



PENGOLAHAN MINERAL II **EKSTRAKTIF METALURGI**

GYAN PRAMESWARA
EDITOR : ARI NUR CHINTIA



PENERBIT AL ARSY MEDIA

PENGOLAHAN MINERAL II EKSTRAKTIF METALURGI

PENULIS:

GYAN PRAMESWARA

EDITOR:

ARI NUR CHINTIA

PENERBIT

PENERBIT AL ARSY MEDIA

PENGOLAHAN MINERAL II

EKSTRAKTIF METALURGI

Penulis : Gyan Prameswara, M.Eng.

Editor : Ari Nur Chintia

Penerbit : Penerbit Al Arsy Media

ISBN : 978-623-10-2499-2

Tahun : 2024

Hak cipta dilindungi Undang-Undang No. 28 Tahun 2014

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa seizing tertulis oleh penerbit.

KATA PENGANTAR

Dengan penuh antusias, buku yang berjudul "Pengolahan Mineral II: Ekstraktif Metalurgi" memperkenalkan pembaca pada dunia kompleks pengolahan mineral. Buku ini merupakan buku pengantar untuk mata kuliah Pengolahan Mineral II. Dibuat khusus untuk kalangan perguruan tinggi dan masyarakat umum, buku ini mengulas secara komprehensif proses-proses hidrometalurgi, pirometalurgi, dan elektrometalurgi yang mendefinisikan esensi dari ekstraktif metalurgi.

Buku ini menjadi panduan untuk mahasiswa dan pembaca dari berbagai lapisan masyarakat, menyajikan pemahaman yang mendalam tentang teknologi-teknologi modern yang mendasari industri pengolahan mineral. Dalam bahasa yang ringkas namun informatif, buku ini memberikan penjelasan yang jelas dan terarah mengenai bagaimana mineral diolah menjadi logam bernilai tinggi.

Pembahasan mengenai hidrometalurgi membuka wawasan tentang penggunaan pelarut dalam proses pengolahan mineral, sementara pirometalurgi merinci proses transformasi melalui pemanasan. Elektrometalurgi, di sisi lain, memaparkan bagaimana energi listrik dapat dioptimalkan untuk pemisahan logam dari mineralnya.

Dengan tujuan memberikan gambaran yang mencakup segala aspek, buku ini dirancang untuk menjadi sumber pengetahuan yang dapat diakses oleh mahasiswa yang belajar di bidang ilmu pengolahan mineral. Namun demikian, penjelasan yang disajikan juga diarahkan agar dapat dicerna dengan baik oleh pembaca umum yang ingin memahami lebih dalam proses-proses kompleks di balik industri pengolahan mineral.

Buku ini adalah hasil kajian yang berkomitmen secara mendalam menguraikan setiap aspek pengolahan mineral. Harapannya, buku ini dapat menjadi alat bermanfaat bagi pembaca dari berbagai latar belakang, memperkaya pengetahuan mereka tentang industri yang mendukung perkembangan ekonomi dan sumber daya global.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam pembuatannya dan berharap dapat memberikan manfaat yang substansial bagi para pembaca, mendorong pemahaman yang lebih dalam tentang dunia yang kompleks namun penuh potensi ini.

Salam hangat,

Gyan Prameswara

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	x
Bab 1_Pengenalan pada Metalurgi Ekstraktif.....	1
1.1. Definisi dan Ruang Lingkup Metalurgi Ekstraktif.....	1
1.2. Peran Penting Metalurgi Ekstraktif dalam Industri Pengolahan Mineral.....	3
1.3. Sejarah Perkembangan Metalurgi Ekstraktif	8
Bab 2_Sumber Daya Mineral	10
2.1. Jenis-jenis Mineral dan Logam.....	10
2.2. Sumber Daya Mineral di Indonesia	16
2.3. Penambangan Mineral	18
Bab 3_Prinsip Dasar Metalurgi Ekstraktif.....	25
3.1. Konsep Termodinamika dalam Pengolahan Mineral	25
3.2. Diagram Fase.....	29
3.2.1. Unary Systems.....	31
3.2.2. Binary system	32
3.2.3. Ternary phase system.....	37
3.3. Diagram Keseimbangan dalam Larutan.....	44
3.4. Reduksi dan oksidasi logam	55
3.4.4. Reduksi.....	55
3.4.5. Oksidasi.....	55
3.4.6. Diagram Ellingham.....	56

Bab 4	Proses-proses Metalurgi Ekstraktif.....	67
4.1.	Proses Hidrometalurgi	67
4.1.1.	Leaching	67
4.1.2.	Presipitasi kimia	75
4.1.3.	Ion exchange (pertukaran ion)	81
4.1.4.	Solvent extraction (ekstraksi pelarut)	84
4.2.	Proses Pirometalurgi.....	89
4.2.1.	Kalsinasi	89
4.2.2.	Roasting.....	92
4.2.3.	Smelting	96
4.3.	Proses Elektrometalurgi.....	100
4.3.1.	Konsep Dasar	100
4.3.2.	Elektrowinning	102
4.3.3.	Elektro Refining	105
Bab 5	Pengolahan Beberapa Mineral menjadi Logam.....	110
5.1.	Laterite/Hematite menjadi Besi	110
5.2.	Nikel Sulfida menjadi Logam Ni.....	113
5.3.	Kalkopirit menjadi Cu (Pirometalurgi).....	118
5.4.	Bastnasite, monasit dan senotim menjadi Logam Tanah Jarang ...	124
Bab 6	Pengolahan Limbah Pengolahan Mineral.....	130
6.1.	Pengolahan Tailing dan Manajemen	130
6.2.	Manajemen air.....	135
6.2.1	Neraca air.....	136
Daftar Pustaka	138

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Flowchart umum pengolahan mineral ekstraktif (Sumber: Fuerstenau & Han, 2009)	2
Gambar 2.1 Mineral hematit (Sumber: Mindat.org, 2023)	11
Gambar 2.2 Mineral galena (Sumber: Mindat.org, 2023).....	11
Gambar 2.3 Mineral kalsit (Sumber: Mindat.org, 2023).....	12
Gambar 2.4 Mineral kuarsa (Sumber: Mindat.org, 2023).....	13
Gambar 2.5 Mineral gips (Sumber: Mindat.org, 2023).....	14
Gambar 2.6 Mineral halit (Sumber: Mindat.org, 2023)	15
Gambar 2.7 Emas native (Sumber: Mindat.org, 2023)	15
Gambar 2.8 Peta mineral Indonesia (Sumber: (Hidayat et al., 2020))	18
Gambar 2.9 Penambangan terbuka (Sumber: (Michaud, 2018)).....	19
Gambar 2.10 Metode penambangan bawah tanah (Sumber: Michaud, 2018).....	20
Gambar 2.11 Metode penambangan placer (Sumber: The Editors of Encyclopaedia, 2010).....	20
Gambar 2.12 Metode penambangan submarin (Sumber: Lee et al., 2012) ..	21
Gambar 3.1 Diagram fase Ni-Cu.....	33
Gambar 3.2 Diagram fase Cu-Ni.....	34
Gambar 3.3 Sifat dari variasi Cu-Ni.....	37
Gambar 3.4 Ternary phase diagram	38
Gambar 3.5 Liquid plot dari diagram fase terner	39
Gambar 3.6 Isotermal plot dari diagram fase terner	39
Gambar 3.7 Plot isopleth.....	41
Gambar 3.8 Segitiga Gibbs	42
Gambar 3.9 Segitiga Gibbs dengan garis komposisi	43
Gambar 3.10 Diagram Pourbaix Fe	48
Gambar 3.11 Diagram Pourbaix air	50
Gambar 3.12 Pengaruh konsentrasi logam terhadap diagram Pourbaix.....	51
Gambar 3.13 Pengaruh temperatur terhadap diagram Pourbaix.	53
Gambar 3.14 3 zona dalam diagram Pourbaix	54
Gambar 3.15 Diagram Ellingham.....	57
Gambar 3.16 Kestabilan oksidasi logam Al dan Fe	59
Gambar 3.18 Perubahan fase logam	62

Gambar 3.19 Peran PO ₂ pada diagram Ellingham	64
Gambar 3.20 Peran rasio CO/CO ₂ pada diagram Ellingham.....	66
Gambar 4.1 Penyusutan inti dan perluasan product layer pada SCM	69
Gambar 4.2 Profil konsentrasi logam pada partikel menggunakan model film layer diffusion mengontrol jalannya leaching	70
Gambar 4.3 Profil konsentrasi logam pada partikel menggunakan model ash layer diffusion mengontrol jalannya leaching	71
Gambar 4.4 Profil konsentrasi logam pada partikel menggunakan model reaksi pada permukaan inti mengontrol jalannya leaching	72
Gambar 4.5 Tahapan proses leaching	73
Gambar 4.6 Perilaku konversi saat proses leaching.....	75
Gambar 4.7 Perbedaan larutan saturated, unsaturated dan supersaturated ...	78
Gambar 4.8 Skema pertukaran ion Na ⁺ dan Ca ²⁺	84
Gambar 4.9 Skematik proses ekstraksi pelarut	85
Gambar 4.10 Tipikal proses ekstraksi pelarut pada pengolahan mineral	86
Gambar 4.11 Entalpi dan perubahan energi bebas Gibbs untuk kalsinasi limestone	92
Gambar 4.12 Diagram kesetimbangan “Predominance area” untuk roasting Fe dan Cu pada 700 °C.....	95
Gambar 4.13 Contoh mineral kalkopirit hasil roasting selama 8 jam (Wan et al., 2020)	95
Gambar 4.14 Proses sintering pada pembuatan logam Fe (Bizhanov & Chizhikova, 2020).....	97
Gambar 4.15 Pembentukan molten Fe dan slag di dalam blast furnace (Flowers et al., 2023).....	99
Gambar 4.16 Diagram alir proses leaching-elektrowinning	102
Gambar 4.17 Skema proses elektrowinning logam	104
Gambar 4.18 Elektrowinning Cu dari CuSO ₄	105
Gambar 4.19 Contoh proses electrorefining logam Cu dari anoda Cu, Au, dan Zn	108
Gambar 4.20 Cu setelah proses elektrowinning	109
Gambar 5.1 Rute pengolahan mineral besi oksida menjadi logam Fe/baja (Dunne et al., 2019).....	110
Gambar 5.2 Neraca massa blast furnace (Dunne et al., 2019)	112
Gambar 5.3 Plant layout blast furnace (Dunne et al., 2019)	112

Gambar 5.4 Pengolahan Ni sulfida secara umum (Faris et al., 2023)	115
Gambar 5.5 Pengolahan Ni concentrate menjadi matte Ni (Faris et al., 2023).....	116
Gambar 5.6 Flowsheet pengolahan Ni sulfida untuk menjadi berbagai produk (Dunne et al., 2019).....	118
Gambar 5.7 Pengolahan kalkopirit menjadi logam Cu melalui rute pirometalurgi (Dunne et al., 2019).	119
Gambar 5.8 Mineral kalkopirit	121
Gambar 5.9 Kegunaan masing-masing REE pada industri (Dunne et al., 2019).....	125
Gambar 5.10 Flowsheet pengolahan logam tanah jarang dari bastnaesite (Chi et al., 2004).....	126
Gambar 6.1 Tailing continuum (Dunne et al., 2019).	132
Gambar 6.2 Cross valey (Dunne et al., 2019).....	134
Gambar 6.3Paddock (Dunne et al., 2019).....	134
Gambar 6.4 In-pit disposal (Dunne et al., 2019).....	135
Gambar 6.5 Commingle / co-disposal (Dunne et al., 2019).....	135
Gambar 6.6 Neraca air pada fasilitas penyimpanan tailing	137

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Contoh beberapa pengolahan logam dari bijih melalui proses yang ditampilkan pada Gambar 1.1	3
Tabel 4.1 Nilai Half cell potential dari beberapa reaksi redoks	45

Bab 1

Pengenalan pada Metalurgi Ekstraktif

1.1. Definisi dan Ruang Lingkup Metalurgi Ekstraktif

Metalurgi ekstraktif adalah cabang ilmu teknik yang berkaitan dengan pemisahan, pemurnian, dan pengolahan mineral dan logam dari bahan baku alam seperti bijih mineral. Tujuan utama dari metalurgi ekstraktif adalah untuk mengubah bahan baku tersebut menjadi produk akhir yang memiliki nilai ekonomi, seperti logam murni yang dapat digunakan dalam berbagai industri.

