu 90 detik. Hasil percobaan menunjukkan bahwa untuk 1 dan 2 gram bijih besi gigit dapat terkonversi menjadi logam besi dengan sempurna dalam waktu 90 detik. Dalam hal ini, rasio daya listrik untuk menghasilkan plasma (*arc*) terhadap berat umpan (*power to mass ratio*) sangat menentukan durasi reduksi. Waktu proses yang lebih cepat didapatkan pada rasio daya listrik terhadap berat umpan yang besar. Selain itu, waktu proses yang singkat berdampak positif pada volume reaktor yang dapat lebih kecil.



Gambar 3.8 Peleburan bijih besi gigit dalam reaktor HPSR selama 120 detik (Hakim, 2024).

Souza Filho dkk., 2021, mengalirkan gas hidrogen bersama dengan gas argon dengan komposisi Ar + 10% H₂ di sekeliling plasma pada alat peleburan logam yang terdiri atas elektroda wolfram sebagai kutub negatif dan tembaga yang didinginkan air sebagai kutub positif. Alat peleburan ini sudah umum digunakan untuk membuat paduan logam pada skala laboratorium. Alat ini juga terdapat di Laboratorium Kehandalan Logam dan Korosi, FTTM – ITB. Gas hidrogen tidak dialirkan langsung ke bagian tengah plasma, oleh karenanya, waktu yang dibutuhkan untuk melebur dan mereduksi 9 gram bijih besi hematit adalah sekitar 30 menit, walau dengan daya listrik peleburan untuk membangkitkan plasma yang agak tinggi yaitu 35,2 kW.

Sementara itu, Seftjani, 2020, membutuhkan waktu sekitar 23 menit untuk mereduksi 100 gram bijih besi laterit menjadi logam besi. Daya listrik yang digunakan 6 kW dengan elektroda grafit yang mempunyai rongga pada bagian tengah (*hollow graphite electrode*) sebagai kutub negatif dan krusibel baja sebagai kutub positif. Pin di bagian tengah krusibel baja disediakan untuk ignisi plasma pada saat awal percobaan. Campuran gas hidrogen yang digunakan Ar+50% H₂.

Teknologi ini pada prinsipnya dapat diaplikasikan menggunakan teknologi-teknologi yang saat ini sudah terdapat di dunia misal Plasmarc yang diperkenalkan tahun 1960-an di mana elektroda terbuat dari material yang tidak terkonsumsi dan didinginkan dengan air (McCullough, 1962). Pengembusan hidrogen melalui elektroda ini dapat dipertimbangkan dan didesain untuk produksi logam skala pilot yang kemudian dilanjutkan ke skala produksi komersial. Keamanan saat pengembusan gas hidrogen perlu diperhatikan dengan baik untuk mencegah terjadinya ledakan.

Tantangan-tantangan yang dihadapi pada pengaplikasian teknologi HPSR ini pada skala produksi komersial di industri adalah sebagai berikut:

- Reaksi terjadi hanya pada area yang kontak langsung dengan plasma. Pada area yang tidak terkena plasma, reaksi reduksi tidak berlangsung atau berlangsung dengan laju reaksi yang lambat dengan mengandalkan gas hidrogen yang tidak bereaksi di dalam tanur.
- Plasma tidak terselimuti oleh *slag* yang menyebabkan timbulnya radiasi ke bagian dinding dan atap tanur dan mempercepat kerusakan pada bagian dinding dan atap tanur. Metode penyelimutan plasma untuk

meminimalkan kehilangan panas ke dinding dan atap tanur perlu dipertimbangkan.

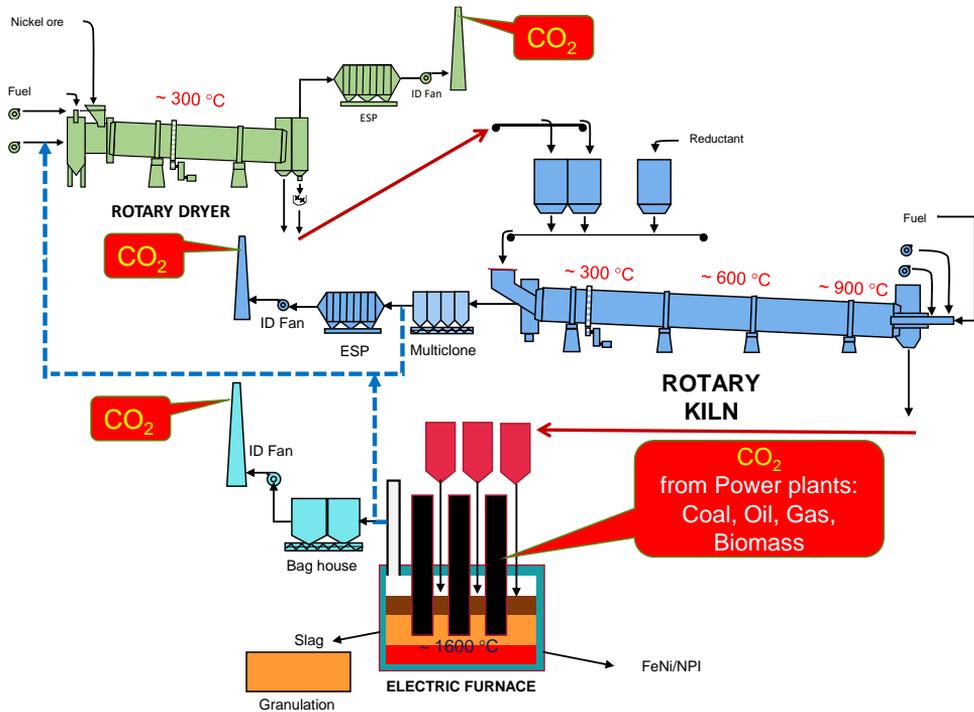
- Bahan untuk dinding dan atap tanur, termasuk refraktori, perlu didesain sedemikian rupa sehingga tahan terhadap radiasi plasma.
- *Sealing* elektroda dan sistem pengumpanan material selain melalui rongga elektroda perlu didesain untuk mencegah udara masuk ke dalam tanur yang menyebabkan ledakan.

3.3 Produksi Feronikel dari Bijih Nikel Laterit

Produksi feronikel saat ini didominasi oleh teknologi *rotary kiln - electric furnace* (RKEF). Skematik proses produksi feronikel menggunakan teknologi ini dan sumber emisi diperlihatkan pada Gambar 3.9. Tahap awal yang dilakukan adalah pengeringan bijih nikel laterit untuk menghilangkan sebagian air permukaan dari sekitar 30 - 40% menjadi sekitar 20% sehingga tidak lengket dan memudahkan proses penimbangan dengan akurasi tinggi pada saat pengumpanan ke *rotary kiln* bersama reduktor dan bahan imbuah (jika dibutuhkan). Sumber energi untuk pengeringan dapat berasal dari pembakaran batubara, batubara yang dihaluskan (*pulverized coal*), minyak bumi (misal MFO, *marine fuel oil*), gas alam, serta gas buang dari *rotary kiln*, dan gas buang dari tanur listrik. Bagi pabrik yang tidak memanfaatkan gas buang dari *rotary kiln* dan / atau dari tanur listrik, emisi gas CO₂ pada proses pengeringan berasal dari pembakaran bahan bakar fosil. Untuk mendapatkan proses yang karbon netral atau tanpa emisi, bahan bakar bio (*biofuel*) atau gas hidrogen dapat digunakan.

Setelah proses pengeringan, tahapan berikutnya adalah pengeringan lanjut, kalsinasi, dan reaksi reduksi awal oksida nikel dan oksida besi dalam *rotary kiln*. Proses dalam *rotary kiln* berlangsung pada temperatur yang lebih tinggi dari *rotary dryer*. Ke dalam *rotary kiln* juga diumpankan reduktor yang dapat berupa batubara (bituminus atau antrasit) dan / atau semikokas. Selain itu, dalam usaha mencapai karbon netral, biomassa juga digunakan sebagai reduktor. Salah satu pabrik yang menggunakan serpihan kayu sebagai reduktor adalah Codemin (Aglo American) di Brazilia dengan konsumsi 180 kg per ton bijih nikel kering (Wagner dkk., 2006). Sumber emisi pada proses dalam *rotary kiln* ini berasal dari bahan bakar yang dapat berupa batubara,

minyak bumi, atau gas alam. Penggunaan biofuel dalam hal ini dapat mencapai karbon netral.



Gambar 3.9 Produksi feronikel dengan teknologi *rotary kiln – electric furnace*.

Kalsin yang keluar dari *rotary kiln* pada temperatur lebih tinggi dari 600 °C ditransfer ke tanur listrik menggunakan kontainer / tank kalsin yang diangkat dan diumpankan ke dalam bin tanur listrik menggunakan *crane*, bergantung pada desain pabrik. Proses peleburan dalam tanur listrik berlangsung pada temperatur hingga 1600 °C. Energi listrik paling besar dibutuhkan untuk peleburan di mana konsumsinya berkisar antara 30.000 hingga 40.000 kWh/ton nikel bergantung pada kadar nikel dalam bijih dan temperatur kalsin serta penambahan bahan imbuhan untuk mengatur basisitas terak. Untuk mendapatkan karbon netral pada peleburan nikel ini, sumber listrik harus menggunakan EBT atau sumber listrik lainnya dengan emisi gas CO₂ rendah.

Penggunaan gas hidrogen untuk simulasi proses produksi feronikel dalam teknologi RKEF telah dilakukan pada skala laboratorium di Laboratorium Pirometalurgi (Satritama dkk., 2024). Tanur *tube* horizontal digunakan untuk menyimulasikan proses kalsinasi dan reduksi dalam *rotary kiln* dan tanur *tube*

vertikal untuk menyimulasikan proses peleburan dalam tanur listrik. Setelah sampel bijih nikel laterit dimasukkan ke dalam tanur *tube* horizontal, gas hidrogen bersama dengan gas argon dialirkan ke dalam *tube* yang terbuat dari baja tahan karat. Percobaan dilakukan dengan memvariasikan temperatur dari 500 – 900 °C dan waktu reduksi 15 hingga 180 menit. Produk kalsin yang dihasilkan dilebur dalam tanur *tube* vertikal pada temperatur 1550 °C selama dua jam. Hasil percobaan menunjukkan bahwa feronikel dapat dihasilkan menggunakan gas hidrogen sebagai reduktor dalam *rotary kiln*. Kendala penggunaan teknologi ini adalah kemungkinan terjadinya ledakan dalam *rotary kiln* pada saat diaplikasikan skala industri.

Selain penggunaan gas hidrogen, gas metana juga berpotensi digunakan sebagai reduktor (Nabilah, 2023). Pada temperatur sekitar 250 °C, gas metana mulai terdisosiasi menjadi gas hidrogen dan karbon padat. Gas metana terdisosiasi sempurna pada temperatur sekitar 1000 °C. Gas hidrogen digunakan sebagai reduktor dalam *rotary kiln* dan karbon padat sebagai reduktor untuk reduksi lanjutan dalam tanur listrik. Supaya proses menjadi ramah lingkungan, sumber metana dapat berasal dari biogas.

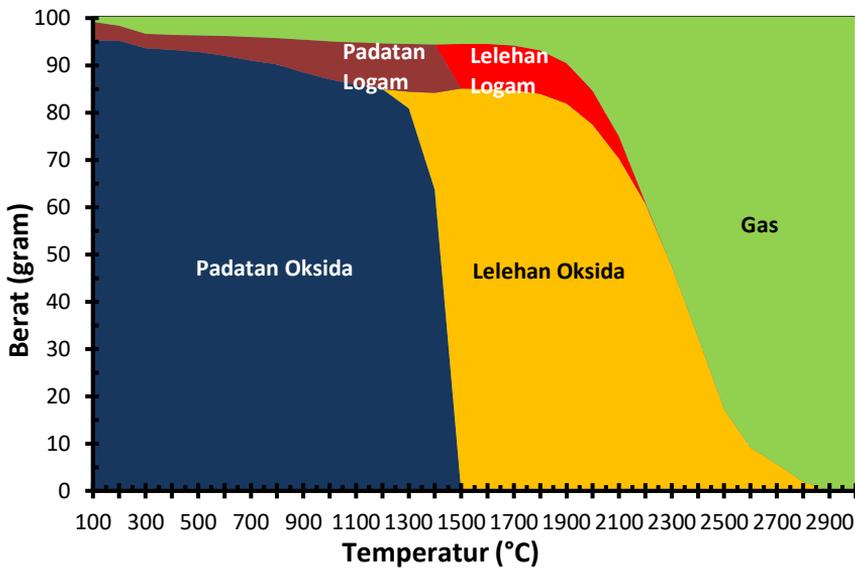
Dikarenakan tidak memungkinkan menggunakan hidrogen dalam *rotary kiln*, alternatif teknologi lain perlu dikaji kemungkinan penggunaannya. HPSR dapat menjadi salah satu solusi di masa depan karena menggunakan gas hidrogen sebagai reduktor. Energi listrik yang dihasilkan menggunakan EBT atau sumber listrik dari pembangkit emisi karbon rendah.

Bijih nikel yang digunakan pada percobaan penggunaan HPSR untuk produksi feronikel ditunjukkan pada Tabel 3.3. Perhitungan kesetimbangan kimia dengan program FactSage 8.0 diperlihatkan pada Gambar 3.10 untuk reaksi bijih nikel laterit dengan gas hidrogen sebagai fungsi temperatur. Dari gambar tersebut terlihat bahwa logam feronikel sudah terbentuk pada temperatur 100 °C dan meningkat seiring dengan kenaikan temperatur. Lelehan logam mulai terbentuk pada temperatur 1400 °C. Lelehan oksida (terak) terbentuk pada temperatur 1300 °C. Jika temperatur terus ditingkatkan, lelehan logam dan lelehan terak mulai terkonversi menjadi fasa gas. Pada temperatur lebih tinggi dari 2900 °C, semua logam dan oksida berubah menjadi fasa gas.

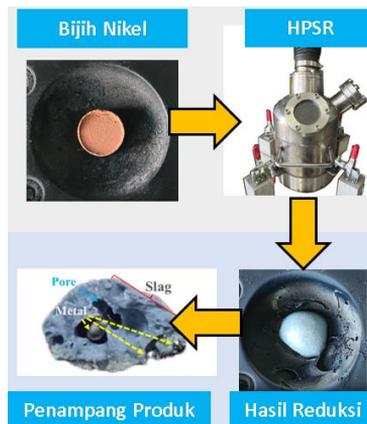
Hasil percobaan perubahan fisik dari briket bijih nikel yang telah dilakukan kalsinasi untuk menghilangkan air kristal ditunjukkan pada Gambar 3.11. Dalam waktu 180 detik, bijih nikel laterit berubah menjadi logam feronikel dan terak. Pengaruh kalsinasi dan tanpa kalsinasi dari bijih nikel laterit ini diperlihatkan Gambar 3.12.

Tabel 3.3 Komposisi kimia bijih nikel laterit tipe saprolit dalam persen berat (Islam, 2024).

Fe ₂ O ₃ (Fe)	NiO (Ni)	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	LOI
13,93 (9,75)	2,75 (2,16)	45,13	24,27	1,26	0,84	0,59	10,19

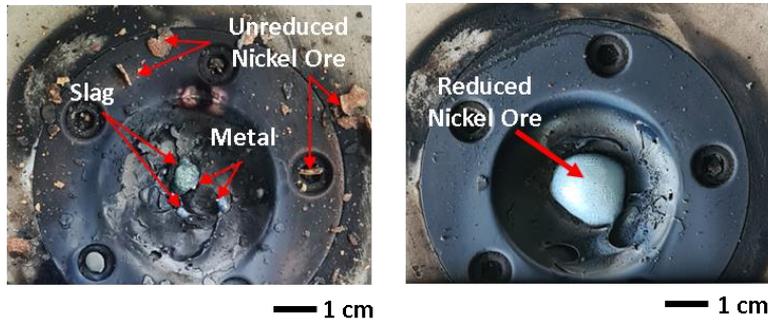


Gambar 3.10 Reaksi bijih nikel laterit dengan gas hidrogen sebagai fungsi temperatur (Islam, 2024).



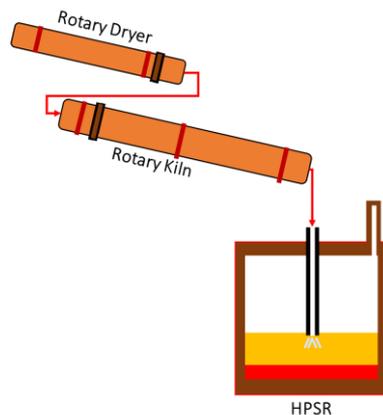
Gambar 3.11 Bijih nikel laterit sebelum dan sesudah proses peleburan dalam reaktor plasma hidrogen (Islam, 2024).

Pada bijih nikel tanpa kalsinasi, kadar air kristal sekitar 10% (Tabel 3.3) dapat menyebabkan sampel briket pecah akibat penguapan air yang berlangsung pada temperatur tinggi dalam waktu singkat. Fenomena ini dapat menyebabkan ledakan dalam reaktor HPSR. Ledakan serupa juga terjadi pada tanur listrik menggunakan teknologi RKEF jika kadar air kristal dalam kalsin *rotary kiln* sebagai umpan ke dalam tanur listrik lebih besar dari 1%.



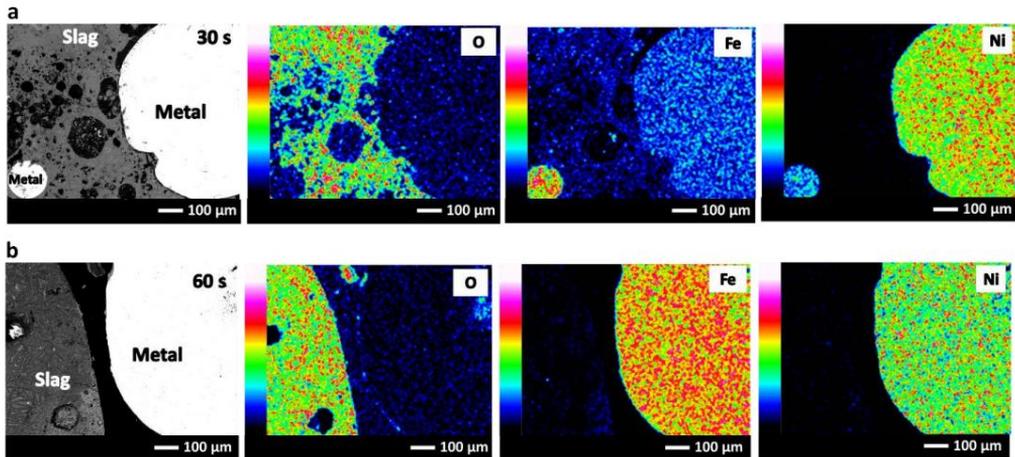
Gambar 3.12 Bijih nikel laterit sesudah proses peleburan dalam reaktor plasma hidrogen, tanpa kalsinasi (kiri), dengan kalsinasi (kanan) (Islam, 2024).

Dengan dilakukan kalsinasi, sampel briket bijih nikel laterit tidak pecah dan tidak terjadi ledakan. Oleh karenanya, jalur proses produksi feronikel jika menggunakan reaktor plasma hidrogen, maka *rotary dryer* dan *rotary kiln* perlu disediakan sebelum HPSR di mana *rotary dryer* untuk menurunkan air permukaan dan *rotary kiln* untuk menghilangkan air kristal. Jalur proses ini diperlihatkan pada Gambar 3.13. Kebutuhan energi berupa gas hidrogen untuk operasi *rotary dryer* dan *rotary kiln* perlu dipertimbangkan.



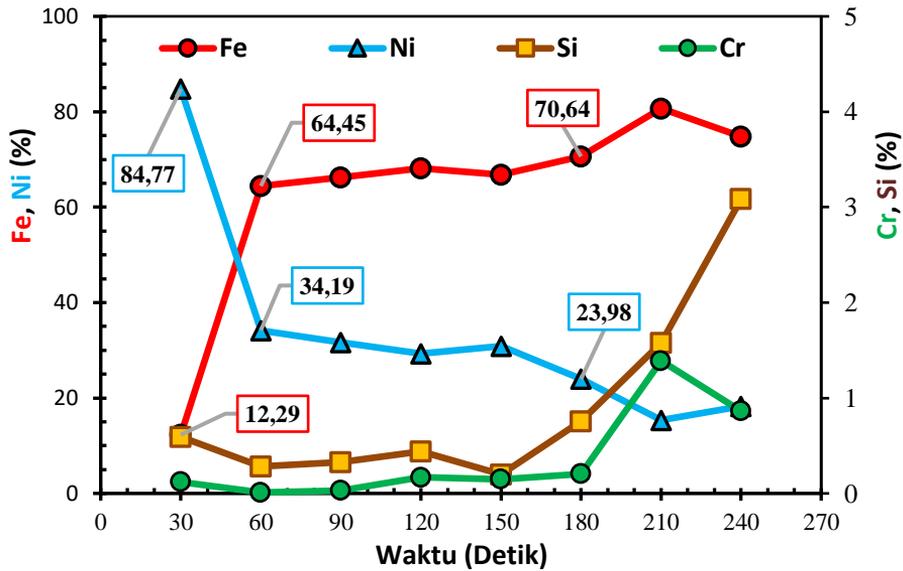
Gambar 3.13 Jalur proses produksi feronikel menggunakan reaktor plasma hidrogen/HPSR (Islam, 2024).

Produk peleburan dalam reaktor plasma hidrogen yang telah dianalisis dengan SEM-EDS diperlihatkan pada Gambar 3.14. Pada waktu proses 30 detik, nikel oksida sudah terlihat tereduksi sempurna dan masuk ke dalam logam, tetapi sebagian besi masih terdapat dalam terak (*slag*) dalam bentuk besi oksida. Pada saat durasi proses ditingkatkan ke 60 detik, nikel oksida, dan besi oksida sudah tereduksi menjadi nikel logam dan besi logam membentuk feronikel.

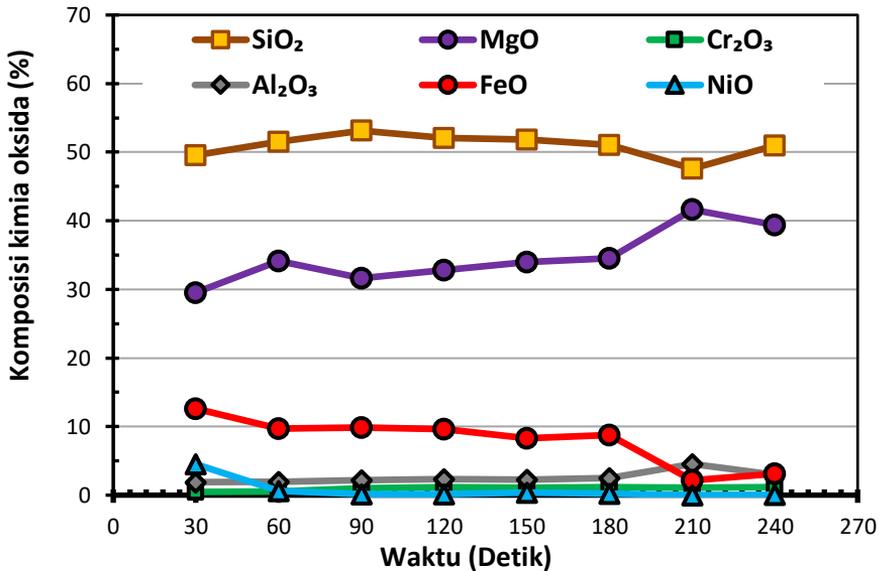


Gambar 3.14 Pemetaan unsur oksigen, besi dan nikel dalam logam dan terak, atas: 30 detik, bawah: 60 detik (Islam, 2024).