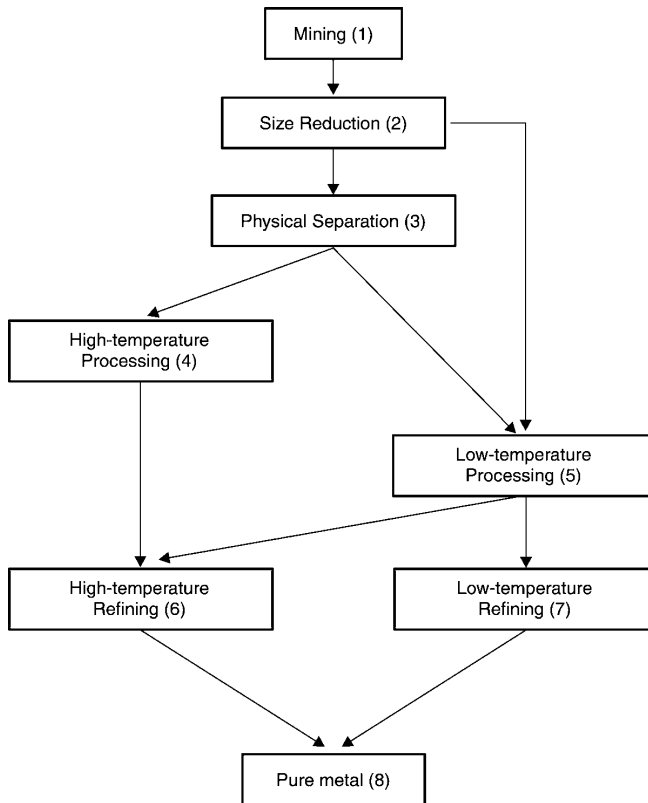
Ruang lingkup metalurgi ekstraktif sangat luas dan mencakup berbagai aspek dalam pengolahan mineral dan logam. Beberapa aspek kunci yang termasuk dalam ruang lingkungannya adalah:

Pertama, dalam metalurgi ekstraktif, proses utama adalah pemisahan komponen berharga dari bijih mineral dan pemurnian mereka hingga mencapai tingkat kemurnian yang tinggi. Ini melibatkan teknik seperti flotasi, pengendapan, dan proses kimia lainnya. Selanjutnya, metalurgi ekstraktif mencakup berbagai proses pengolahan, termasuk pirometalurgi (proses panas), hidrometalurgi (proses cairan), dan elektrometalurgi (proses listrik). Setiap jenis proses ini memiliki aplikasi khusus tergantung pada jenis bijih dan tujuan pengolahan.

Pemahaman yang baik tentang termodinamika dan kinetika reaksi kimia juga sangat penting dalam metalurgi ekstraktif. Ini mencakup analisis energi, kesetimbangan fase, dan laju reaksi. Selain itu, metalurgi ekstraktif terus berkembang dengan adanya inovasi teknologi. Ini mencakup penggunaan teknologi canggih seperti proses berbasis bioteknologi, nanoteknologi, dan otomatisasi dalam pengolahan mineral. Dalam konteks keberlanjutan, metalurgi ekstraktif juga mempertimbangkan dampak lingkungan dari proses-prosesnya. Ini termasuk upaya untuk mengurangi limbah, penggunaan air, dan emisi gas rumah kaca. Terakhir, keselamatan dan kesehatan kerja adalah aspek penting dalam metalurgi ekstraktif karena

melibatkan pengolahan bahan berbahaya. Ini mencakup peraturan, pelatihan, dan praktik terbaik untuk menjaga keselamatan pekerja.

Dengan pemahaman definisi dan ruang lingkup metalurgi ekstraktif yang mendalam. Subbab ini juga akan membantu pembaca mengenali berbagai aspek yang akan mereka pelajari lebih mendalam selama studi mereka dalam bidang metalurgi ekstraktif. Flowchart pengolahan mineral melalui ekstraktif metalurgi disajikan pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Flowchart umum pengolahan mineral ekstraktif (Sumber: Fuerstenau & Han, 2009)

Tabel 1.1 Contoh beberapa pengolahan logam dari bijih melalui proses yang ditampilkan pada Gambar 1.1

Logam	Sumber mineral	Langkah yang dilalui berdasarkan Gambar 1.1							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Besi	Hematit (Fe_2O_3)	X	X	X	X		X		X
	Magnetite (Fe_3O_4)								
Aluminium	Gibbsite (Al_2O_3)	X	X			X	X		X
	Diaspore ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$)								
Tembaga	Kalkopirit (CuFeS_2)	X	X	X	X	X		X	X
	Kalkosit (Cu_2S)								
Zinc	Sphalerite (ZnS)	X	X	X	X		X		X
Timbal	Galena (PbS)	X	X	X	X		X		X
Emas	Native Au	X	X	X		X	X		X
Platinum	Native Pt	X	X	X		X		X	X
	Platinum sulfida								
Perak	Native Ag	X	X	X		X	X		X

1.2. Peran Penting Metalurgi Ekstraktif dalam Industri Pengolahan Mineral

Industri pertambangan adalah salah satu pilar utama dalam perekonomian global, menghasilkan berbagai macam mineral dan logam yang penting untuk berbagai aplikasi industri. Dari emas hingga besi, dari timah hingga tembaga, bijih mineral mentah menjadi bahan baku berharga yang perlu melalui serangkaian proses kompleks sebelum dapat digunakan dalam berbagai produk. Inilah di mana peran sentral dari metalurgi ekstraktif muncul.

Subbab ini akan membahas peran yang sangat penting yang dimainkan oleh metalurgi ekstraktif dalam industri pertambangan. Kami akan menjelajahi bagaimana proses-proses yang terlibat dalam metalurgi ekstraktif berkontribusi pada peningkatan kualitas dan kuantitas produksi, penelitian inovatif, dan keberlanjutan industri.

- Peran Sentral dalam Pengolahan Mineral: Metalurgi ekstraktif memiliki peran kunci dalam industri pertambangan karena bertanggung jawab atas pengolahan bijih mineral menjadi produk akhir yang memiliki nilai ekonomi. Ini mencakup pemisahan dan pemurnian mineral berharga dari bijih yang seringkali terdiri dari campuran mineral yang kompleks. Pengolahan mineral adalah tahap kritis dalam rantai pasokan industri pertambangan. Bijih mineral yang ditambang dari penambangan seringkali mengandung campuran mineral yang beragam, termasuk mineral berharga dan non-berharga. Peran sentral dari metalurgi ekstraktif adalah memisahkan mineral berharga ini dari bijih mentah dan memrosesnya menjadi produk akhir yang memiliki nilai ekonomi yang tinggi.
 1. **Pemisahan Mineral Berharga:** Salah satu aspek penting dalam pengolahan mineral adalah kemampuan untuk memisahkan mineral berharga, seperti emas, perak, tembaga, atau besi, dari mineral non-berharga yang biasanya ada dalam bijih yang sama. Proses-proses seperti flotasi, gravitasi, dan magnetik digunakan untuk mencapai pemisahan ini.
 2. **Pemurnian:** Setelah mineral berharga dipisahkan, langkah selanjutnya adalah pemurnian. Ini berarti menghilangkan kontaminan atau mineral non-berharga yang mungkin tersisa dalam mineral yang diinginkan. Proses pemurnian dapat melibatkan penggunaan kimia atau proses panas, tergantung pada mineral yang diproses.
 3. **Peningkatan Kemurnian:** Metalurgi ekstraktif juga memainkan peran penting dalam meningkatkan kemurnian mineral dan logam. Hal ini terutama penting dalam produksi logam yang digunakan dalam industri tingkat lanjut, di mana kemurnian yang tinggi adalah prasyarat.
 4. **Efisiensi Proses:** Selain itu, metalurgi ekstraktif berfokus pada peningkatan efisiensi proses pengolahan mineral. Ini termasuk upaya untuk mengurangi kerugian selama proses, mengoptimalkan konsumsi energi, dan mengurangi limbah.

5. **Inovasi Teknologi:** Industri pertambangan selalu mencari inovasi teknologi yang dapat meningkatkan pengolahan mineral. Sebagai contoh, penggunaan teknologi canggih seperti pemrosesan berbasis bioteknologi atau nanoteknologi telah menjadi bagian dari pembaruan dalam metalurgi ekstraktif.
 6. **Keamanan dan Kesehatan Kerja:** Selain memproses mineral, peran sentral metalurgi ekstraktif juga mencakup memastikan keamanan dan kesehatan pekerja yang terlibat dalam operasi pengolahan. Hal ini mencakup penegakan standar keselamatan, pelatihan pekerja, dan pengelolaan resiko dalam lingkungan kerja yang seringkali berbahaya.
- **Meningkatkan Kualitas dan Kuantitas Produksi:** Metalurgi ekstraktif membantu meningkatkan kualitas produk akhir dan kuantitas produksi. Proses-prosesnya memungkinkan peningkatan kemurnian logam, mengurangi kontaminasi, dan memastikan bahwa bijih dieksploitasi dengan efisien. Salah satu peran utama metalurgi ekstraktif adalah meningkatkan kualitas dan kuantitas produksi dalam industri pertambangan. Ini dicapai melalui berbagai cara:
 1. **Kualitas Produk Akhir:** Metalurgi ekstraktif bertanggung jawab untuk memastikan produk akhir memiliki tingkat kemurnian yang tinggi dan memenuhi standar kualitas yang ditentukan. Ini meningkatkan nilai ekonomi produk tersebut.
 2. **Peningkatan Kemurnian:** Proses pemisahan dan pemurnian dalam metalurgi ekstraktif membantu meningkatkan kemurnian mineral dan logam, yang penting dalam aplikasi industri yang mengharuskan produk dengan kualitas tinggi.
 3. **Efisiensi Proses:** Melalui inovasi teknologi dan pengoptimalan proses, metalurgi ekstraktif membantu mengurangi kerugian selama proses pengolahan bijih, sehingga meningkatkan kuantitas produksi yang efektif.
 4. **Penanganan Bijih:** Metalurgi ekstraktif mengembangkan teknik untuk menangani bijih yang sulit diproses sehingga bijih yang sebelumnya tidak ekonomis dapat diolah dengan efisien.

- Penelitian dan Pengembangan Inovatif: Cabang ini juga merupakan pusat penelitian dan pengembangan inovatif. Melalui penelitian, metalurgi ekstraktif terus mencari cara untuk meningkatkan efisiensi proses, mengurangi dampak lingkungan, dan mengembangkan teknologi baru untuk memproses jenis bijih yang lebih sulit. Penelitian dan pengembangan (R&D) adalah pilar utama dalam metalurgi ekstraktif. Berikut adalah aspek kunci:
 1. **Inovasi Teknologi:** Metalurgi ekstraktif terus melakukan penelitian untuk mengembangkan teknologi baru yang dapat meningkatkan efisiensi proses, mengurangi dampak lingkungan, dan mengatasi tantangan pengolahan bijih yang lebih kompleks.
 2. **Pembaruan Proses:** R&D dalam metalurgi ekstraktif mendorong pembaruan dalam proses-proses pengolahan. Contohnya, penggunaan teknologi berbasis bioteknologi atau nanoteknologi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.
 3. **Penelitian Material:** Penelitian dalam pemilihan material dan penggunaan bahan-bahan baru membantu meningkatkan performa produk akhir dan mengurangi biaya produksi.
 4. **Keberlanjutan:** Penelitian juga berfokus pada pengembangan proses yang lebih berkelanjutan, termasuk penggunaan energi yang lebih efisien dan pengelolaan limbah yang lebih baik.
 5. **Kolaborasi Industri-Akademik:** Kerjasama antara industri dan institusi akademik dalam penelitian metalurgi ekstraktif mendorong pertukaran pengetahuan dan inovasi.
- Keberlanjutan dan Lingkungan: Dalam era keberlanjutan, metalurgi ekstraktif memiliki peran penting dalam meminimalkan dampak negatif pada lingkungan. Ini termasuk pengelolaan limbah, penggunaan energi yang lebih efisien, dan mengurangi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh industri pertambangan. Perhatian terhadap keberlanjutan dan lingkungan adalah aspek penting dalam metalurgi ekstraktif:
 1. **Pengelolaan Limbah:** Metalurgi ekstraktif bekerja untuk mengurangi limbah dan residu yang dihasilkan selama proses

pengolahan bijih. Ini termasuk upaya untuk mendaur ulang atau memanfaatkan limbah yang dihasilkan.