Perubahan komposisi kimia logam feronikel sebagai fungsi waktu proses dalam reaktor HPSR diperlihatkan pada Gambar 3.15. Pada saat durasi proses HPSR 30 detik, kadar nikel dalam feronikel 84,77% dan kadar besi 12,29%. Nikel oksida lebih mudah direduksi menjadi nikel logam dibandingkan dengan besi oksida. Jumlah hidrogen yang diembuskan pada waktu 30 detik ini masih terbatas dan terpakai untuk mereduksi nikel oksida. Seiring dengan meningkatnya waktu proses, jumlah gas hidrogen juga mencukupi untuk mereduksi besi oksida. Untuk menghasilkan feronikel dengan kadar nikel 20-30%, durasi proses 120 detik sudah mencukupi. Pada saat durasi proses plasma 180 detik, silikon oksida dan kromium oksida tereduksi menjadi silikon logam dan kromium logam. Fenomena ini mirip dengan ekstraksi logam dari residu pelindian pada Gambar 3.6. Kadar sulfur dan fosfor dalam produk feronikel tidak terdeteksi dengan SEM-EDS. Sulfur dalam produk feronikel umumnya berasal dari batubara atau kokas sebagai reduktor pada penggunaan teknologi RKEF atau *sinter - electric furnace* atau *blast furnace*.



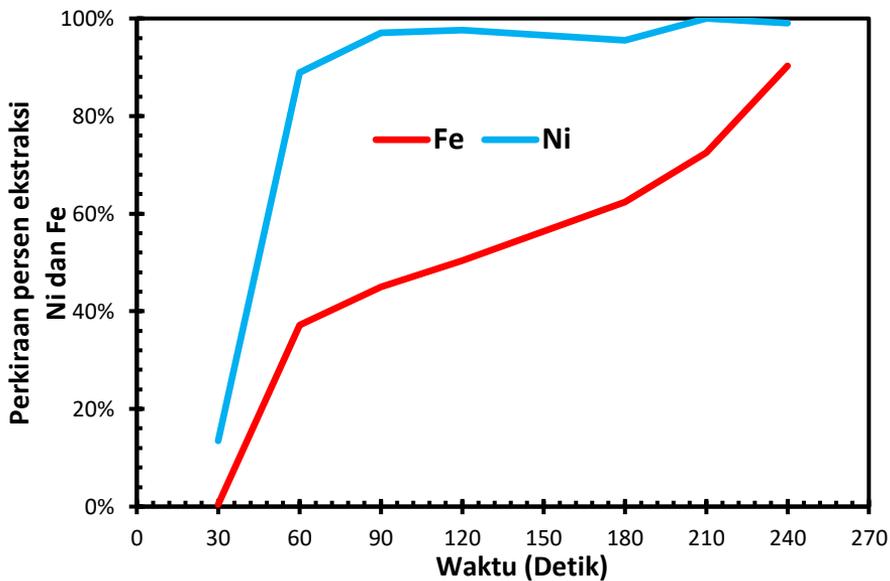
Gambar 3.15 Perubahan komposisi kimia logam feronikel seiring dengan peningkatan durasi proses peleburan dalam HPSR (Islam, 2024).



Gambar 3.16 Perubahan komposisi kimia oksida seiring dengan peningkatan durasi proses peleburan dalam HPSR (Islam, 2024).

Perubahan komposisi kimia oksida dalam terak dan perkiraan persen ekstraksi logam nikel dan logam besi sebagai fungsi dari waktu proses dalam reaktor HPSR diperlihatkan pada Gambar 3.16 dan 3.17. Kadar FeO cenderung

menurun seiring dengan peningkatan waktu yang mengindikasikan kadar besi dalam feronikel meningkat (Gambar 3.16) dan persen ekstraksi besi meningkat (Gambar 3.17). Waktu proses minimal untuk menghasilkan feronikel ini adalah 90 detik. Waktu proses yang lebih tinggi dari 180 detik dapat meningkatkan kadar kromium dan kadar silikon dalam produk feronikel (Gambar 3.15). Peningkatan kedua unsur ini memberikan nilai positif pada proses produksi baja tahan karat karena kromium dibutuhkan sebagai bahan baku produksi baja tahan karat.



Gambar 3.17 Perkiraan persen ekstraksi nikel dan besi (Islam, 2024).

3.4 Produksi Ferokromium dari Bijih Kromium

Produksi baja tahan karat membutuhkan ferokromium. Hingga saat ini, ferokromium dihasilkan dari tanur listrik (*electric furnace*) dengan mengumpankan bijih kromium bersama dengan reduktor dan bahan imbu. Reduktor yang digunakan umumnya berupa kokas. Walaupun demikian, usaha untuk substitusi kokas dengan biomassa sedang dilakukan. Produk ferokromium yang dihasilkan mengandung karbon antara 6-7%. Oleh karenanya, penggunaan ferokromium ini untuk produksi baja tahan karat selalu membutuhkan AOD (*argon oxygen decarburization*) konverter dan / atau VOD (*vacuum oxygen decarburization*) untuk menurunkan kadar karbon sesuai dengan spesifikasi, misal untuk baja tahan karat austenitik AISI 304, kadar

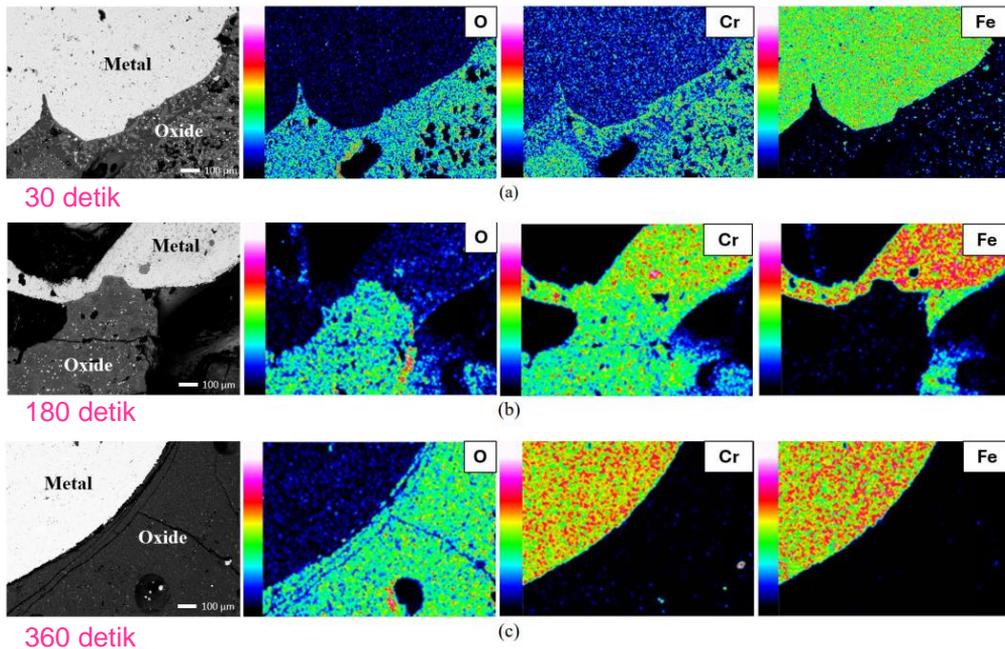
karbon adalah lebih kecil dari 0,08% dan untuk AISI 304L, kadar karbon adalah lebih kecil dari 0,03%.

Hasil percobaan ekstraksi logam dari residu pelindian nikel pada Gambar 3.6 dan produksi feronikel dari bijih nikel laterit pada Gambar 3.15 menunjukkan bahwa kromium oksida dapat direduksi menjadi kromium logam. Oleh karenanya, percobaan produksi ferokromium dalam reaktor HPSR menarik untuk dilakukan. Komposisi kimia bijih kromium ditunjukkan pada Tabel 3.4. Sejumlah 1 gram bijih kromium dicampur dengan 0,2 gram silika sebagai bahan imbuhan dan 1% kanji sebagai pengikat (*binder*) dibuat menjadi briket. Percobaan dalam reaktor HPSR dilakukan dengan variasi waktu 30 hingga 360 detik.

Tabel 3.4 Komposisi kimia bijih kromium dalam persen berat (Dale, 2024)

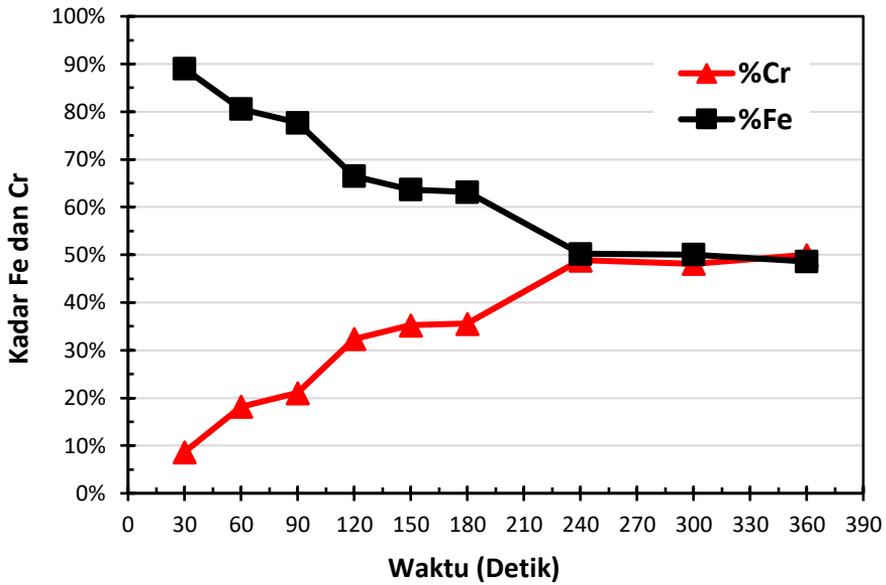
Fe_2O_3	Cr_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	MnO	MgO	Na_2O	TiO_2
27,87	40,64	17,16	1,20	0,22	11,40	0,05	0,69

Hasil analisis SEM-EDS berupa pemetaan unsur oksigen, kromium, dan besi ditunjukkan pada Gambar 3.18. Pada durasi proses HPSR 30 detik terlihat bahwa kadar kromium dalam oksida lebih tinggi dari dalam logam. Peningkatan durasi proses ke 180 detik, kadar kromium dalam logam sedikit lebih tinggi dari dalam oksida. Pada 360 detik, kadar kromium dalam logam jauh lebih tinggi dibandingkan dengan dalam oksida.

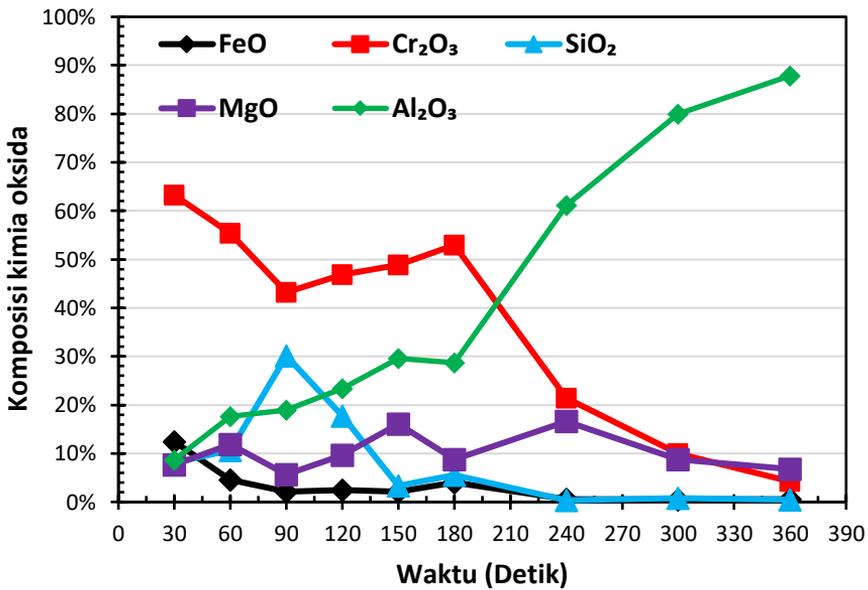


Gambar 3.18 Pemetaan unsur oksigen, kromium dan besi dalam ferrokromium dan oksida produk HPSR (Dale, 2024).

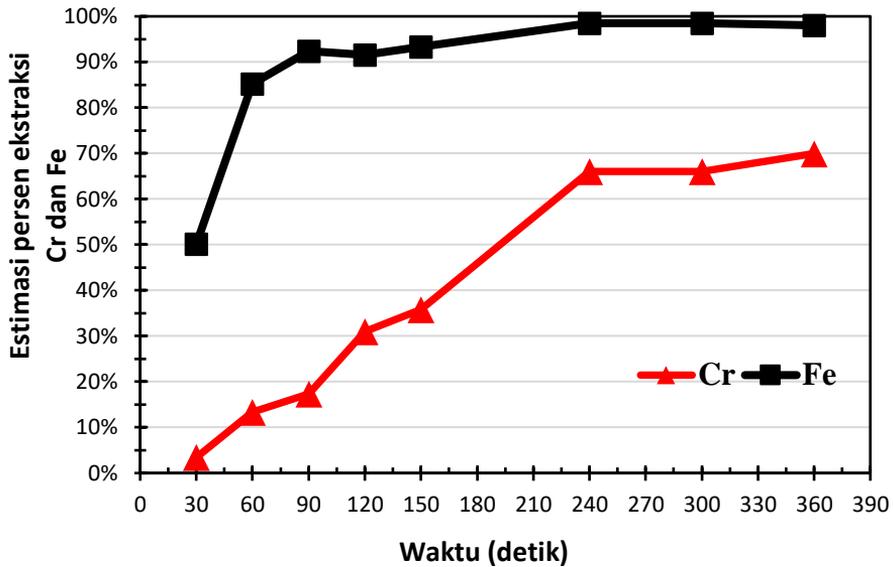
Detail kadar besi dan kromium dalam ferrokromium yang dialurkan dalam bentuk kurva sebagai fungsi waktu ditunjukkan pada Gambar 3.19 di mana terlihat bahwa ferrokromium dapat dihasilkan dalam waktu 240 detik. Komposisi kimia oksida yang dihasilkan ditampilkan pada Gambar 3.20. Kadar kromium dalam oksida masih relatif tinggi, yaitu sekitar 20%. Kadar silika dalam oksida cenderung turun menjadi 3,3% pada 150 detik dan lebih kecil dari 1% pada 240 hingga 360 detik. Kadar silika yang menjadi rendah dapat disebabkan oleh reaksi reduksi silika dengan gas hidrogen menghasilkan gas silikon monoksida. Selain itu, sebagian kecil silikon juga masuk ke dalam logam. Pengaluran estimasi persen ekstraksi kromium dan besi diperlihatkan pada Gambar 3.21. Persen ekstraksi kromium sekitar 66% pada durasi 240 detik dan meningkat menjadi sekitar 70% pada 360 detik. Pada produksi ferrokromium di industri menggunakan tanur listrik, persen ekstraksi kromium berkisar antara 70-92%.



Gambar 3.19 Perubahan komposisi kimia logam ferokromium seiring dengan peningkatan durasi proses peleburan dalam HPSR (Dale, 2024).



Gambar 3.20 Perubahan komposisi kimia oksida pada produksi ferokromium dalam HPSR (Dale, 2024).



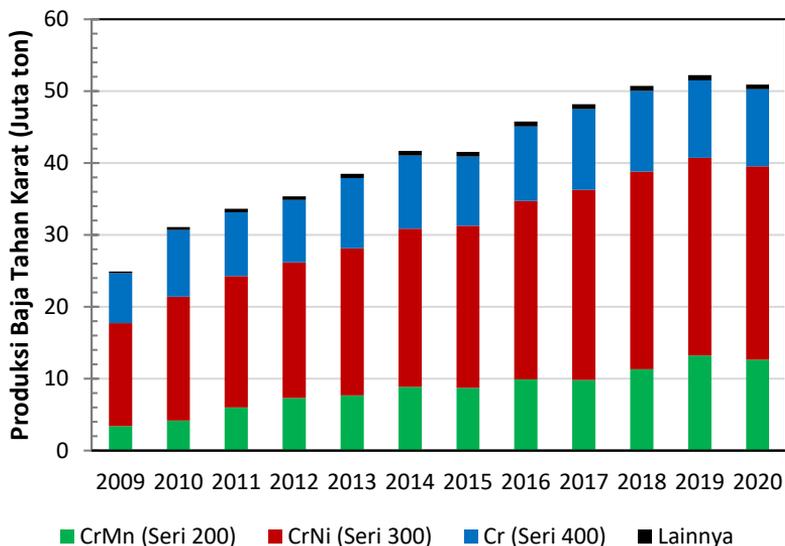
Gambar 3.21 Perkiraan persen ekstraksi kromium dan besi (Dale, 2024).

Hasil percobaan ini mengindikasikan bahwa ferokromium dapat dihasilkan dalam reaktor HPSR. Walaupun demikian, optimasi proses masih perlu dilakukan. Logam ferokromium yang dihasilkan dalam reaktor HPSR memberikan beberapa keuntungan, terutama meniadakan AOD dan / atau VOD untuk produksi baja tahan karat karena produk ferokromium yang dihasilkan tidak mengandung karbon.

3.5 Produksi Baja Tahan Karat dari Campuran Bijih Nikel Laterit dan Bijih Kromium

Baja tahan karat saat ini diproduksi menggunakan AOD konverter dari bahan baku berupa ferokromium, feronikel, serta *ferroalloys* lainnya bergantung pada tipe yang dihasilkan. Baja tahan karat adalah paduan baja dengan kadar kromium minimal 11%. Baja tahan karat yang banyak diproduksi adalah austenitik seri 300, seperti diperlihatkan pada Gambar 3.22. Komposisi kimia dari beberapa baja tahan karat ditunjukkan pada Tabel 3.5. Baja tahan karat tipe AISI 304 yang merupakan austenitik seri 300 termasuk baja tahan karat yang paling banyak dihasilkan. Penggunaan baja tahan karat ini salah satunya adalah untuk sendok makan di mana pada bagian belakang sering tertulis “18/8” yang bermakna sendok tersebut mengandung 18% kromium, 8% nikel

dan sisanya besi serta unsur-unsur minor lainnya kurang dari 4% (silikon, mangan, karbon, dan pengotor seperti fosfor dan sulfur).



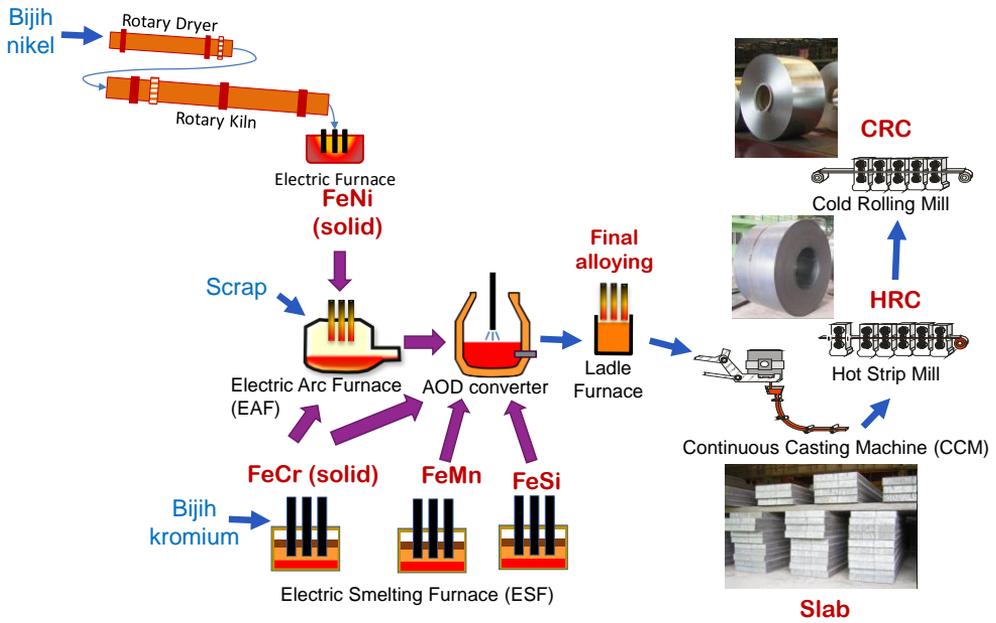
Gambar 3.22 Produksi baja tahan karat dari 2009-2020 (diolah dari www.worldstainless.org).

Tabel 3.5 Komposisi kimia beberapa tipe baja tahan karat (Stahlschlüssel, 2007).

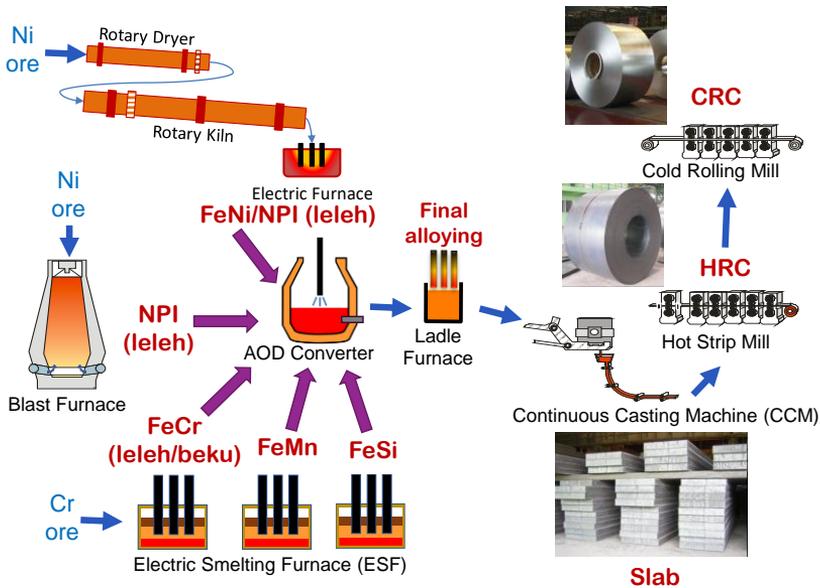
Tipe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Lainnya
AISI 202	≤0,15	≤1,00	7,5 – 10	≤0,060	≤0,030	17 – 19		4 – 6	N ≤ 0,25
AISI 304	≤0,08	≤0,75	≤2,00	≤0,045	≤0,030	18 – 20		8 – 10,5	N ≤ 0,10
AISI 316	≤0,08	≤0,75	≤2,00	≤0,045	≤0,030	16 – 18	2 – 3	10 – 14	N ≤ 0,10
AISI 409L	≤0,03	≤1,00	≤1,00	≤0,045	≤0,030	10,5 – 11,75		≤0,50	Ti ≥ 6 x C ≤ 0,75
AISI 430	≤0,12	≤1,00	≤1,00	≤0,040	≤0,030	16 – 18		≤0,75	N ≤ 0,75
SAF 2205	≤0,03	≤1,00	≤2,00	≤0,030	≤0,020	21 – 23	2,3 – 3,5	4,5 – 6,5	N 0,08 – 0,20

Secara umum, pabrik produksi baja tahan karat tidak terintegrasi dengan pabrik peleburan nikel dan pabrik peleburan kromium sehingga feronikel dan ferokromium harus dilebur terlebih dahulu dalam EAF (*electric arc furnace*) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.23. Sumber kromium berasal dari ferokromium di mana bijih kromium dilebur dalam tanur listrik (ESF, *electric smelting furnace*) menghasilkan produk ferokromium kadar karbon tinggi (HC-FeCr, *high carbon ferrochromium*) dengan kadar karbon 6-7%. HC-FeCr dimurnikan lanjut dengan pengembusan oksigen atau metode lainnya menghasilkan MC-FeCr (*medium carbon ferrochromium*) dan LC-FeCr (*low carbon ferrochromium*). Demikian juga feronikel (FeNi), RKEF dibutuhkan untuk memproses bijih nikel laterit. Baik FeNi, FeCr, dan skrap (baja bekas) dilebur dalam EAF dan dilakukan pemurnian untuk menurunkan kadar

karbon hingga sekitar 1-2%. Proses dekarburisasi selanjutnya dilakukan dalam AOD konverter.