2. **Efisiensi Energi:** Upaya dilakukan untuk mengoptimalkan penggunaan energi dalam proses metalurgi dengan mengurangi konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca.
 3. **Air dan Tanah:** Pemantauan dan pengendalian polusi air dan tanah adalah bagian penting dari praktik metalurgi yang berkelanjutan. Ini membantu menjaga ekosistem lokal dan keseimbangan lingkungan.
 4. **Pengembangan Teknologi Bersih:** Penelitian terus berlanjut dalam pengembangan teknologi bersih untuk mengurangi dampak lingkungan dari proses metalurgi, termasuk penggunaan teknologi ramah lingkungan.
 5. **Kepatuhan terhadap Peraturan:** Metalurgi ekstraktif mematuhi peraturan dan standar lingkungan yang berlaku, yang membantu melindungi lingkungan dan mendukung praktik yang berkelanjutan.
- Dukungan Terhadap Industri Lain: Industri-industri lain juga sangat bergantung pada produk yang dihasilkan oleh metalurgi ekstraktif. Logam dan mineral yang diproses dalam metalurgi ekstraktif digunakan dalam berbagai sektor ekonomi, termasuk konstruksi, otomotif, teknologi, dan banyak lagi.
 - Penciptaan Lapangan Kerja: Metalurgi ekstraktif juga berperan dalam menciptakan lapangan kerja dalam industri pertambangan. Ini mencakup pekerjaan dalam pengoperasian pabrik pengolahan mineral, penelitian dan pengembangan, serta posisi terkait lainnya.
 - Kontribusi pada Ekonomi Nasional: Industri pertambangan, yang terkait erat dengan metalurgi ekstraktif, dapat menjadi salah satu kontributor utama pada ekonomi nasional. Penerimaan dari ekspor mineral dan logam yang dihasilkan dapat signifikan dalam mendukung pembangunan ekonomi negara.
 - Keamanan dan Kesehatan Kerja: Selain itu, metalurgi ekstraktif juga memiliki tanggung jawab terhadap keamanan dan kesehatan kerja dalam pengolahan bijih mineral yang seringkali berbahaya. Ini

mencakup penerapan standar keselamatan, pelatihan karyawan, dan perawatan fasilitas.

1.3. Sejarah Perkembangan Metalurgi Ekstraktif

- Zaman Kuno:
 1. Zaman Perunggu (sekitar 3000 SM - 2000 SM): Metalurgi ekstraktif dimulai pada masa ini ketika manusia pertama kali mulai mengenal logam. Logam tembaga diekstraksi dari bijih tembaga dengan memanaskannya pada suhu tinggi. Tembaga ini digunakan untuk membuat perkakas dan senjata.
 2. Penggunaan Logam (sekitar 2000 SM - 1000 SM): Penggunaan logam seperti perak dan timah semakin meluas di Mesir Kuno dan wilayah Timur Tengah. Pada masa ini, manusia memahami lebih baik tentang sifat-sifat logam dan cara memprosesnya.

- Zaman Besi:

Awal Zaman Besi (sekitar 1100 SM - 800 SM): Zaman besi dimulai, yang melibatkan penggunaan besi sebagai logam yang penting. Proses pembuatan besi dari bijih besi dengan menggunakan tungku tinggi menjadi teknik utama.

- Abad Pertengahan:

Pengolahan Logam di Eropa (sekitar 1000 M - 1500 M): Selama Abad Pertengahan, teknik metalurgi terus berkembang di Eropa. Besi ditempa menjadi senjata dan perkakas yang sangat penting untuk perkembangan masyarakat dan perang.

- Zaman Modern:

1. Revolusi Industri (sekitar 1600 M - 1800 M): Revolusi Industri dimulai di Inggris dan membawa perubahan besar dalam metalurgi ekstraktif. Penggunaan teknologi seperti mesin uap mempercepat proses produksi logam dan mineral.
2. Inovasi Proses (sekitar 1700 M - 1800 M): Proses baru dalam metalurgi termasuk pengolahan batu bara, pembuatan baja dengan

proses Bessemer, dan penemuan aluminium secara komersial menjadi tren penting dalam pengolahan mineral.

- Abad ke-20:
 1. Pemrosesan Logam (1900 M): Zaman Modernisasi membawa kemajuan besar dalam metalurgi ekstraktif. Proses elektrolisis dikembangkan untuk memurnikan logam seperti aluminium dan magnesium. Ini mengubah banyak aspek produksi logam.
 2. Perang Dunia dan Perkembangan Militer (1940-an - 1950-an): Perang Dunia II memotivasi penelitian metalurgi untuk keperluan militer. Pengembangan teknologi seperti pemrosesan uranium untuk proyek bom atom adalah salah satu hasilnya.
- Abad ke-21:
 1. Fokus pada Keberlanjutan (1970-an - 1980-an): Perhatian pada keberlanjutan dan lingkungan mulai memengaruhi praktik metalurgi. Teknologi ramah lingkungan seperti pemurnian emisi gas mulai diterapkan.
 2. Inovasi Terkini (2000-an): Teknologi nanomaterial dan proses pemrosesan berbasis bioteknologi menjadi tren dalam penelitian metalurgi ekstraktif. Efisiensi energi, pengurangan limbah, dan dampak lingkungan menjadi fokus utama.
 3. Masa Depan (2020-an): Inovasi berkelanjutan terus menjadi pusat perhatian dalam upaya untuk mengurangi dampak lingkungan dari industri metalurgi. Penggunaan sumber daya terbarukan dan proses yang lebih efisien diharapkan akan mendominasi perkembangan metalurgi ekstraktif.

Seiring dengan perkembangan teknologi dan pengetahuan ilmiah, metalurgi ekstraktif telah berkembang pesat dari masa kuno hingga era modern. Ini terus menjadi aspek penting dalam industri pertambangan, berkontribusi besar pada ekonomi global dan memainkan peran sentral dalam memenuhi kebutuhan logam dan mineral dunia.

Bab 2

Sumber Daya Mineral

2.1. Jenis-jenis Mineral dan Logam

Subbab ini akan memperkenalkan Anda pada berbagai jenis mineral dan logam yang memainkan peran kunci dalam industri pengolahan mineral dan logam. Pemahaman yang mendalam tentang berbagai jenis mineral dan logam ini adalah esensial bagi siapa saja yang tertarik dalam dunia metalurgi ekstraktif, baik sebagai mahasiswa, peneliti, atau praktisi industri.

Dalam subbab ini, kita akan menjelajahi sifat-sifat fisik dan kimia masing-masing mineral dan logam, serta menggali aplikasi utama mereka dalam berbagai industri. Dari mineral yang digunakan dalam pembuatan kaca hingga logam yang vital dalam pembangunan pesawat terbang, pengetahuan tentang jenis-jenis mineral dan logam ini akan memberikan wawasan yang komprehensif tentang keragaman bahan baku yang digunakan dalam masyarakat modern.

Berikut adalah pengelompokan mineral dari mineral oksida hingga mineral native:

- **Mineral Oksida:**

Mineral oksida adalah mineral yang utama terdiri dari unsur oksigen (O) bersama dengan unsur-unsur lain.

Contoh mineral oksida yang terkenal adalah hematit (Fe_2O_3), yang mengandung besi dan oksigen.

Magnetit (Fe_3O_4) adalah contoh lain dari mineral oksida yang mengandung besi.



Gambar 2.1 Mineral hematit (Sumber: Mindat.org, 2023)

- Mineral Sulfida:

Mineral sulfida terdiri dari unsur-unsur sulfur (S) bersama dengan logam atau non-logam lain.

Misalnya, galena (PbS) adalah mineral sulfida yang mengandung plumbum (Pb) dan sulfur (S).

Pirit (FeS_2) adalah mineral sulfida yang mengandung besi dan sulfur.



Gambar 2.2 Mineral galena (Sumber: Mindat.org, 2023)

- Mineral Karbonat:

Mineral karbonat mengandung unsur karbon (C) dalam bentuk ion karbonat (CO_3).

Kalsit (CaCO_3) adalah contoh mineral karbonat yang mengandung kalsium (Ca), karbon (C), dan oksigen (O).

Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) mengandung kalsium, magnesium, karbon, dan oksigen.



Gambar 2.3 Mineral kalsit (Sumber: Mindat.org, 2023)

- Mineral Silikat:

Mineral silikat adalah kelompok mineral yang paling melimpah dan kompleks, mengandung unsur-unsur seperti silikon (Si) dan oksigen (O), serta unsur logam seperti aluminium (Al), besi (Fe), natrium (Na), dan lainnya.

Quartz (SiO_2) adalah mineral silikat sederhana yang mengandung silikon dan oksigen.

Feldspar adalah kelompok mineral silikat yang umum digunakan dalam industri keramik dan kaca.



Gambar 2.4 Mineral kuarsa (Sumber: Mindat.org, 2023)

- Mineral Sulfat:

Mineral sulfat mengandung ion sulfat (SO_4) bersama dengan unsur-unsur lain.

Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) adalah mineral sulfat yang mengandung kalsium, sulfur, oksigen, dan air.



Gambar 2.5 Mineral gips (Sumber: Mindat.org, 2023)

- Mineral Halida:

Mineral halida mengandung unsur-unsur dari kelompok halogen seperti klorin (Cl), fluorin (F), dan bromin (Br), bersama dengan logam atau non-logam lain.

Halit (NaCl) adalah contoh mineral halida yang mengandung natrium (Na) dan klorin (Cl).

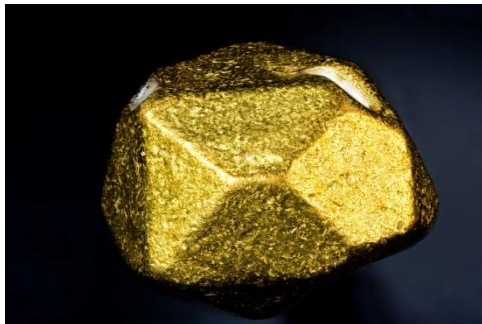


Gambar 2.6 Mineral halit (Sumber: Mindat.org, 2023)

- Mineral Native:

Mineral native adalah mineral yang terdiri dari satu unsur kimia tunggal dalam bentuk murni, tanpa unsur-unsur lain yang terikat padanya.

Contoh mineral native termasuk emas (Au), perak (Ag), tembaga (Cu), dan berilium (Be).



Gambar 2.7 Emas native (Sumber: Mindat.org, 2023)

Pengelompokan mineral ini didasarkan pada komposisi kimia mereka, dan setiap kelompok memiliki karakteristik fisik dan kimia yang unik. Ini adalah dasar penting dalam penelitian geologi, pengolahan mineral, dan berbagai industri yang menggunakan mineral sebagai bahan baku.

2.2. Sumber Daya Mineral di Indonesia

Indonesia adalah salah satu negara yang kaya akan sumber daya mineral. Berikut adalah beberapa sumber mineral utama yang ada di Indonesia:

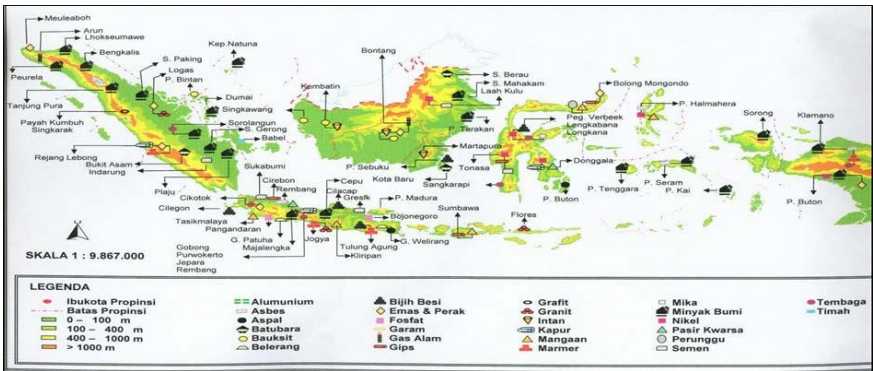
- **Batu Bara:** Indonesia memiliki cadangan batu bara yang sangat besar dan merupakan salah satu produsen terbesar di dunia. Tambang batu bara terutama terdapat di Sumatera dan Kalimantan. Cadangan batu bara terbukti Indonesia mencapai lebih dari 35 miliar ton. Produksi batu bara Indonesia mencapai lebih dari 600 juta ton per tahun, menjadikannya salah satu produsen terbesar di dunia.
- **Tambang Timah:** Indonesia juga merupakan produsen utama timah di dunia. Pulau Bangka dan Belitung adalah pusat pertambangan timah. Indonesia adalah produsen timah terbesar di dunia dengan pangsa pasar global sekitar 35%. Tambang timah terutama terdapat di Pulau Bangka dan Belitung.
- **Nikel:** Indonesia memiliki cadangan nikel yang signifikan, terutama di Sulawesi, Halmahera, dan Papua. Tambang nikel digunakan dalam produksi baja tahan karat dan baterai. Cadangan nikel Indonesia diperkirakan mencapai lebih dari 21 juta ton nikel laterit dan 1,3 juta ton nikel sulfida. Indonesia adalah produsen nikel terbesar kedua di dunia setelah Filipina.
- **Emas dan Perak:** Tambang emas dan perak tersebar di seluruh Indonesia, dengan beberapa tambang terkenal seperti Tambang Grasberg di Papua yang merupakan salah satu tambang emas terbesar di dunia. Produksi emas Indonesia mencapai sekitar 100 ton per tahun. Tambang emas terkenal di Indonesia antara lain Tambang Grasberg di Papua. Cadangan perak Indonesia diperkirakan mencapai ratusan ribu

ton. Perak ditemukan bersama-sama dengan tambang emas di berbagai lokasi.