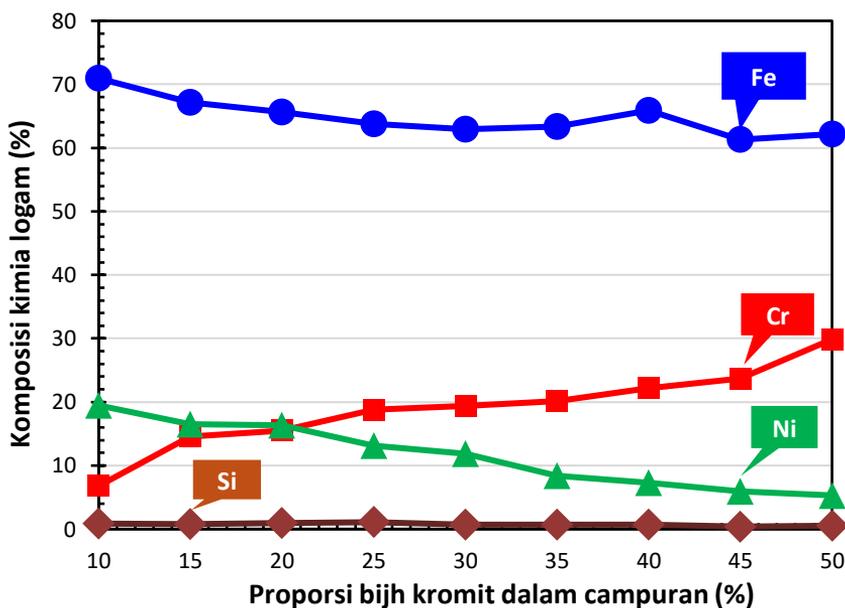
Gambar 3.23 Jalur proses produksi baja tahan karat yang tidak terintegrasi dengan pabrik peleburan nikel.



Gambar 3.24 Jalur proses produksi baja tahan karat yang terintegrasi dengan pabrik peleburan nikel.

Pada pabrik baja tahan karat yang terintegrasi dengan pabrik peleburan nikel (Gambar 3.24), EAF tidak dibutuhkan karena FeNi atau NPI (*nickel pig iron*) dalam keadaan leleh (*molten*) dapat langsung dituang ke AOD konverter untuk proses pemurnian. Jalur proses ini menjadi lebih efisien karena tidak butuh energi untuk melelehkan FeCr dan NPI. Selain itu, kadar nikel dalam NPI yang diproduksi berkisar antara 10 – 12% sehingga tidak membutuhkan skrap sebagai sumber besi pada produksi baja tahan karat.

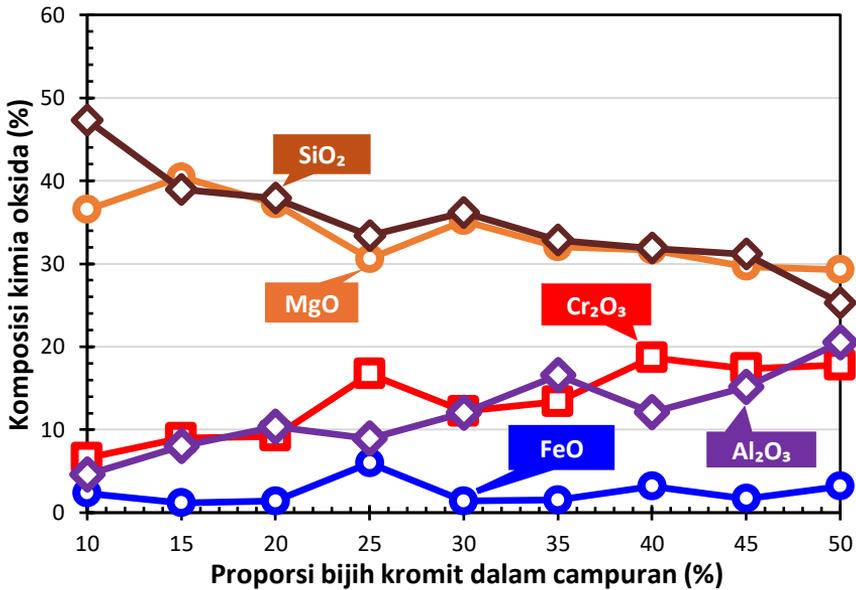
Dengan menggunakan HPSR, jalur produksi baja tahan karat dapat dibuat menjadi lebih pendek. Bijih nikel dan bijih kromium dapat diumpankan ke dalam HPSR dengan proporsi tertentu. Hasil percobaan skala laboratorium telah dilakukan yang diperlihatkan pada Gambar 3.25. Pencampuran 30-35% bijih kromium dan 65 – 70% bijih nikel menghasilkan produk dengan kadar nikel antara 8 – 12% dan kadar kromium 19 – 20%. Komposisi kimia oksida diperlihatkan pada Gambar 3.26 di mana kadar kromium oksida pada campuran tersebut sekitar 13%. Optimasi perlu dilakukan, misal dengan meningkatkan durasi proses dalam HPSR sehingga kadar kromium oksida dapat berkurang.



Gambar 3.25 Perubahan komposisi kimia logam dalam campuran bijih kromium dan bijih nikel selama 180 detik dalam HPSR (Taimullah, 2024).

Hasil peleburan dengan mencampur bijih kromium dan bijih nikel mengindikasikan bahwa satu unit HPSR dapat digunakan untuk menghasilkan baja tahan karat sehingga rute proses menjadi lebih singkat dan tidak membutuhkan peralatan sebagai berikut:

- pabrik RKEF untuk produksi feronikel,
- tanur listrik untuk produksi ferokromium, dan
- AOD konverter untuk pemurnian (dekarburisasi).



Gambar 3.26 Perubahan komposisi kimia oksida (terak) dalam campuran bijih kromium dan bijih nikel selama 180 detik dalam HPSR (Taimullah, 2024).

Seperti telah disampaikan pada subbab 3.3, bijih nikel harus dikalsinasi terlebih dahulu, sehingga peralatan-peralatan yang dibutuhkan untuk produksi baja tahan karat adalah *rotary dryer*, *rotary kiln*, dan HPSR. Komposisi kimia terak pada produksi baja tahan karat dapat diatur dari pencampuran bahan baku berupa bijih dengan penambahan bahan imbuh seminimal mungkin. Produk lelehan baja tahan karat yang dihasilkan dengan HPSR mengandung fosfor dan sulfur rendah sehingga tidak membutuhkan reagen untuk defosforisasi dan desulfurisasi yang umumnya berupa kapur bakar. Emisi gas CO₂ dari proses produksi kapur bakar dapat dihindari termasuk pengurangan aktivitas penambangan batu kapur.

Pada masa mendatang, dengan *bantuan artificial intelligence (AI)*, *machine learning*, dan robot, proses produksi logam termasuk baja karbon, baja spesial,

dan baja tahan karat diibaratkan seperti membuat kopi dengan mesin pembuat kopi otomatis (*coffee machine*). Saat tombol dipencet, mesin tersebut menyiapkan kopi sesuai dengan yang diinginkan dalam waktu singkat. Dengan menggunakan HPSR, bahan baku berupa bijih besi, bijih kromium, bijih nikel yang telah dikalsinasi, dan bahan-bahan lainnya dimasukkan ke dalam bin / bunker / silo HPSR. Komputer menghitung proporsi pencampuran bahan-bahan tersebut dan diumpankan ke dalam reaktor HPSR untuk menghasilkan logam dan paduan logam sesuai dengan yang diinginkan.

4. PENUTUP

Emisi gas CO₂ merupakan salah satu penyebab kenaikan temperatur muka bumi di mana pada bulan Juli 2024 dilaporkan telah naik 1,5 °C dari awal revolusi industri tahun 1800-1850 sebagai rujukan. Usaha-usaha untuk menurunkan emisi gas CO₂ ini sedang dilakukan pada berbagai sektor. Pembangkit listrik beralih dari bahan bakar fosil (batubara, minyak bumi / gas alam) ke EBT (energi baru terbarukan). Di industri transportasi, peralihan dari mesin bakar (ICE, *internal combustion engine*) ke motor listrik menggunakan baterai atau hidrogen sedang giat dilakukan. Alternatif semen selain menggunakan bahan baku batu kapur sedang diteliti. Bahan bakar sebagai sumber energi di industri akan beralih ke hidrogen. Demikian juga di industri baja dan logam lainnya sebagai penyumbang sekitar 8% dari total emisi CO₂, usaha-usaha sedang dilakukan untuk menurunkan emisi gas CO₂ melalui penggantian tanur tiup dengan teknologi tanur tegak menggunakan gas hidrogen sebagai reduktor. Produk yang dihasilkan dari tanur tegak kemudian dilebur dalam tanur listrik menggunakan sumber listrik dari EBT.

Selain itu, penggunaan reaktor plasma hidrogen (HPSR, *hydrogen plasma smelting reduction*) sedang diteliti dan dikembangkan kembali. Teknologi ini sudah pernah didiskusikan pada tahun 1960-an, tetapi tidak berkembang karena teknologi konvensional lainnya telah diimplementasikan dan dikembangkan dengan baik. Saat ini adalah kesempatan dan keharusan untuk mempertimbangkan kembali teknologi HPSR. Percobaan skala laboratorium di Laboratorium Pirometalurgi, Teknik Metalurgi, FTTM ITB, menunjukkan bahwa dalam waktu kurang dari 5 menit, besi logam, feronikel, ferokromium, dan bahkan baja tahan karat dapat dihasilkan dalam satu reaktor HPSR. Selain tidak menghasilkan emisi gas CO₂ karena hidrogen dihasilkan dari elektrolisis air menggunakan listrik dari EBT atau proses "green" lainnya, rute produksi logam dengan HPSR menjadi lebih singkat. Pada proses produksi baja tahan karat, AOD atau VOD tidak dibutuhkan karena ferokromium atau paduan besi kromium nikel yang dihasilkan dari reaktor HPSR tidak mengandung karbon atau kadar karbon sangat rendah. Penggunaan reaktor HPSR untuk produksi logam titanium, logam zirkon, logam timah, logam tanah jarang dan logam-logam lainnya serta ekstraksi logam berharga dari *red mud*, *slag*, residu pelindian (*tailing*) dan lainnya sedang diteliti.