- **Bauksit:** Bauksit adalah sumber utama aluminium. Cadangan bauksit terbesar di Indonesia terdapat di Pulau Riau dan Kalimantan. Indonesia memiliki cadangan bauksit sekitar 1,3 miliar ton, terutama di Pulau Riau dan Kalimantan. Bauksit digunakan dalam produksi aluminium.
- **Minyak Bumi dan Gas Alam:** Selain mineral padat, Indonesia juga memiliki cadangan minyak bumi dan gas alam yang signifikan di sepanjang pesisir dan lepas pantai. Indonesia adalah produsen minyak bumi terbesar ke-23 di dunia, dengan produksi minyak sekitar 780 ribu barel per hari. Produksi gas alam Indonesia mencapai sekitar 76 miliar kaki kubik per tahun.
- **Batu Gamping:** Batu gamping digunakan dalam industri konstruksi, produksi kapur, dan dalam pembuatan semen. Indonesia memiliki cadangan besar batu gamping di berbagai wilayah. Cadangan batu gamping Indonesia mencapai sekitar 30 miliar ton. Batu gamping digunakan dalam industri konstruksi, semen, dan kapur.
- **Kromium:** Kromium digunakan dalam pembuatan baja tahan karat. Tambang kromium terutama terdapat di Sulawesi Selatan. Cadangan kromium di Indonesia terletak terutama di Sulawesi Selatan. Kromium digunakan dalam pembuatan baja tahan karat.
- **Mineral Berharga:** Selain emas dan perak, Indonesia juga memiliki cadangan mineral berharga lainnya seperti berlian, safir, dan zamrud yang dieksploitasi untuk pasar perhiasan internasional. Indonesia memiliki sumber daya berlian, safir, dan zamrud yang signifikan, yang dieksploitasi untuk pasar perhiasan internasional.
- **Mineral Industri:** Beberapa mineral industri seperti talk, kaolin, dan bentonit juga dieksploitasi di Indonesia untuk berbagai aplikasi dalam industri manufaktur.

Kekayaan sumber daya mineral Indonesia membuatnya menjadi pemain utama dalam industri pertambangan dunia. Ekspor mineral ini memiliki kontribusi besar terhadap perekonomian negara dan menciptakan lapangan kerja. Namun, penting untuk mengelola sumber daya mineral ini dengan

berkelanjutan untuk melindungi lingkungan dan keberlanjutan jangka panjang. Peta sumber daya mineral di Indonesia disajikan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Peta mineral Indonesia (Sumber: (Hidayat et al., 2020))

2.3. Penambangan Mineral

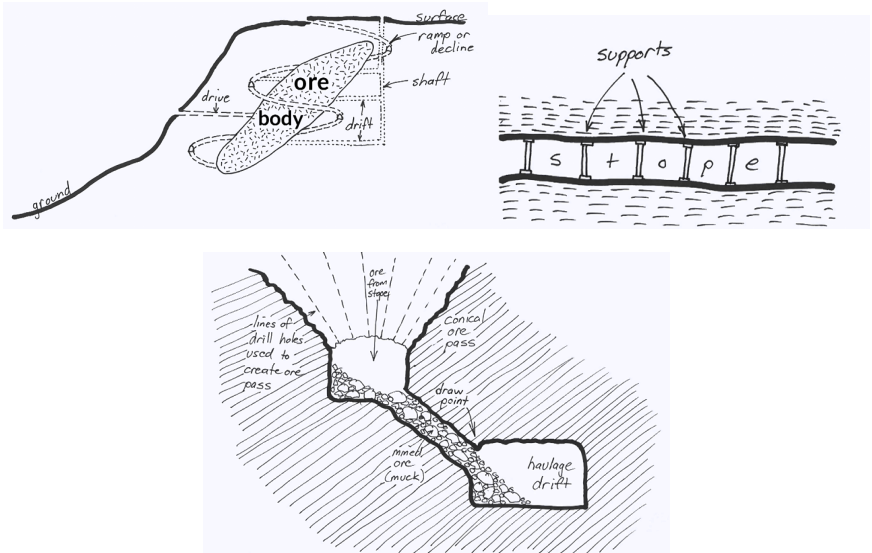
Penambangan mineral adalah proses ekstraksi sumber daya mineral berharga dari bumi. Ini merupakan tahap penting dalam rantai pasokan mineral, yang melibatkan berbagai teknik dan proses untuk mengakses, mengambil, dan memproses mineral.

- a. Metode Penambangan: Subbab ini membahas berbagai metode penambangan yang digunakan, termasuk:
 1. Penambangan Terbuka: Metode ini melibatkan pembukaan tambang di permukaan bumi untuk mengakses deposit mineral. Contohnya adalah tambang batu bara terbuka.



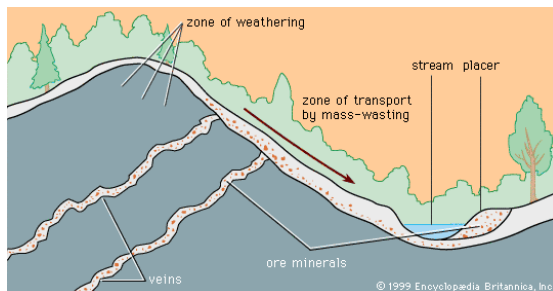
Gambar 2.9 Penambangan terbuka (Sumber: (Michaud, 2018))

2. Penambangan Bawah Tanah: Metode ini digunakan untuk deposit yang terletak di bawah permukaan tanah. Ini melibatkan pembuatan terowongan dan galeri untuk mencapai sumber daya mineral. Tambang emas di dalam gua adalah contoh dari penambangan bawah tanah.



Gambar 2.10 Metode penambangan bawah tanah (Sumber: Michaud, 2018)

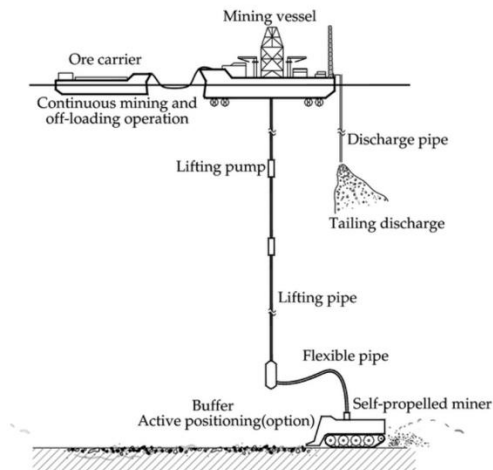
3. Penambangan Placer: Penambangan placer melibatkan ekstraksi mineral dari endapan sedimen sungai dan sungai. Ini umumnya digunakan dalam penambangan emas dan berlian.



Gambar 2.11 Metode penambangan placer (Sumber: The Editors of Encyclopaedia, 2010)

4. Penambangan Submarin: Penambangan mineral dari dasar laut menggunakan peralatan khusus. Ini adalah praktik yang semakin

berkembang untuk mengakses sumber daya mineral di perairan dalam.



Gambar 2.12 Metode penambangan submarin (Sumber: Lee et al., 2012)

- b. Proses Penambangan: Subbab ini menjelaskan proses umum yang terlibat dalam penambangan mineral, termasuk:
 1. Pengeboran dan Peledakan: Ini adalah tahap awal dalam penambangan terbuka, di mana lubang-lubang pengeboran dibuat dan bahan peledak digunakan untuk menghancurkan batuan yang mengandung mineral.
 2. Penggalan dan Pengangkutan: Setelah batuan dihancurkan, batuan yang mengandung mineral diekstraksi dan diangkut ke permukaan untuk diproses lebih lanjut.
 3. Pemrosesan Mineral: Mineral yang diekstraksi dari tambang harus diproses untuk memisahkan mineral berharga dari material limbah. Proses ini bisa melibatkan penghancuran, penggilingan, pemisahan gravitasi, atau proses kimia, tergantung pada jenis mineral yang ditambang.
- c. Permasalahan Lingkungan dan Keberlanjutan: Subbab ini juga membahas dampak penambangan mineral terhadap lingkungan dan

peran penting pengelolaan yang berkelanjutan. Ini termasuk masalah seperti rehabilitasi lahan pasca-tambang, pengendalian pencemaran, dan perubahan iklim terkait dengan industri pertambangan. Penambangan mineral memiliki dampak lingkungan yang signifikan, tetapi dengan tindakan yang tepat, dampak ini dapat dikelola dan dikurangi. Berikut adalah penjelasan lebih rinci tentang penanganan dan solusi permasalahan lingkungan yang disebabkan oleh proses penambangan:

1. Pengendalian Erosi Tanah:

Masalah: Penggalian dan penghapusan vegetasi dapat meningkatkan erosi tanah.

Solusi: Menerapkan teknik konservasi tanah seperti penanaman vegetasi penutup tanah, konstruksi tanggul, dan pengendalian aliran air untuk mengurangi erosi.

2. Pengelolaan Air:

Masalah: Pencemaran air oleh limbah tambang seperti logam berat dan senyawa kimia.

Solusi: Menggunakan kolam sedimentasi dan teknologi pengolahan air untuk mengendalikan pencemaran air. Pengelolaan limbah cair dan peningkatan pengawasan penting.

3. Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca:

Masalah: Emisi gas rumah kaca dari penambangan, terutama metana dari tambang batu bara.

Solusi: Mengumpulkan dan memanfaatkan metana yang terlepas, serta mengurangi ketergantungan pada batu bara melalui transisi ke energi terbarukan.

4. Penggunaan Energi yang Lebih Efisien:

Masalah: Konsumsi energi tinggi dalam proses penambangan.

Solusi: Mengadopsi teknologi yang lebih efisien secara energi, menggunakan energi terbarukan, dan meningkatkan manajemen energi.

5. Rehabilitasi Lahan Pasca-Tambang:

Masalah: Lahan pasca-tambang sering kali dibiarkan gersang dan tidak produktif.

Solusi: Melakukan rehabilitasi lahan pasca-tambang dengan menanam vegetasi asli, memulihkan ekosistem, dan menciptakan habitat yang mendukung keanekaragaman hayati.

6. Monitoring dan Pengawasan yang Ketat:

Masalah: Kegiatan penambangan yang tidak terawasi dengan baik dapat menyebabkan penyalahgunaan lingkungan.

Solusi: Menerapkan pengawasan yang ketat, mengawasi kepatuhan perusahaan pertambangan terhadap peraturan, dan memberikan sanksi yang tegas jika ditemukan pelanggaran.

7. Partisipasi Masyarakat Lokal:

Masalah: Konflik dengan masyarakat lokal yang merasa terpinggirkan atau terdampak negatif oleh penambangan.

Solusi: Melibatkan masyarakat lokal dalam perencanaan, pemantauan, dan manajemen aktivitas penambangan, serta membagikan manfaat ekonomi dengan adil.

8. Teknologi Ramah Lingkungan:

Masalah: Penggunaan teknologi kuno yang tidak ramah lingkungan dalam penambangan.

Solusi: Mengadopsi teknologi yang lebih ramah lingkungan seperti pengeboran dan peledakan yang lebih presisi, penggunaan alat berat yang efisien, dan pemrosesan mineral yang bersih.

9. Peraturan dan Kebijakan yang Ketat:

Masalah: Kurangnya regulasi yang efektif dalam pengelolaan lingkungan di sekitar tambang.

Solusi: Memperketat regulasi dan kebijakan lingkungan, memastikan pematuhan perusahaan pertambangan, dan memberikan insentif untuk praktik berkelanjutan.

Bab 3

Prinsip Dasar Metalurgi Ekstraktif

3.1. Konsep Termodinamika dalam Pengolahan Mineral

Konsep termodinamika adalah bagian penting dalam pengolahan mineral, terutama dalam pemahaman tentang perubahan energi dan keadaan material selama proses ekstraksi dan pemrosesan mineral. Subbab ini mendalami bagaimana prinsip-prinsip termodinamika diterapkan dalam pengolahan mineral, yang mencakup reaksi kimia, suhu, tekanan, dan perubahan fase material.

Termodinamika dan Reaksi Kimia Mineral:

Termodinamika adalah cabang ilmu yang mempelajari hubungan antara energi, panas, kerja, dan perubahan keadaan materi. Dalam konteks pengolahan mineral, termodinamika berperan penting dalam memahami perubahan energi dan keadaan material selama reaksi kimia mineral. Ini membantu kita menentukan apakah reaksi tersebut akan berlangsung secara spontan atau memerlukan energi tambahan. Berikut adalah penjelasan lebih rinci beserta contoh:

1. Konsep Dasar Termodinamika:

Dalam termodinamika, ada beberapa konsep dasar yang relevan, seperti entalpi (H), entropi (S), dan energi bebas Gibbs (G).

Enthalpi (H) adalah jumlah total energi dalam sistem. Ini mencakup energi dalam bentuk panas dan energi potensial kimia.

Entropi (S) adalah ukuran ketidakteraturan dalam sistem. Semakin tinggi entropi, semakin acak sistem tersebut.

Energi Bebas Gibbs (G) adalah ukuran ketersediaan energi sistem untuk melakukan kerja. Perubahan dalam G menentukan arah dan kelangsungan suatu reaksi kimia.

2. Konsep Reaksi Kimia Mineral:

Reaksi kimia mineral melibatkan perubahan dalam komposisi mineral akibat interaksi dengan bahan kimia atau perubahan kondisi lingkungan, seperti suhu dan tekanan.

Contoh reaksi kimia mineral adalah oksidasi bijih logam seperti besi. Ketika besi bereaksi dengan oksigen dalam udara, ia membentuk karat (Fe_2O_3), yang adalah produk reaksi kimia mineral.

3. Termodinamika dalam Reaksi Kimia Mineral:

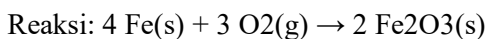
Termodinamika membantu kita memahami apakah reaksi kimia mineral ini akan berlangsung secara spontan atau memerlukan energi tambahan.

Untuk suatu reaksi kimia mineral berlangsung secara spontan, perubahan energi bebas Gibbs (ΔG) harus negatif, yang berarti energi bebas sistem berkurang. Dalam situasi ini, reaksi akan terjadi tanpa bantuan energi eksternal.

Sebaliknya, jika ΔG positif, reaksi memerlukan energi tambahan dan tidak akan berlangsung secara spontan.

4. Contoh: Reaksi Oksidasi Besi:

Salah satu contoh penerapan termodinamika dalam reaksi kimia mineral adalah oksidasi besi:



Dalam reaksi ini, besi padat (Fe) bereaksi dengan oksigen gas (O_2) untuk membentuk besi oksida (Fe_2O_3), yang merupakan senyawa yang biasa disebut sebagai karat.

Untuk menentukan apakah reaksi ini akan terjadi, kita dapat menghitung perubahan energi bebas Gibbs (ΔG). Jika ΔG negatif, reaksi akan berlangsung secara spontan, dan besi akan berkarat.

Delta G (ΔG)

Delta G (ΔG) adalah perubahan energi bebas Gibbs dalam suatu sistem selama suatu reaksi kimia. Ini adalah salah satu konsep paling

fundamental dalam termodinamika kimia dan digunakan untuk menentukan apakah suatu reaksi akan berlangsung secara spontan atau memerlukan energi tambahan. Delta G digunakan untuk mengukur ketersediaan energi sistem untuk melakukan kerja, dan nilainya memberikan petunjuk tentang arah reaksi kimia. Berikut adalah deskripsi lebih rinci beserta contoh:

3.1. Arti Delta G (ΔG):

Delta G mengukur perbedaan antara energi bebas sistem sebelum dan setelah reaksi kimia. Dalam reaksi spontan, energi bebas sistem akan berkurang, dan ΔG akan negatif. Sebaliknya, jika energi bebas sistem meningkat, ΔG akan positif, menunjukkan bahwa reaksi memerlukan energi tambahan.

3.2. Hubungan dengan Kesetimbangan Kimia:

Dalam suatu reaksi kimia pada kondisi kesetimbangan, ΔG akan sama dengan nol. Ini berarti tidak ada perubahan netto dalam energi bebas sistem, dan reaksi berhenti berlangsung secara spontan.

3.3. Persamaan Delta G (ΔG):

ΔG dihitung dengan rumus berikut:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln(Q)$$

Q = konsentrasi produk / konsentrasi reaktan

$$\Delta G^\circ = RT \ln(k_d)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta G_{\text{produk}} - \Delta G_{\text{reaktan}}$$

ΔH adalah perubahan entalpi (panas) selama reaksi.

ΔS adalah perubahan entropi (keteraturan) selama reaksi.

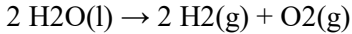
T adalah suhu dalam kelvin (K).

R adalah konstanta gas (8.314 J/(mol.K))

kd adalah konstanta disosiasi

3.4. Contoh: Reaksi Pemisahan Air (H₂O):

- a. Pertimbangkan reaksi pemisahan molekul air (H₂O) menjadi hidrogen (H₂) dan oksigen (O₂):

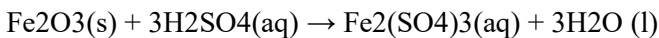


Perubahan entalpi (ΔH) dalam reaksi ini adalah positif karena memerlukan energi untuk memisahkan molekul air.

Perubahan entropi (ΔS) dalam reaksi ini adalah positif karena meningkatnya ketidakteraturan saat gas hidrogen dan oksigen terbentuk.

Jika suhu (T) dalam reaksi ini cukup tinggi, ΔS akan memiliki pengaruh lebih besar dibandingkan dengan ΔH , dan ΔG akan negatif, menunjukkan bahwa reaksi pemisahan air ini akan berlangsung secara spontan pada suhu yang tinggi.

- b. Reaksi leaching Fe₂O₃ (hematit) menggunakan asam sulfat (H₂SO₄) berlangsung sebagai berikut, dan konsentrasi Fe₂O₃ = 1 M, H₂SO₄ = 2 M, serta Fe₂(SO₄)₃ = 0.5 M.



(ΔG°) pada 300 K:

$$\Delta G^\circ_f(\text{Fe}_2\text{O}_3) = -742 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G^\circ_f(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3) = -2263 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G^\circ_f(\text{H}_2\text{O}) = -237 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G^\circ_f(\text{H}_2\text{SO}_4) = -690 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G^\circ = [\Delta G^\circ_f(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3) + 3\Delta G^\circ_f(\text{H}_2\text{O})] - [\Delta G^\circ_f(\text{Fe}_2\text{O}_3) + 3\Delta G^\circ_f(\text{H}_2\text{SO}_4)]$$

$$\Delta G^\circ = [(-22633 \text{ kJ/mol}) + 3(-237 \text{ kJ/mol})] - [-742 \text{ kJ/mol} + 3(-690 \text{ kJ/mol})]$$

$$\Delta G^\circ = -162 \text{ kJ/mol}$$

$$Q = (0.5 \text{ M}) / (1.0 \text{ M} * (2.0 \text{ M})^3)$$

$$Q = 0.5 / 16.0 = 0.03125$$

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln(Q)$$

$$\Delta G = (-162 \text{ kJ/mol}) + (8.314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}) * 300 \text{ K} * \ln(0.03125)$$

$$\Delta G = -162 \text{ kJ/mol} + 7472.3 \text{ J/mol} * \ln(0.03125)$$

$$\Delta G \approx -162 \text{ kJ/mol} + (-10.58 \text{ kJ/mol})$$

$$\Delta G \approx -172.58 \text{ kJ/mol}$$

Jadi pada 300 K reaksi tersebut dapat terjadi secara spontan (nilai $\Delta G =$ negatif)

3.5. Interpretasi Delta G:

Jika $\Delta G < 0$, reaksi berlangsung secara spontan dan menghasilkan energi bebas.

Jika $\Delta G > 0$, reaksi tidak akan berlangsung secara spontan, dan energi bebas sistem akan meningkat.

Jika $\Delta G = 0$, reaksi berada pada kondisi kesetimbangan.

Delta G adalah alat penting dalam kimia untuk memahami apakah suatu reaksi akan terjadi secara alami dan dalam perancangan proses kimia. Ini membantu dalam pengoptimalan kondisi reaksi, pemilihan reaksi yang sesuai, dan pengembangan teknologi yang lebih efisien dalam berbagai aplikasi kimia dan industri.

3.2. *Diagram Fase*

Diagram fase adalah alat penting dalam pengolahan mineral yang digunakan untuk memvisualisasikan dan memahami bagaimana mineral

dan padatan lainnya berubah dalam berbagai kondisi suhu dan tekanan. Diagram fase adalah grafik yang menggambarkan hubungan antara fase padatan, cair, dan gas dalam suatu sistem pada berbagai kondisi tertentu. Di bawah ini adalah penjelasan lebih rinci tentang diagram fase dalam pengolahan mineral:

1. Konsep Dasar Diagram Fase:

Diagram fase menggambarkan ketiga fase utama materi: padatan, cair, dan gas.

Di dalam diagram fase, sumbu horizontal biasanya mewakili suhu, sedangkan sumbu vertikal mewakili tekanan.

Setiap titik dalam diagram fase mewakili kombinasi khusus suhu dan tekanan di mana suatu fase atau kombinasi fase ada dalam kesetimbangan.

2. Titik Penting dalam Diagram Fase:

Titik Lebur (Melting Point): Ini adalah suhu dan tekanan di mana suatu padatan akan melebur dan berubah menjadi cairan pada tekanan tertentu. Pada diagram fase, titik lebur terletak di antara daerah padatan dan cairan.

Titik Didih (Boiling Point): Ini adalah suhu dan tekanan di mana suatu cairan akan mendidih dan berubah menjadi gas pada tekanan tertentu. Titik didih terletak di antara daerah cairan dan gas.

Titik Tripel (Triple Point): Ini adalah satu titik tertentu di mana ketiga fase (padatan, cair, dan gas) ada dalam kesetimbangan pada suhu dan tekanan tertentu.

3. Daerah Fase:

Daerah fase dalam diagram fase adalah wilayah yang menunjukkan kondisi di mana satu fase tunggal ada dalam kesetimbangan.

Misalnya, daerah padatan menunjukkan kondisi di mana mineral berada dalam bentuk padatan tunggal, daerah cair menunjukkan kondisi di mana

mineral berada dalam bentuk cairan tunggal, dan daerah gas menunjukkan kondisi di mana mineral berada dalam bentuk gas tunggal.

4. Kurva Fase:

Kurva fase pada diagram fase menghubungkan titik-titik di mana dua fase berada dalam kesetimbangan.

Misalnya, kurva fase antara padatan dan cairan menunjukkan kombinasi suhu dan tekanan di mana padatan akan mencair menjadi cairan atau sebaliknya.

5. Poin Kritis:

Ada titik tertentu yang disebut sebagai titik kritis di mana batas antara fase cair dan fase gas hilang.

Di atas suhu dan tekanan kritis, tidak ada perbedaan antara fase cair dan gas.

6. Aplikasi dalam Pengolahan Mineral:

Diagram fase digunakan dalam pengolahan mineral untuk memahami perubahan fase mineral saat dipanaskan atau ditekan.

Ini membantu dalam perencanaan proses seperti peleburan, penguapan, kristalisasi, dan pemisahan mineral.

Contoh: Diagram fase digunakan untuk merencanakan proses peleburan bijih logam untuk mendapatkan logam yang murni dengan memahami kondisi suhu dan tekanan yang diperlukan.