Pengembangan reaktor HPSR masih menjadi tantangan, yaitu keamanan dalam pengoperasian, desain elektroda dan reaktor sehingga reaksi dapat berlangsung secara merata, desain dinding dan atap sehingga tahan temperatur tinggi, penanganan dan injeksi gas hidrogen ke dalam reaktor melalui elektroda, pengumpanan bahan baku ke dalam reaktor, desain reaktor yang kedap dari infiltrasi udara luar, sistem pengeluaran lelehan logam dan terak, serta sistem kendali yang handal baik dalam pengoperasian maupun dalam stabilitas mutu produk yang dihasilkan.

Kerja sama lintas disiplin sangat dibutuhkan untuk merealisasikan reaktor HPSR ke skala pilot hingga ke skala produksi di industri secara komersial.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini, saya mengucapkan terima kasih banyak kepada ibunda (alm. Zubaidah Abubakar), ayahanda (alm. Zulkifli Hanafiah) yang mengasuh, membesarkan, mendidik, mencari nafkah untuk kehidupan dan pendidikan hingga penulis dapat mencapai seperti saat ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada saudara sekandung, Zulfaida (kakak), Zulfahmi (adik), Zulheri (adik), Zulfakriza (adik) atas kebersamaan dan suka duka sejak kecil hingga saat ini. Istri tercinta (Sri Yulis) beserta putra (Aulia Aghna Zulfiadi) dan putri (Sybilla Syailannisa Zulfiadi) atas kebersamaan, dukungan, suka duka, pengertian, serta menemani perjalanan kehidupan dari tahun 1998 hingga saat ini. Ucapan terima kasih kepada para Ibu dan Bapak Guru (SD Negeri Meunasah Dayah, Madrasah Diniyah, SMP Negeri 1 Matangglumpang Dua, SMA Negeri 1 Bireuen) yang telah mendidik dan memberikan ilmu pengetahuan.

Terima kasih banyak kepada Ketua Kelompok Keahlian Teknik Metalurgi, FTTM ITB, (Prof. Syoni Soeprijanto, Prof. Eddy Agus Basuki) dan para rekan dosen Teknik Metalurgi (Dr. Ismi Handayani, Dr. Edy Sanwani, Prof. M. Zaki Mubarak, Dr. Akhmad Ardian Korda, Prof. Siti Khodijah Chaerun, Dr. Taufiq Hidayat, Dr. Imam Santoso, Dr. Tria Laksana Achmad, Dr. Bonita Dilasari, Dr. Wahyudin Prawira Minwal, Dr. Zela Tanlega, Dr. Nurulhuda Halim dan Dadan Suhendar M.T.) yang telah mendukung dalam pengajuan ke Guru Besar.

Ucapan terima kasih kepada para guru dan para dosen senior yaitu Prof. Warjono Soemodinoto (alm.), Bapak Alwi Ibrahim (alm.), Prof. Waspodo Martojo (alm.), Prof. Djamhur Sule (alm.), Bapak Durban Latief Ardjo, Dr. Rozik B. Soetjipto, Prof. Faraz Umar (alm), Dr. Rizal C. Astrawinata, Prof. Sudarto Notosiswoyo, Prof. Irwandy Arif, Prof. Made Astawa Rai, Prof. Totok Darijanto (alm), Prof. Rudy Sayoga Gautama, Prof. Arief Soedarsono (alm.), Dr. Suseno Kramadibrata, Bapak Djoko Widajatno, Dr. Isdiriayani Nurdin, Dr. Muhammad Nurdin, Dr. Aryo Prawoto Wibowo, Ibu Teti Indriati, Dr. R. Budi Sulistijo, Prof. Budi Sulistiano, Prof. Lilik Eko Widodo, Prof. Iswandi Imran atas ilmu pengetahuan dan dedikasinya.

Ucapan terima kasih sangat spesial kepada Dr. Sunara Purwadaria yang telah memberikan banyak ilmu pengetahuan, membimbing saat penelitian tugas akhir sarjana dan penelitian tesis magister di Laboratorium

Elektrometalurgi dan Korosi ITB, mengajak bergabung menjadi dosen di ITB dan menjadi panutan dalam pengembangan laboratorium. Dr. Sunara Purwadaria sudah saya anggap seperti orang tua saat perantauan di Kota Bandung.

Terima kasih banyak kepada Prof. Ridho Kresna Wattimena, Dr. Susanti Alawiyah, Prof. Syafrizal yang telah sangat mendukung dan memperjuangkan dari level fakultas hingga Senat Akademik ITB. Terima kasih kepada Rekan-rekan TPPAK FTTM, Senat FTTM, Prof. Djoko Santoso, Senat Akademik, Forum Guru Besar, Rektor dan jajaran yang mendukung dan memudahkan jalan meraih Guru Besar.

Terima kasih kepada Ibu Nia Siti Ratnasari yang telah membantu menyiapkan dokumen, Ibu Raida Rahmawati dan tim yang telah memberikan banyak informasi dan membantu mengunggah dokumen ke sistem. Terima kasih kepada tenaga kependidikan di FTTM ITB (Ibu Rika Sudradjat dan tim) dan di Teknik Pertambangan / Teknik Metalurgi (Bapak Rusli, Ibu Edeh Sukaedah dan tim) yang telah membantu dan mendukung.

Terima kasih kepada rekan-rekan dan pembimbing yang telah memberikan rekomendasi yaitu Prof. Eddy Agus Basuki (Ketua KK Teknik Metalurgi, FTTM ITB), Prof. Ridho Kresna Wattimena (Dekan FTTM ITB), Prof. Isa Setiasyah Toha (Teknik Industri, FTI ITB), Prof Bambang Suharno (Teknik Metalurgi, Universitas Indonesia), Prof. M. Akbar Ramdhani (Swinburne University of Technology), Prof. Youn-Bae Kang (Pohang University of Science and Technology / Postech, Korea Selatan), Prof. Dieter Senk (Pembimbing Disertasi di RWTH Aachen University, Jerman), Herr Christian Schrade (Tenova Metals Deutschland, Jerman), Bapak Djoko Muljono (PT Krakatau Steel), Dr. Alwin Albar (PT Timah), Dr. I Dewa Wirantaya (PT Antam), Bapak Widodo Setiadharmaji (Indonesian Iron and Steel Industry Association), Dr. Muhammad Hanafi (BK Teknik Metalurgi, Persatuan Insinyur Indonesia), Bapak Bouman Tiroi Situmorang (Asosiasi Profesi Metalurgi Indonesia/Prometindo), dan Mr. Yeoh Wee Jin (South East Asia Iron and Steel Institute). Terima kasih kepada Bapak Setiawan Surakusumah yang sudah mendukung, berdiskusi dan banyak membantu. Terima kasih kepada Prof. Heinrich-Wilhelm Gudenau (alm) dan Prof. Friedrich H. Franke (alm) yang telah membimbing saat menyelesaikan disertasi di RWTH Aachen University, Jerman. Terima kasih kepada Herr

Marijan Velikonja (alm), sebagai guru dan sahabat, saat bergabung di Siemens VAI Metals Technologies GmbH, Duisburg, Jerman.

Terima kasih kepada Bapak Wisma Bharuna (PT Gunbuster Nickel Industry) yang telah menghibahkan satu unit *Scanning Electron Microscope* (JEOL JCM-7000 Neoscope™) sehingga penelitian di Teknik Metalurgi ITB dapat berjalan dengan baik dan lancar.

Terima kasih kepada PT Antam (Bapak Irvan Djauhari, Bapak Tato Miraza, Bapak Achmad Ardianto, Bapak Tedy Badrujaman, Bapak Ajab Taofik Hidayat, Bapak P.J. Tambunan, Bapak I Made Mastana, Bapak Agustiar, Bapak Andre Trifanni, Bapak Agus Triyono, Bapak Hamzah Kurniadani, Bapak Yuli Andisata, Bapak Ulil Amri Nizhamul, Bapak Prasasti Yudaprawira, Bapak Wahyu Dwi Sulakso), PT Krakatau Steel (Bapak Koesnohadi, Dr. Ahmad Sobandi, Bapak Zaenal A Muslim, Bapak I Ketut Sunarwa, Dr. R. Hernanto Wiryomijoyo, Bapak Hedi Mulyatma (alm), Bapak Asep Ahmad Solihudin, Bapak Arief Purnomo), PT Timah (Bapak Purwoko, Bapak Ebbi Wibisana, Bapak Eko Zunianto Saputro, Bapak Kopdi Saragih, Ibu Eka Widiastuti), PT Bumi Mineral Consulindo (Bapak Soenarto), PT BMU Mineral (Bapak Satya Graha Soemantri), Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara Kementerian ESDM (Bapak Andri Budiman Firmanto), MINDID (Ibu Ratih Dewihandajani L), PT Sumber Energi Sukses Makmur (Bapak Zulfian Mirza), PT Tura Consulting (Bapak Resvani), PT Nusantara Smelter Industri Berjaya (Dr. Nurdin Tampubolon, Bapak Dimpos Giarto Valentino Tampubolon), PT Pamapersada Nusantara (Bapak Muhammad Syahrul Rizki), PT Merdeka Battery Materials (Dr. Alexander Senaputra), PT Sebuku Iron Lateritic Ore (Bapak Hendra A. Sugandi), PT Macika Mineral Industri (Bapak John Hendarso), PT Bersahaja Berkat Sahabat Jaya (Bapak Arbi Leo), PT Vale Indonesia (Bapak Muhammad Jinan Syakir), PT Aldzama (Bapak Agus Jayana), PT Halmahera Persada Lygend (Bapak Tonny Gultom), PT Hydrotech Metal Indonesia (Bapak Sucipto Widodo), PT Prima Energi Consult (Bapak Widyaka Kartanegara) yang telah memberikan kesempatan belajar dan mendalami industri logam.

Terima kasih banyak kepada para mahasiswa sarjana dan pascasarjana Teknik Metalurgi ITB yang telah melakukan penelitian di Laboratorium Pirometalurgi dan menghasilkan karya-karya yang dapat dipublikasikan.

Terima kasih kepada Bapak Yopi Hendrawan, Bapak Cep Kusnindar dan Bapak Eky Febrian Hermansyah yang banyak membantu di laboratorium.

Terima kasih kepada Ikatan Alumni Metalurgi ITB, Badan Kejuruan Teknik Metalurgi - Persatuan Insinyur Indonesia, Asosiasi Profesi Metalurgi Indonesia (Prometindo), Persatuan Ahli Pertambangan Indonesia (PERHAPI), Keluarga Masyarakat Aceh Badung (KAMABA) yang telah mendukung.

Terima kasih kepada rekan-rekan alumni Teknik Pertambangan ITB (TA'91) dan MINERUN'91 atas kebersamaan dan persahabatan sejak tahun 1991 hingga saat ini. Terima kasih kepada rekan-rekan Generasi'91 SMAN1 Bireuen dan Alumni SMPN1 '88 MTG.

Terima kasih kepada para pihak yang belum dapat disebutkan satu per satu.