3.2.1. *Unary Systems*

Seperti yang telah disebutkan, logam murni terdapat dalam tiga fase, yaitu padat, cair, dan uap, tergantung pada kombinasi suhu dan tekanan tertentu. Masing-masing dari ketiga kondisi ini disebut sebagai fase; yaitu fase padat, cair, dan uap. Pertimbangkan balok logam padat dalam wadah di dalam tungku. Dengan asumsi tekanan atmosfer, jika logam dipanaskan hingga suhu yang cukup tinggi, logam tersebut akan

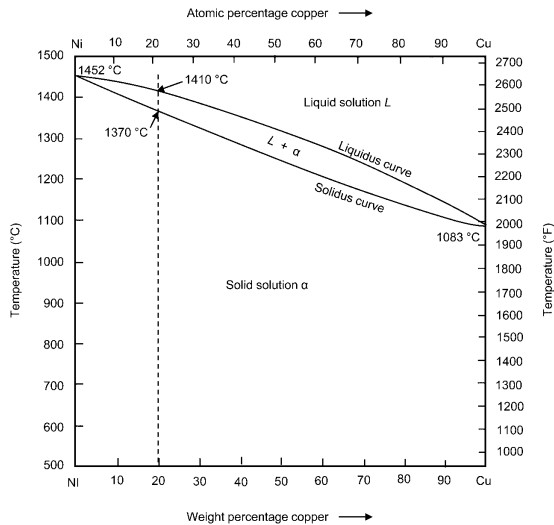
meleleh dan membentuk cairan. Pada pemanasan lebih lanjut, logam tersebut akan mulai mendidih dan atom-atom logam akan meninggalkan wadah sebagai uap atau gas. Karena materi dapat masuk atau keluar dari sistem, kondisi ini dikenal sebagai sistem terbuka. Untuk membuat sistem tertutup di mana tidak ada materi yang masuk atau keluar dari sistem, penutup kedap udara dapat ditempatkan di atas wadah. Jika tekanan sekarang diterapkan di dalam wadah, fase uap dikompresi dan volumenya menjadi lebih kecil. Selanjutnya, tekanan dilepaskan dan suhu diturunkan sehingga logam mendingin ke kondisi cair. Pada saat tekanan dilepaskan, volume logam cair tetap cukup konstan; artinya, logam cair pada dasarnya tidak dapat dimampatkan. Situasi yang sama berlaku jika logam cair didinginkan sehingga hanya tersisa padatan. Karena atom-atom logam nyaris sama rapatnya dalam cairan seperti halnya dalam padatan, maka, nyaris tidak ada perubahan volume. Oleh karena itu, selama pemrosesan logam, efek tekanan dan perubahan volume sering kali dapat diabaikan. Karena sebagian besar proses logam dilakukan pada tekanan atmosfer, maka tekanan awal dalam diagram fasa biasanya diberi nilai 1 atm dan perubahan volume diabaikan. Karena sistem yang dipertimbangkan sejauh ini hanya mengandung satu logam murni, maka sistem ini dikenal sebagai sistem unary.

3.2.2. Binary system

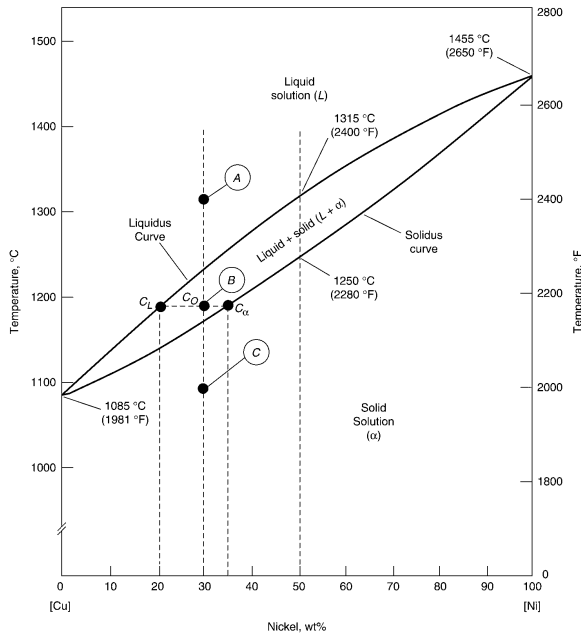
Sekarang pertimbangkan penambahan logam kedua, misalnya, paduan nikel dan tembaga. Diagram fasa untuk sistem ini ditunjukkan pada Gambar 3.1. Ini dikenal sebagai diagram fase isomorfis, karena paduannya benar-benar dapat larut satu sama lain dalam keadaan padat. Nikel dan tembaga keduanya memiliki struktur kristal face-centered cubic (fcc) dan atom-atomnya memiliki ukuran yang sama. Paduan logam yang mengandung logam dengan struktur kristal yang berbeda akan memiliki diagram yang lebih kompleks.

Diagram ini menunjukkan fase yang ada pada semua kemungkinan paduan dua logam nikel (Ni) dan tembaga (Cu), pada semua suhu dari 500 hingga 1500 °C (930 hingga 2730 °F). Komposisi paduan diplot pada skala horizontal, di sepanjang dasar diagram, di mana persentase berat tembaga

dibaca secara langsung, sisanya adalah nikel. Suhu dibaca secara vertikal, baik dari skala celcius di sebelah kiri atau dari skala Fahrenheit di sebelah kanan. Dua kurva melintasi diagram dari titik leleh nikel pada 1452 °C (2646 °F) ke titik leleh tembaga pada 1083 °C (1981 °F). Dari jumlah tersebut, kurva atas, yang disebut liquidus, menunjukkan untuk setiap komposisi paduan yang dimungkinkan, suhu di mana pembekuan dimulai selama pendinginan atau, secara ekuivalen, di mana peleburan selesai pada pemanasan. Kurva yang lebih rendah, yang disebut solidus, menunjukkan suhu di mana peleburan dimulai saat pemanasan atau di mana pembekuan selesai saat pendinginan. Di atas liquidus, setiap paduan berbentuk cair, dan wilayah diagram ini diberi label L untuk fase cair atau larutan cair. Di bawah solidus semua paduan berbentuk padat, dan wilayah ini diberi label α karena biasanya menggunakan huruf Yunani untuk penunjukan fase padat yang juga merupakan larutan padat. Pada suhu di antara dua kurva, fase cair dan padat hadir bersama, seperti yang ditunjukkan oleh penunjukan $L + \alpha$.



Gambar 3.1 Diagram fase Ni-Cu



Gambar 3.2 Diagram fase Cu-Ni

Prediksi fase

Fasa yang ada dapat ditentukan dengan menempatkan titik komposisi temperatur pada diagram dan mencatat fasa yang ada pada bidang fasa yang sesuai. Sebagai contoh, paduan dengan komposisi 30wt%Ni-70wt%Cu pada 1315 °C (2400 °F) akan ditempatkan pada titik a pada Gambar 3.2 karena titik ini sepenuhnya berada di dalam bidang cair, maka paduan tersebut akan berupa cairan. Paduan yang sama pada 1095 °C (2000 °F), yang ditunjuk sebagai titik c, berada di dalam larutan padat, α. Di sisi lain, paduan 30wt% Ni-70wt% Cu pada 1190 °C (2170 °F) (titik b) akan terdiri dari campuran dua fasa larutan padat, α, dan cairan, L.

Prediksi komposisi kimia dari fase

Untuk menentukan komposisi fasa yang ada, cari titik pada diagram fasa. Jika hanya ada satu fasa, komposisi fasa tersebut adalah

komposisi keseluruhan paduan. Sebagai contoh, untuk paduan 30wt% Ni-70wt% Cu pada 1095 °C (2000 °F) (titik c pada Gambar 3.2), hanya fasa α yang ada, dan komposisinya adalah 30wt% Ni-70wt% Cu. Untuk paduan dengan komposisi dan koordinat suhu yang terletak di wilayah dua fase, komposisi fase dapat ditentukan dengan menggambar garis horizontal, yang disebut sebagai garis pengikat, antara dua batas fase pada suhu yang diinginkan. Kemudian, jatuhkan garis tegak lurus dari persimpangan setiap batas ke sumbu komposisi dan baca komposisinya. Sebagai contoh, sekali lagi mempertimbangkan paduan 30wt% Ni-70wt% Cu pada 1190 °C (2170 °F) yang terletak pada titik b pada Gambar 3.2 dan berada pada bidang dua fase, $\alpha + L$. Garis tegak lurus dari batas liquidus ke sumbu komposisi adalah 20wt% Ni-80wt% Cu, yang merupakan komposisi, C_L , dari fasa cair. Dengan cara yang sama, komposisi fasa larutan padat, C_α , dibaca dari garis tegak lurus dari garis solidus ke sumbu komposisi, dalam hal ini 35wt% Ni-65wt% Cu.

Prediksi jumlah fasa pada sebuah titik

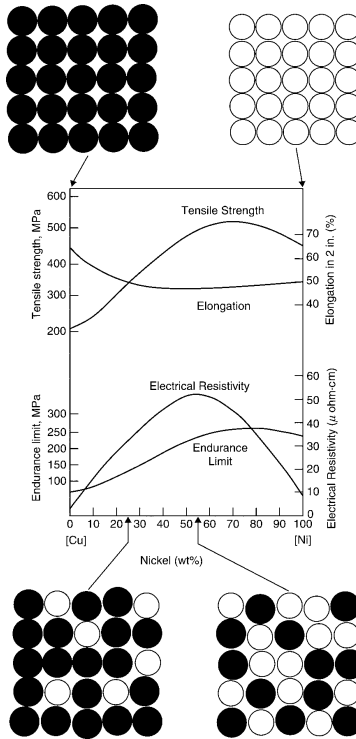
Prediksi Jumlah Fasa. Persentase atau fraksi fasa yang ada pada kesetimbangan juga dapat ditentukan dengan diagram fasa. Dalam wilayah fase tunggal, karena hanya ada satu fase, maka paduan seluruhnya terdiri dari fase tersebut; yaitu, fraksi fase adalah 1,0 dan persentasenya 100%. Dari contoh sebelumnya untuk paduan 30wt% Ni- 70wt% Cu pada 1095 °C (2000 °F) (titik c pada Gambar 3.2), hanya fasa α yang ada dan paduannya 100% alfa. Jika posisi komposisi dan suhu terletak dalam bidang dua fase, garis pengikat horizontal harus digunakan bersama dengan aturan lever. Aturan lever adalah ekspresi matematis yang didasarkan pada prinsip kekekalan materi. Pertama, garis pengikat ditarik melintasi wilayah dua fase pada komposisi dan suhu paduan. Fraksi satu fasa ditentukan dengan mengambil panjang garis pengikat dari komposisi paduan keseluruhan ke batas fasa untuk fasa lainnya dan membaginya dengan panjang garis pengikat total. Fraksi fase lainnya kemudian ditentukan dengan cara yang sama. Jika persentase fasa diinginkan, setiap fraksi fasa dikalikan dengan 100. Ketika sumbu komposisi diskalakan dalam persen berat, fraksi fasa yang dihitung menggunakan aturan lever adalah fraksi massa-massa (atau

berat) dari fasa tertentu dibagi dengan massa (atau berat) total paduan. Massa setiap fasa dihitung dari hasil kali setiap fraksi fasa dan total massa paduan. Sekali lagi, pertimbangkan paduan pada 1190 °C (2170 °F) yang terletak di titik b pada Gambar 3.2 yang mengandung fasa padat, α , dan cair, L. Garis pengikat yang sama yang digunakan untuk penentuan komposisi fasa dapat digunakan lagi untuk perhitungan aturan tuas. Komposisi paduan keseluruhan yang terletak di sepanjang garis dasi adalah $C_{\alpha} - C_L$ atau 35 - 20 % berat. Persentase berat cairan yang ada kemudian:

$$wt\% L = \frac{C_{\alpha} - C_0}{C_{\alpha} - C_L} = \frac{35 - 30}{35 - 20} = 0.33 \text{ atau } 33\%$$

Kebalikannya, jumlah solid adalah:

$$wt\% S = \frac{C_0 - C_L}{C_{\alpha} - C_L} = \frac{30 - 20}{35 - 20} = 0.67 \text{ atau } 67\%$$

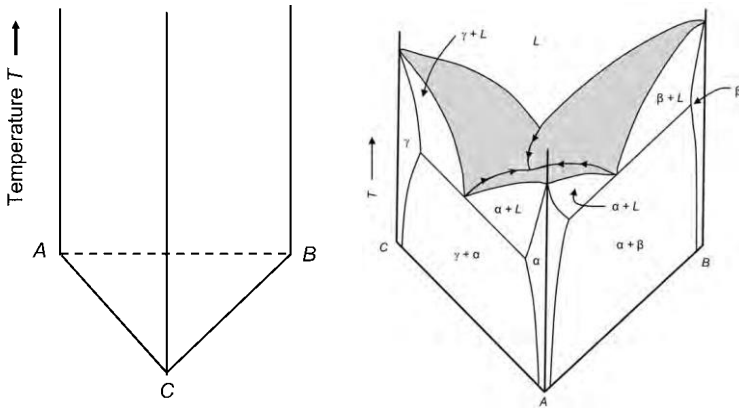


Gambar 3.3 Sifat dari variasi Cu-Ni

3.2.3. Ternary phase system

Sistem Fasa Ternary, juga dikenal sebagai Sistem Tiga Komponen, adalah sistem termodinamika yang terdiri dari tiga komponen kimia yang berinteraksi untuk membentuk berbagai fasa (misalnya, padatan, cairan, dan gas) dalam berbagai kondisi suhu dan tekanan. Tidaklah tepat untuk menggambarkan komposisi paduan terner dengan satu angka atau fraksi, seperti yang dilakukan pada paduan biner, tetapi pernyataan dua nilai independen sudah cukup. Sebagai contoh, komposisi paduan Fe-Cr-Ni dapat dijelaskan secara lengkap dengan menyatakan bahwa paduan tersebut mengandung 18% Cr dan 8% Ni. Tidak perlu dikatakan bahwa kandungan besinya adalah 74%. Tetapi persyaratan bahwa dua parameter harus dinyatakan untuk menggambarkan komposisi terner berarti bahwa dua

dimensi harus digunakan untuk mewakili komposisi pada diagram fasa yang lengkap. Diagram fasa terner hipotetis yang terdiri dari logam A, B, dan C ditunjukkan pada Gambar 3.4. Diagram ini berisi dua eutektik biner pada dua sisi yang terlihat pada diagram, dan eutektik biner ketiga antara elemen B dan C yang tersembunyi di bagian belakang plot.



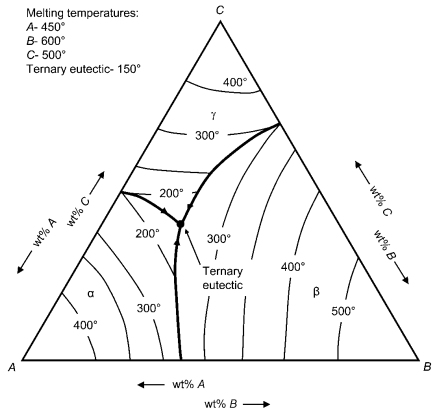
Gambar 3.4 Ternary phase diagram

Pada plot terner 3-D, informasi dari diagram dapat diplot dalam dua dimensi dengan salah satu dari beberapa metode, termasuk plot liquidus, plot isothermal, dan bagian vertikal yang disebut isopleth.

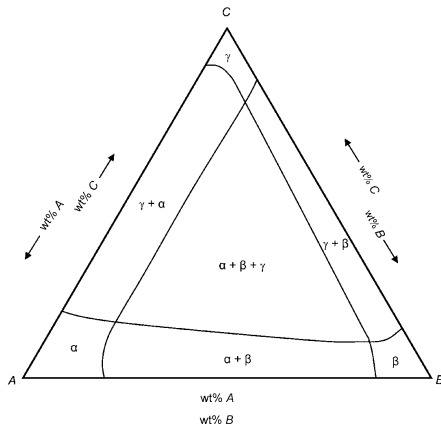
Plot Liquidus. Suhu saat pembekuan dimulai diarsir pada Gambar 3.4. Pada Gambar 3.5, suhu ini untuk setiap komposisi dipindahkan ke diagram segitiga; suhu liquidus diplot sebagai kontur isothermal. Penyajian ini sangat membantu dalam memprediksi suhu pembekuan paduan. Perhatikan bahwa garis liquidus memiliki anak panah yang menunjukkan arah pembekuan menuju titik eutektik terner. Plot liquidus juga memberikan identitas fasa primer yang akan terbentuk selama pembekuan untuk komposisi paduan tertentu. Plot serupa, yang dikenal sebagai plot solidus, yang menunjukkan pembekuan solidus kadang-kadang disajikan.

Plot Isothermal. Plot isothermal menunjukkan fase yang ada dalam paduan apa pun pada suhu tertentu dan berguna untuk memprediksi fase dan

jumlah serta komposisinya pada suhu tersebut. Bagian isothermal dari Gambar 3.5 pada suhu kamar ditunjukkan pada Gambar 3.6. Plot isothermal sejauh ini adalah yang paling berguna karena memungkinkan analisis komposisi, sedangkan plot liquidus dan isopleth tidak memungkinkan analisis komposisi.

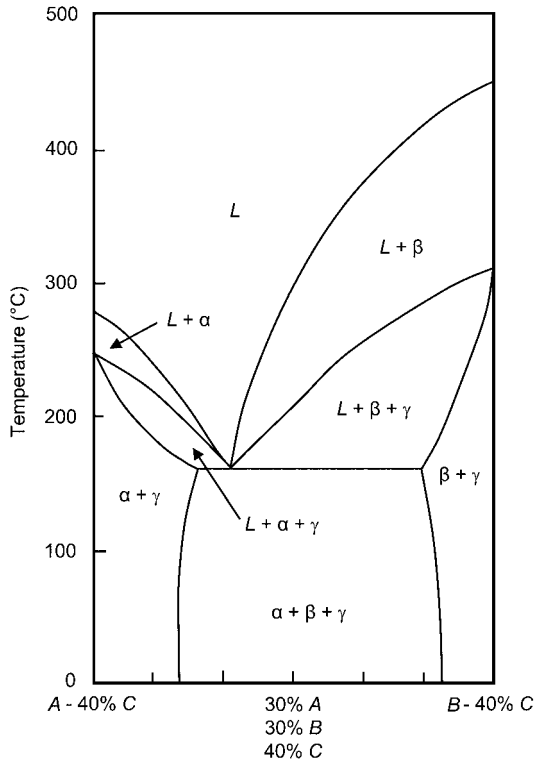


Gambar 3.5 Liquid plot dari diagram fase terner



Gambar 3.6 Isothermal plot dari diagram fase terner

Plot Isopleth. Kelompok paduan tertentu dapat diplot sebagai bagian vertikal, yang juga disebut isopleth. Bagian-bagian ini sering kali mewakili komposisi tetap dari salah satu elemen, sementara jumlah dua elemen lainnya diizinkan untuk bervariasi. Plot-plot ini menunjukkan bagaimana fasa dan struktur berubah ketika suhu bervariasi dan ketika dua elemen yang ada berubah jumlahnya. Garis ikat biasanya tidak terletak pada bidang penampang vertikal dan tidak dapat digunakan untuk mendapatkan jumlah dan komposisi. Diagram isopleth melalui diagram hipotetis (Gambar 3.4) pada suhu konstan 40% C ditunjukkan pada Gambar 3.7. Paduan yang mengandung 30% A dan 30% B akan mulai membeku di dekat 350 °C (660 °F), dengan β primer yang terbentuk terlebih dahulu. Di dekat 275 °C (530 °F), γ juga akan mulai terbentuk. Akhirnya, pada sekitar 160 °C (320 °F), α terbentuk dan cairan terakhir membeku. Struktur mikro terakhir mengandung alfa, beta dan gamma. Isopleth cukup berharga dalam menunjukkan fase yang ada selama pendinginan dan pemanasan kesetimbangan. Isopleth juga menunjukkan suhu di mana berbagai perubahan fase terjadi.

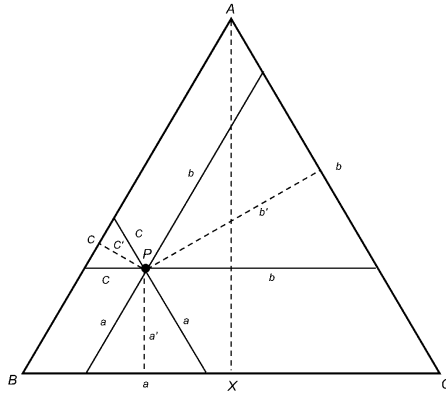


Gambar 3.7 Plot isopleth

Segitiga Gibbs

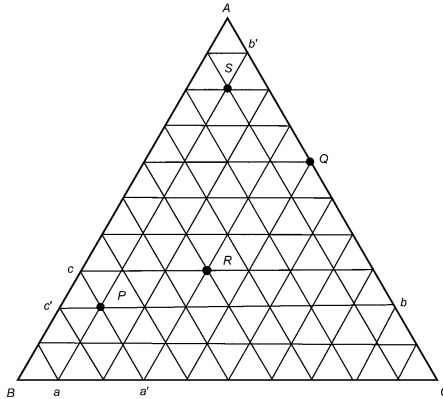
Segitiga Gibbs dalam Diagram Fase Ternary adalah representasi grafis yang memvisualisasikan kondisi kesetimbangan antara tiga komponen kimia dalam sistem tiga komponen. Dengan tiga sudut yang mewakili tiga komponen utama, segitiga tersebut menggambarkan daerah sumbu segitiga di mana komposisi campuran dari ketiga komponen ada dalam kesetimbangan. Proyeksi dari titik komposisi campuran ke sisi segitiga yang berlawanan dengan komponen dalam campuran membantu memahami komposisi fasa-fasa yang mungkin terbentuk dalam berbagai kondisi. Kurva fasa menghubungkan kondisi di mana dua fase berada

dalam kesetimbangan, dan daerah fase menunjukkan wilayah di mana satu atau lebih fase mungkin hadir dalam kesetimbangan. Dalam pengolahan mineral, ini berguna untuk memahami interaksi mineral dalam bijih dan pengaruhnya terhadap proses pengolahan mineral, membantu dalam perencanaan dan pengoptimalan proses kimia dan material.



Gambar 3.8 Segitiga Gibbs

Untuk kemudahan dalam membaca komposisi, segitiga sama sisi dapat diatur dengan garis-garis yang sejajar dengan sisi-sisinya (Gambar 3.9). Komposisi kemudian dapat dibaca secara langsung, sebagai contoh, $P = 20\% A + 70\% B + C$. Pada titik P, persentase A diwakili oleh garis Pa (atau ekuivalen dengan Pa'), yang panjangnya 20 unit; persentase B oleh garis Pb (atau Pb'), panjangnya 70 unit; dan persentase C oleh garis Pc (atau Pc'), panjangnya 10 unit.



Gambar 3.9 Segitiga Gibbs dengan garis komposisi

Hukum Fasa Gibbs

Hukum Fasa Gibbs, yang juga dikenal sebagai Hukum Fasa atau Gibbs Phase Rule, adalah prinsip penting dalam termodinamika yang digunakan untuk memahami jumlah variabel yang dapat diubah dalam sistem yang mencakup berbagai fase (misalnya, padatan, cairan, dan gas) dan kondisi tertentu. Hukum Fasa ini sangat relevan dalam kimia, fisika, dan ilmu material, termasuk dalam pengolahan mineral dan metalurgi. Mari jelaskan lebih rinci tentang Hukum Fasa Gibbs:

- Rumus Hukum Fasa Gibbs:

Hukum Fasa Gibbs diungkapkan dalam bentuk rumus matematika sederhana:

$$F + C = P + 2$$

Di mana:

F adalah jumlah derajat kebebasan fasa (jumlah variabel yang dapat diubah dalam setiap fase).

C adalah jumlah komponen kimia dalam sistem.

P adalah jumlah fasa yang ada dalam sistem.

- Penjelasan Lebih Rinci:

Fasa (P):

Fasa merujuk pada setiap bagian homogen sistem yang memiliki komposisi dan sifat fisik yang seragam. Contoh fase termasuk padatan, cairan, dan gas.

Dalam pengolahan mineral, fase mungkin mencakup berbagai mineral dan senyawa yang ada dalam berbagai bentuk fisik dan kimia.

Komponen (C):

Komponen adalah bahan kimia yang tidak dapat diubah sendiri tanpa mengubah sifat-sifat dasar sistem. Setiap komponen dapat dianggap sebagai jenis zat kimia yang berbeda dalam sistem.

Dalam pengolahan mineral, komponen dapat merujuk pada berbagai unsur kimia yang terdapat dalam bijih mineral.

Derajat Kebebasan Fasa (F):

Derajat kebebasan fasa adalah jumlah variabel yang dapat diubah dalam setiap fase sistem tanpa mengubah komposisi keseluruhan sistem.

Ini termasuk variabel seperti suhu, tekanan, konsentrasi komponen, dan volume.

Sebagai contoh, jika Anda memiliki air (H_2O) dalam tiga fase berbeda (padatan es, cairan air, dan uap air), Anda akan memiliki tiga derajat kebebasan dalam setiap fase.

3.3. Diagram Keseimbangan dalam Larutan

Studi termodinamika sistem hidrometalurgi didasarkan pada penghitungan kondisi kesetimbangan kimia antar spesies. Mereka mungkin dalam keadaan padat, cair atau gas. Untuk kondisi dan keadaan yang berbeda, oleh karena itu perlu untuk memperoleh berbagai jenis informasi dan data yang dapat diperoleh dan diproses dengan metode yang berbeda. Tiga metode digunakan dalam banyak kasus:

- diagram bidang stabilitas komponen sistem;
- diagram spesies;
- Penentuan kesetimbangan dalam larutan

Diagram bidang stabilitas menunjukkan kondisi di mana komponen sistem dalam keadaan padat, cair dan gas mengambil bagian dan spesies terlarut stabil dalam larutan air, karena fakta bahwa mereka adalah sistem hidrometalurgi. Sistemnya sederhana, dari tipe Me-H₂O atau lebih kompleks, Me-S-H₂O, Me₁-Me₂-S-H₂O, Me-Cl₂-H₂O, Me-S-Cl₂-H₂O, dll., Dan biasanya digambarkan dalam koordinat pH dan potensi reduksi oksida E. Ini adalah diagram yang identik dengan apa yang disebut diagram Pourbaix yang digunakan dalam studi korosi.