DAFTAR PUSTAKA

- 15 Essential things to know about the Eiffel Tower,
<https://www.toureiffel.paris/en/news/history-and-culture/15-essential-things-know-about-eiffel-tower>
- Badr, K., 2007. Smelting of iron oxides using hydrogen based plasmas. Doctoral Thesis, Montanuniversitaet Leoben.
- Baeck, E., 1998. Schmelzreduktion von Eisenoxiden mit Argon-Wasserstoff-Plasma. Doctoral Thesis, Montanuniversitaet Leoben.
- Barcza, N.A., Curr, T.R., Jones, R.T., 1990. Metallurgy of open-bath plasma processes. *Pure & Appl. Chem.* 62(9), 1761-1772.
- Coudurier, L., Hopkins, D.W., Wilkomirsky, I., 1978. Fundamentals of metallurgical processes. Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt.
- Dembovsky, V., 1987. Zur Fragen der Thermodynamik und Reaktionskinetik in der Plasmametallurgy. *Neue Huette.* 32, 214-219.
- Draxler, M., Sormann, A., Kempken, T., Hauck, T., Pierret, J.-C., Borlee, J., Di Donato, A., De Santis, M., Wang, C., 2021. Technology assessment and roadmapping. *Green Steel for Europe.*
https://www.estep.eu/assets/Projects/GreenSteel4Europe/GreenSteel_Publication/EXEC_Sum/Technology-Assessment-and-Roadmapping.pdf
- English Patents, No. 4208 of 1878 and No. 2110 of 1879.
- Flemmings, M.C., Ragone, D.V., 2009. Puddling: a metallurgical perspective. *Historical Metallurgy*, 43 (2), 103-108.
- Fruehan, R.J., Overview of steelmaking processes and their development. *Making, Shaping and Treating of Steel: Steelmaking Volume*, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, USA.
- Global mean temperature (12-month moving average)
<https://berkeleyearth.org/wp-content/uploads/2024/08/Annual-July2024.png>

- Grahita, L., Zulhan, Z., Hidayat, T., 2022. High temperature reduction of bauxite residue. *Mater. Proc.* 5(1), 128.
<https://doi.org/10.3390/materproc2021005128>
- Guo, X., Yu, J., Zhang, Y., Liu, L., Li, X., Liao, H., Ren, Z., 2018. Deep deoxidization from liquid iron by hydrogen plasma arc melting. 43(27), 12153-12157. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.035>
- Hakim, B., 2024. Produksi logam besi dari bijih besi limonit menggunakan hydrogen plasma smelting reduction (HPSR). Tugas Akhir. Teknik Metalurgi, FTMM – ITB.
- Hannah, R., 2020. Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from? <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>
- Hiebler, H., Plaul, J.F., 2004. Hydrogen plasma smelting reduction – An option for steelmaking in the future. *Metalurgija.* 43(3), 155-162.
- Hybrit hydrogen-derived steel programme to move towards industrial scale. <https://www.hydrogeninsight.com/industrial/hybrit-hydrogen-derived-steel-programme-to-move-towards-industrial-scale/2-1-1699380>
- Injection of hydrogen into blast furnace: thyssenkrupp Steel concludes first test phase successfully. <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/newsroom/press-releases/thyssenkrupp-steel-concludes-first-test-phase-successfully.html>
- Islam, N., 2024. Produksi *green* feronikel menggunakan hydrogen plasma smelting reduction (HPSR). Tesis Magister. Teknik Metalurgi, FTMM – ITB.
- Jahrbuch Stahl, 1965 – 2001, Verlag Stahleisen, Duesseldorf.
- Jones, R.T., DC arc furnaces – past, present and future. The Minerals, Metals & Materials Society, 2014.
- Kamiya, K., Kitahara, N., Morinaka, I., Sakuraya, K., Ozawa, M., Tanaka, M., 1984. Reduction of molten iron oxide and FeO bearing slags by H₂-Ar plasma. *Trans. ISIJ.* 24, 7-16. <https://sci-hub.se/10.2355/isijinternational1966.24.7>
- Kannan, R., Stevens, A.G., Fancher, C., Rahman, O., Miller, R., Ward, J., Ziabari, A.K., Babu, S.S., Nandwana, N., 2024. Reduction kinetics of hematite powder using argon/hydrogen plasma with prospects for near

net shaping of sustainable iron. *Sustainable Mater. Technol.* 40, e00879.
<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00879>

Laporan Kinerja Badan Geologi 2023,
<https://geologi.esdm.go.id/storage/publikasi/UnUOnnFWHSDoKTbDhFWosRjvPrmDrJeiD7t2gO6e.pdf>

Levina, G., 2021. Reduksi terak feronikel dengan batubara dan ferrosilikon dalam suasana vakum untuk menghasilkan magnesium dan paduan besi. Tesis. Teknik Metalurgi, FTTM ITB.

McCullough, R.J., 1962. Plasmarc furnace, a new concept in melting metals. *JOM.* 14, 907-911. <https://doi.org/10.1007/BF03378203>

Nabilah, A.J., 2023. Studi pembuatan feronikel dari bijih nikel saprolit dengan menggunakan gas metana melalui simulasi RKEF skala laboratorium. Tugas Akhir, Teknik Metalurgi, FTTM – ITB.

Ökvist, L.S., Lundgren, M., From, L.-E., Eck, J., Kjellberg, M., Ahmed, H., 2024. Realization of bio-coal injection into the blast furnace. *Metals*, 14(9), 969. <https://doi.org/10.3390/met14090969>

Rickard, T.A., 1941. The use of meteoric iron. *J. R. Anthropol. Inst.* 71(1/2), 55-66.

Roan, A.J., 2024. Boston Metal is forging green steel. *Metal Tech News*.
<https://www.metaltechnews.com/story/2024/05/29/tech-bytes/boston-metal-is-forging-green-steel/1784.html>

Sabat, K.C., Murphy, A.B., 2017. Hydrogen plasma processing of iron ore. *Metall. Mater. Trans. B.* 48B, 1561-1594. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-0957-1>

Saputri, A.D., 2023. Pengaruh variasi temperatur reduksi dan proporsi penambahan reduktor cangkang kelapa sawit terhadap pembentukan logam besi dan penghilangan sulfur pada residu pelindian bijih nikel laterit. Tugas Akhir, Teknik Metalurgi, FTTM ITB.

Satritama, B., Zulhan, Z., Wulandari, W., Sasongko, D., Al Hakim, A.Y., Hidayat, T., 2024. The impacts of temperature, gas composition and reaction time on the reduction of saprolite nickel ore under hydrogen-argon atmosphere. *Metall. Mater. Trans. B.* 55, 396-408.
<https://doi.org/10.1007/s11663-023-02965-4>

- Seftejani, M.N., 2020. Reduction of hematite using hydrogen plasma smelting reduction. Doctoral Thesis, Montanuniversitaet Leoben.
- Sormaan, A., 1992. Untersuchungen zur Schmelzreduktion von Eisenoxiden mit Wasserstoff als Reduktionsmittel. Doctoral Thesis, Montanuniversitaet Leoben.
- Souza Filho, I.R., Ma, Y., Kulse, M., Ponge, D., Gault, B., Springer, H., Raabe, D., 2021. Sustainable steel through hydrogen plasma reduction of iron ore: Process, kinetics, microstructure, chemistry. *Acta Materialia*. 213, 116971. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116971>
- Statista, <https://www.statista.com/>
- Steinberg WS, Geysler W, Nell J. The history and development of the pyrometallurgical processes at Evraz Highveld Steel & Vanadium. *J South Afr Inst Min Metall*. 2011;111:705. <https://www.saimm.co.za/Conferences/Pyro2011/063-Steinberg.pdf>
- Taimullah, A., 2024. Produksi baja tahan karat AISI seri 300 dari bijih nikel laterit dan bijih kromium menggunakan hydrogen plasma smelting reduction (HPSR). Tesis Magister. Teknik Metalurgi, FTSM – ITB.
- Tandersen, D., 2024. Produksi *green* ferkromium dari bijih kromit menggunakan *hydrogen plasma smelting reduction* (HPSR). Tesis Magister. Teknik Metalurgi, FTSM – ITB.
- Thyssenkrupp to build €2 billion hydrogen-powered DRI plant for low-CO2 steel. <https://greensteelworld.com/thyssenkrupp-to-build-e2-billion-hydrogen-powered-dri-plant-for-low-co2-steel>
- Ure, C.R., 2000. Alternative ironmaking at BHP New Zealand Steel. 2000 Electric Furnace Conf. Proc., Iron and Steel Society, Warrendale, PA, 535. <http://digital.library.aist.org/pages/PR-324-067.htm>
- U.S. Geological Survey, <https://www.usgs.gov/>
- Vermeulen, P., 2009. Uncovering the potential of ultra-low cost steel making using titanomagnetite ores in blast furnace based mills. https://www.vulcantech.com.au/_files/ugd/3beb76_bb3f013e22fe40d182f4d529278c637f.pdf
- Vogel, D., 1988. Untersuchungen zur Schmelzreduktion von eisen-, chrom-, vanadium- und titanhaltigen Oxidschmelzen mit übertragenem

- Gleichstrom-Plasmabogen in kohlenwasserstoffhaltigen Reduktionsatmosphären. Doctoral Thesis, RWTH Aachen.
- Wagner, A.E.M., Díaz, A.D., Dalvi, A.D., Mackey, P.J., Tarasov, A.V., 2006. JOM world nonferrous smelter survey, part III: nickel: laterite. JOM. April, 11-20.
- Wakelin, D.H., Ricketts, J.A., 1999. The nature of ironmaking. Making, Shaping and Treating of Steel: Ironmaking Volume, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, USA.
- Weigel, A., 1984. Grundlagenuntersuchungen zur Plasma-Schmelzreduktion von Eisenerz mit stationär brennenden übertragenen Gleichstrom-Lichtbögen in wasserstoff- und methanhaltigen Atmosphären. Doctoral Thesis, RWTH Aachen.
- What is the Paris Agreement? <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- Wiesinger, H., 2000. Bewertung der Wasserstoffschmelzreduktion zur Stahlerzeugung. Doctoral Thesis, Montanuniversitaet Leoben.
- Wilder, A.B., 1949. The bessemer converter process. JOM, 1, 20-28.
- Worldsteel Association, <https://worldsteel.org/>
- Zamzammi, A.I., 2018. Studi pemanfaatan red mud untuk memperoleh logam besi menggunakan reduktor batubara dengan metode isothermal – gradien temperatur. Tugas Akhir, Teknik Metalurgi, FTSM ITB.
- Zarl, M., 2023. Climate neutral steelmaking. Linz, https://www.wiva.at/wp-content/uploads/2023/12/04_Zarl_K1MET_freigegeben.pdf
- Zulhan, Z., Fauzian, I.M., Hidayat, T., 2020. Ferro-silico-manganese production from manganese ore and copper smelting slag. J. Mater. Res. Technol. 9 (6), 13625-13634. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.079>
- Zulhan, Z., 2020. Hilirisasi komoditas nikel. Webinar Lembaga Kajian Nawacita, Masa Depan Nikel Indonesia.
- Zulhan, Z., Agustina, N., 2021a. A novel utilization of ferronickel slag as a source of magnesium metal and ferroalloy production. J. Cleaner Prod. 292, 125307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125307>
- Zulhan, Z., Adhiwiguna, I.B.G.S, Fuadi, A., Saleh, N. 2021b. Solid-state reduction of an Indonesian iron sand concentrate using subbituminous

- coal. *Can. Metall. Q.* 60 (1), 12-20.
<https://doi.org/10.1080/00084433.2021.1918508>
- Zulhan, Z., Lo, F. 2021c. Iron nugget formation from iron sand/coal composite pellets under isothermal-temperature gradient profiles. *Ironmaking Steelmaking.* 48 (9), 1022-1029.
<https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1859346>
- Zulhan, Z., Hidayat, T., Adzana, Z., Munawaroh., M., Yusro, A.H., Dinary, R., Sucipto, W., Saputri, A.D., Christian, J.D., 2022a. Metode pemisahan sulfur dan ekstraksi besi secara simultan dari sisa hasil pengolahan (SHP) pelindian bijih nikel laterit. Patent pending, P00202213521.
- Zulhan, Z., Suryani, I., Jamali, I., Santoso, I., Hidayat, T., 2022b. Segregation of Iron and Titanium in an Iron Sand Concentrate Pellet Using the Isothermal-Temperature Gradient Profile. *Min. Metall. Explor.* 39, 875-883. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00576-2>
- Zulhan, Z., Husnaa, Z., Basuki, E.A., 2022c. Effect of briquette thickness on iron nugget formation in fluxless processing of iron sand concentrate under isothermal – temperature gradient profiles. *ISIJ Int.* 62(3), 487-495.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-358>
- Zulhan, Z., Sutandar, C.L., Suryani, I., Basuki, E.A., 2022d. Effect of temperature patterns on iron nugget formation in fuxless processing of titanomagnetite. *Sci. Rep.* 12, 8941. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12968-x>
- Zulhan, Z., Hakim, B., Hendrawan, Y., Hidayat, T., Hermansyah, E.F., Yusro, A.H., Pambudi, A.L., 2024a. Rapid iron extraction from nickel leaching residue by a hydrogen plasma smelting reduction. *J. Mater. Res. Technol.* 30, 5346-5355. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.205>
- Zulhan, Z., A'an, M., Kamal, F., Djaja, S.D.S., Hidayat, T., Salmanhakim, R.M.N., Situmorang, B.T., Rahmat, N., 2024b. Municipal solid waste as a potential reducing agent for substituting coal in ferronickel production. *J. Sustainable Metall.* <https://doi.org/10.1007/s40831-024-00884-5>

CURRICULUM VITAE



Nama : Zulfiadi Zulhan
Tempat/tgl lahir : Aceh Utara / 28 Januari 1973
Kel. Keahlian : Teknik Metalurgi
Alamat Kantor : Gedung Mineral
dan Energi, Lt. 6,
Jl. Ganesa No. 10, Bandung
Nama Istri : Sri Yulis
Nama Anak : Aulia Aghna Zulfiadi,
Sybilla Syailannisa Zulfiadi

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

1979 – 1985 : SD Negeri Meunasah Dayah, Peusangan, Bireuen, Aceh
1985 – 1988 : SMP Negeri 1, Matangglumpang Dua, Bireuen, Aceh
1988 – 1991 : SMA Negeri 1, Bireuen, Aceh
1991 – 1996 : Sarjana, Teknik Pertambangan, Opsi Metalurgi, Institut
Teknologi Bandung
1997 – 2000 : Magister, Rekayasa Pertambangan, Rekayasa Korosi, Institut
Teknologi Bandung
2001 – 2002 : Deutsche Sprachprüfung für den Hochschulgang
ausländischer Studienbewerber (DSH), Goethe Institut, Jakarta
dan Mannheim, Jerman
2002- 2006 : Doktor, Institut für Eisenhüttenkunde (Institute for Ferrous
Metallurgy), RWTH Aachen University, Jerman
2020-2021 : Insinyur, Program Profesi Insinyur, Institut Teknologi
Bandung

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

1998 – 2006 : Dosen Teknik Pertambangan
2006 – sekarang: Dosen Teknik Metalurgi
2015 – sekarang: Kepala Laboratorium Pirometalurgi
2018 – 2020 : Ketua Program Studi Teknik Metalurgi
2024 – sekarang: Ketua Kelompok Keahlian Teknik Metalurgi
2024 – sekarang: Anggota Senat FTTM
2024 – sekarang: Anggota Senat Akademik ITB

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

Penata Muda	(III/a) : 1 Februari 1998
Penata	(III/c) : 1 April 2015
Penata Tingkat I	(III/d) : 1 April 2027
Pembina	(IV/a) : 1 April 2024

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

Asisten Ahli Madya	: 1 Oktober 2000
Asisten Ahli	: 19 Oktober 2001
Lektor	: 1 November 2014
Guru Besar	: 1 Agustus 2023

V. KEGIATAN PENELITIAN

- Desulfurisasi lelehan baja dengan injeksi bubuk dalam Ruhrstahl Heraeus (RH Degasser), Technometal GmbH, Jerman, 2012
- Pemisahan arsen dan antimon dalam konsentrat timah melalui proses pemanggangan oksidasi-reduksi dan klorinasi, PT Timah, 2014
- Pengembangan teknologi pengolahan dan peleburan pasir besi serta bijih besi laterit menjadi produk besi spon atau pig iron/hot metal sebagai bahan baku pembuatan baja di Indonesia, Insentif Riset Nasional, 2014
- Pemisahan besi logam dan oksida dari pelet/briquet pasir besi menggunakan reduktor bed batubara pada temperatur 1400 C: pengujian laboratorium dan aplikasi di industri. Penelitian kompetitif nasional, Skema Ipteks, 2015-2016
- Studi simulasi pengembusan oksigen di ladle, PT Antam, 2017
- Studi reduksi bijih nikel laterit dengan reduktor batubara dan penambahan katalis, PT Antam, 2017
- Studi defosforisasi HC-feronikel pada kondisi reduktif menggunakan tanur induksi, PT Antam, 2018
- Pemanfaatan terak tembaga sebagai bahan baku pembuatan paduan *ferro-manganese-silicon*. P3MI – ITB, 2019
- Studi ekstraksi logam magnesium dan ferroalloy dari slag feronikel, MINDID, 2019
- Penggunaan konsentrat pasir besi dalam pengembangan produksi besi dan baja: karakterisasi dan percobaan skala laboratorium, PT Krakatau Steel, 2021

- Substitusi batubara dengan gas hidrogen dan biomassa pada peleburan bijih nikel, Riset ITB, 2022
- Analisis pengaruh SiO₂/MgO, temperatur dan bahan imbuah pada interaksi slag-refraktori, PT Antam, 2022
- Pemanfaatan sisa hasil pengolahan (SHP) bijih nikel laterit dengan teknologi STAL (*step temperature acid leach*) sebagai bahan baku industri besi dan baja dalam mewujudkan *Zero Waste* pengolahan bijih nikel laterit dan meningkatkan *circular economy*, Penelitian Terapan Kompetitif Nasional, 2022-2023
- Studi ekstraksi logam silikon dari pasir silika melalui percobaan skala laboratorium, PT Antam, 2023
- Substitusi batubara dengan peuyeumisasi sampah sebagai reduktor pada pabrik peleburan bijih nikel laterit. Riset ITB, 2023
- Produksi logam besi dalam reaktor plasma hidrogen, PPMI - FTTM, 2024

VI. PUBLIKASI

- Zulhan, Z., Ryanta, I.G.P.A., 2018. Utilization of gypsum byproduct as fuming agent for tin smelting slag, *J. Sustainable Metall.* 4(3), 388-394.
<https://doi.org/10.1007/s40831-018-0185-1>
- Zulhan, Z., Fauzian, I.M., Hidayat, T., 2020. Ferro-silico-manganese production from manganese ore and copper smelting slag. *J. Mater. Res. Technol.* 9 (6), 13625-13634.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.079>
- Zulhan, Z., Agustina, N., 2021. A novel utilization of ferronickel slag as a source of magnesium metal and ferroalloy production. *J. Cleaner Prod.* 292, 125307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125307>
- Zulhan, Z., Shalat, W., 2021. Evolution of ferronickel particles during the reduction of low-grade saprolitic laterite nickel ore by coal in the temperature range of 900–1250°C with the addition of CaO-CaF₂-H₃BO₃. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 28(4), <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2025-0>
- Zulhan, Z., Adhiwiguna, I.B.G.S, Fuadi, A., Saleh, N. 2021. Solid-state reduction of an Indonesian iron sand concentrate using subbituminous coal. *Can. Metall. Q.* 60 (1), 12-20.
<https://doi.org/10.1080/00084433.2021.1918508>

- Zulhan, Z., Lo, F. 2021. Iron nugget formation from iron sand/coal composite pellets under isothermal-temperature gradient profiles. *Ironmaking Steelmaking*. 48 (9), 1022-1029. <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1859346>
- Zulhan, Z., Hidayat, T., Adzana, Z., Munawaroh., M., Yusro, A.H., Dinary, R., Sucipto, W., Saputri, A.D., Christian, J.D., 2022. Metode pemisahan sulfur dan ekstraksi besi secara simultan dari sisa hasil pengolahan (SHP) pelindian bijih nikel laterit. Patent pending, P00202213521.
- Hidayat, T., Siregar, M.Y., Santoso, I., Zulhan, Z., 2022. The effects of reductant and additive on the magnesium extraction from calcined dolomite via metallothermic reduction under vacuum condition. *Vacuum*. 202, 111196. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111196>
- Zulhan, Z., Suryani, I., Jamali, I., Santoso, I., Hidayat, T., 2022. Segregation of Iron and Titanium in an Iron Sand Concentrate Pellet Using the Isothermal-Temperature Gradient Profile. *Min. Metall. Explor.* 39, 875-883. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00576-2>
- Zulhan, Z., Husnaa, Z., Basuki, E.A., 2022. Effect of briquette thickness on iron nugget formation in fluxless processing of iron sand concentrate under isothermal - temperature gradient profiles. *ISIJ Int.* 62(3), 487-495. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-358>
- Zulhan, Z., Sutandar, C.L., Suryani, I., Basuki, E.A., 2022. Effect of temperature patterns on iron nugget formation in fluxless processing of titanomagnetite. *Sci. Rep.* 12, 8941. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12968-x>
- Santoso, I., Sibarani, D., Hidayat, T., Zulhan, Z., Sukhomlinov, D., Chen, M., Klemettinen, L., Taskinen, P., Lindberg, D., Jokilaakso, A., 2024. Phase equilibria of the Na₂O-TiO₂-SiO₂ system between 900 and 1600°C in air. *J. Am. Ceram. Soc.* 107 (9), 6307-6322. <https://doi.org/10.1111/jace.19845>
- Zulhan, Z., Hakim, B., Hendrawan, Y., Hidayat, T., Hermansyah, E.F., Yusro, A.H., Pambudi, A.L., 2024. Rapid iron extraction from nickel leaching residue by a hydrogen plasma smelting reduction. *J. Mater. Res. Technol.* 30, 5346-5355. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.205>
- Zulhan, Z., A'an, M., Kamal, F., Djaja, S.D.S., Hidayat, T., Salmanhakim, R.M.N., Situmorang, B.T., Rahmat, N., 2024. Municipal solid waste as a potential reducing agent for substituting coal in ferronickel

production. J. Sustainable Metall. <https://doi.org/10.1007/s40831-024-00884-5>

VII. PENGHARGAAN

- 2006: Ludwig von Bogdandy Award, Institut für Eisenhüttenkunde (Institute for Ferrous Metallurgy), RWTH Aachen University, Jerman
- 2008: Borchersplakette, RWTH Aachen University, Jerman
- 2011: Pemakalah terbaik, Seminar Material Metalurgi 2011
- 2015: Satyalancana Karya Satya X Tahun, Presiden Republik Indonesia
- 2022: Satyalancana Karya Satya XX Tahun, Presiden Republik Indonesia
- 2023: Pengabdian 25 Tahun Institut Teknologi Bandung, Rektor ITB

VIII. SERTIFIKASI

- 2018: Insinyur Profesional Madya (IPM), Persatuan Insinyur Indonesia
- 2024: Insinyur Profesional Utama (IPU), Persatuan Insinyur Indonesia

ITB PRESS

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
👤 Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
📄 APPTI No. 005.062.1.10.2018

**Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id  [FgbItb](https://www.facebook.com/FgbItb)  [FGB_ITB](https://twitter.com/FGB_ITB)
📸 [@fgbitb_1920](https://www.instagram.com/fgbitb_1920)  [Forum Guru Besar ITB](https://www.youtube.com/ForumGuruBesarITB)

ISBN 978-623-297-591-0