Persamaan Nernst adalah rumus yang digunakan untuk menghitung potensial sel elektrokimia (E) pada suatu reaksi redoks pada kondisi non-standar. Persamaan ini memungkinkan kita untuk mengukur perubahan potensial sel elektrokimia saat konsentrasi zat-zat yang terlibat dalam reaksi berubah. Persamaan Nernst dinyatakan sebagai berikut:

$$E = E^0 - \frac{0.0592}{n} \log Q$$

Dimana E adalah potensial sel elektrokimia pada kondisi non-standar (V), E⁰ adalah potensial sel elektrokimia pada kondisi standar, n adalah jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi redoks, dan Q adalah konstanta kesetimbangan (konsentrasi produk/konsentrasi reaktan).

Tabel 4.1 Nilai Half cell potential dari beberapa reaksi redoks

Half-Reaction	E°/SHE (V)
Li ⁺ (aq) + e ⁻ ⇌ Li(s)	-3.040
Be ²⁺ (aq) + 2e ⁻ ⇌ Be(s)	-1.99
Al ³⁺ (aq) + 3e ⁻ ⇌ Al(s)	-1.676
Zn ²⁺ (aq) + 2e ⁻ ⇌ Zn(s)	-0.7618
Ag ₂ S(s) + 2e ⁻ ⇌ 2Ag(s) + S ²⁻ (aq)	-0.71
Fe ²⁺ (aq) + 2e ⁻ ⇌ Fe(s)	-0.44

Half-Reaction	E°/SHE (V)
$\text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Cr}^{2+}(\text{aq})$	-0.424
$\text{Cd}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Cd}(\text{s})$	-0.4030
$\text{PbSO}_4(\text{s}) + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Pb}(\text{s}) + \text{SO}_4^{2-}(\text{aq})$	-0.356
$\text{Ni}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Ni}(\text{s})$	-0.257
$2\text{SO}_4^{2-}(\text{aq}) + 4\text{H}^{+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{S}_2\text{O}_6^{2-}(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	-0.25
$\text{Sn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Sn}(\text{s})$	-0.14
$2\text{H}^{+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{H}_2(\text{g})$	0
$\text{Sn}^{4+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Sn}^{2+}(\text{aq})$	0.154
$\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + \text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Cu}^{+}(\text{aq})$	0.159
$\text{AgCl}(\text{s}) + \text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s}) + \text{Cl}^{-}(\text{aq})$	0.2223
$\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{s})$	0.3419
$\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 4\text{e}^{-} \rightleftharpoons 4\text{OH}^{-}(\text{aq})$	0.401
$\text{H}_2\text{SO}_3(\text{aq}) + 4\text{H}^{+}(\text{aq}) + 4\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{S}(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	0.45
$\text{I}_2(\text{s}) + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons 2\text{I}^{-}(\text{aq})$	0.5355
$\text{MnO}_4^{2-}(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{MnO}_2(\text{s}) + 4\text{OH}^{-}(\text{aq})$	0.6
$\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^{+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$	0.695
$\text{H}_2\text{SeO}_3(\text{aq}) + 4\text{H}^{+} + 4\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Se}(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	0.74
$\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}(\text{aq})$	0.771
$\text{Ag}^{+}(\text{aq}) + \text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s})$	0.7996
$\text{NO}_3^{-}(\text{aq}) + 3\text{H}^{+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{HNO}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	0.94
$\text{Br}_2(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons 2\text{Br}^{-}(\text{aq})$	1.087
$\text{MnO}_2(\text{s}) + 4\text{H}^{+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1.23
$\text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^{+}(\text{aq}) + 4\text{e}^{-} \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1.229
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(\text{aq}) + 14\text{H}^{+}(\text{aq}) + 6\text{e}^{-} \rightleftharpoons 2\text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 7\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1.36
$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^{-} \rightleftharpoons 2\text{Cl}^{-}(\text{aq})$	1.396
$\text{Ce}^{4+}(\text{aq}) + \text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{Ce}^{3+}(\text{aq})$	1.44
$\text{PbO}_2(\text{s}) + \text{HSO}_4^{-}(\text{aq}) + 3\text{H}^{+}(\text{aq}) +$	1.69

Half-Reaction	E°/SHE (V)
$2e^- \rightleftharpoons \text{PbSO}_4(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	
$\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1.763
$\text{F}_2(\text{g}) + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{F}^-(\text{aq})$	2.87

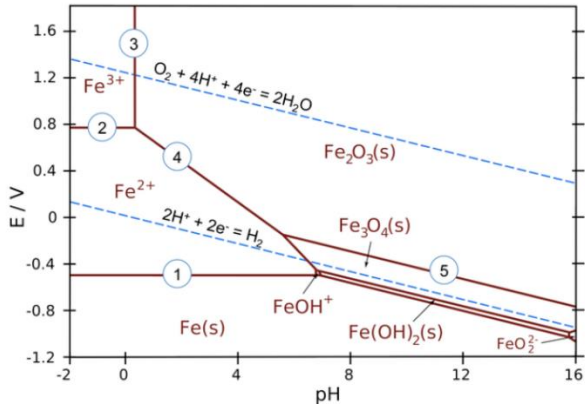
Diagram Pourbaix

Diagram Pourbaix memplot stabilitas elektrokimia untuk keadaan redoks unsur yang berbeda sebagai fungsi pH. [3] Seperti disebutkan di atas, diagram ini pada dasarnya adalah diagram fase yang memetakan kondisi potensial dan pH (biasanya dalam larutan air) di mana spesies redoks yang berbeda stabil. Biasanya, reaksi redoks air diplot sebagai garis putus-putus pada diagram yang lebih rumit ini untuk elemen lain.

Garis-garis dalam diagram Pourbaix mewakili reaksi redoks dan asam-basa, dan merupakan bagian dari diagram di mana dua spesies dapat eksis dalam kesetimbangan. Misalnya, dalam diagram Pourbaix untuk Fe di bawah ini, garis horizontal antara daerah Fe^{3+} dan Fe^{2+} mewakili reaksi $\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + e^- \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}(\text{aq})$, yang memiliki potensial standar +0,77 V. Meskipun kita dapat menggunakan potensial standar untuk semua garis ini, dalam praktiknya diagram Pourbaix biasanya diplot untuk konsentrasi ion yang lebih rendah (seringkali 1 mM) yang lebih relevan dengan eksperimen korosi dan elektrokimia.

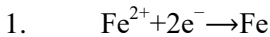
Contoh: Diagram Pourbaix besi

1. Reaksi redoks murni adalah garis horizontal - reaksi ini tidak bergantung pada pH
2. Reaksi asam-basa murni adalah garis vertikal - ini tidak tergantung pada potensi
3. Reaksi yang bersifat asam-basa dan redoks memiliki kemiringan - $0,0592 \text{ V/pH} \times \# \text{ H}^+/\# e^-$

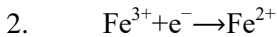


Gambar 3.10 Diagram Pourbaix Fe

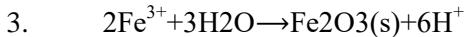
Contoh kesetimbangan dalam diagram Pourbaix besi (diberi nomor pada plot):



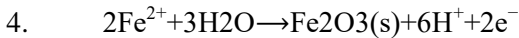
(reaksi redoks murni - tidak ada ketergantungan pH)



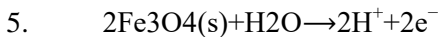
(reaksi redoks murni - tidak ada ketergantungan pH)



(asam-basa murni, tanpa redoks)

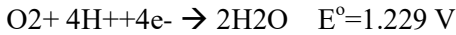


(kemiringan = $-59,2 \times 6/2 = -178 \text{ mV/pH}$)



(kemiringan = $-59,2 \times 2/2 = -59,2 \text{ mV/pH}$)

Contoh: Diagram Pourbaix air pada 298 K



$$E = E^\circ - \frac{0.0592}{n} \log Q$$

$$E = 1.229 - \frac{0.0592}{4} \log \left(\frac{[\text{H}_2\text{O}]}{[\text{H}^+]^4 [\text{pO}_2]} \right)$$

$$E = 1.229 - \frac{0.0592}{4} \log([\text{H}^+]^4 [\text{pO}_2])$$

Pada tekanan oksigen 1 atm

$$E = 1.229 - 0.05916 \text{ pH}$$



$$= E^\circ - \frac{0.0592}{n} \log Q$$

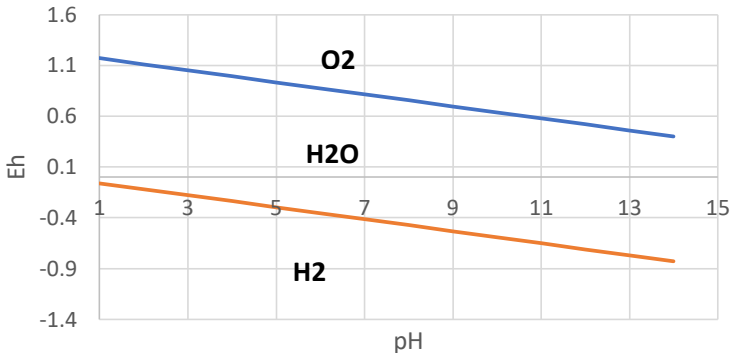
$$E = 0 - \frac{0.0592}{2} \log \left(\frac{\text{pH}_2}{[\text{H}^+]^2} \right)$$

$$E = 0 - \frac{0.0592}{2} \log([\text{H}^+]^2)$$

Pada tekanan hidrogen 1 atm

$$E = -0.05916 \text{ pH}$$

Sehingga diagram Pourbaixnya menjadi



Gambar 3.11 Diagram Pourbaix air

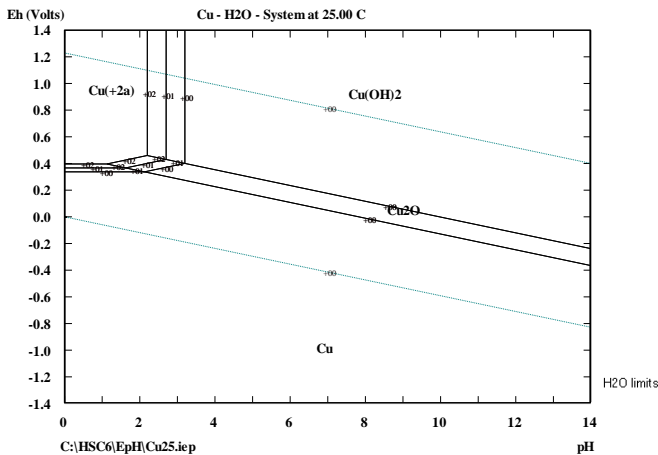
Pengaruh konsentrasi logam

Konsentrasi logam dapat mempengaruhi diagram Pourbaix dengan beberapa cara. Diagram Pourbaix adalah alat yang menggambarkan kondisi elektrokimia suatu spesies kimia pada pH dan potensial elektrokimia tertentu. Variasi konsentrasi logam dapat memengaruhi diagram ini dalam beberapa aspek:

- Pergeseran Potensial: Konsentrasi logam dapat mempengaruhi potensial elektrokimia di mana suatu logam atau spesies logam berada dalam kondisi keseimbangan termodinamika. Dalam beberapa kasus, konsentrasi yang lebih tinggi dari logam tertentu dapat merubah potensial elektrokimia di mana logam tersebut teroksidasi atau tereduksi. Ini akan menghasilkan pergeseran atau perubahan bentuk diagram Pourbaix.
- Perubahan Zona Kestabilan: Konsentrasi logam juga dapat mempengaruhi zona kestabilan suatu spesies kimia. Dalam beberapa kasus, konsentrasi yang lebih tinggi dari logam mungkin menghasilkan

zona kestabilan yang lebih luas atau berubah. Sebaliknya, konsentrasi yang lebih rendah dapat mempersempit zona tersebut.

- **Perubahan Titik Tumpu:** Konsentrasi logam dapat memengaruhi lokasi titik-titik tumpu dalam diagram Pourbaix. Titik-titik tumpu adalah titik di mana suatu spesies berada dalam keseimbangan termodinamika. Variasi konsentrasi dapat mengubah posisi atau jumlah titik-titik tumpu yang ada dalam diagram.
- **Pengaruh Terhadap Reaksi Elektrokimia:** Konsentrasi logam dapat mempengaruhi reaksi elektrokimia yang terjadi dalam sistem. Konsentrasi yang tinggi dari logam mungkin meningkatkan laju reaksi elektrokimia, sementara konsentrasi yang rendah dapat mengurangnya.
- **Pengaruh Terhadap Korosi:** Dalam konteks aplikasi praktis, konsentrasi logam dapat mempengaruhi tingkat korosi logam. Konsentrasi yang lebih tinggi dari logam mungkin membuat logam lebih tahan terhadap korosi atau sebaliknya.



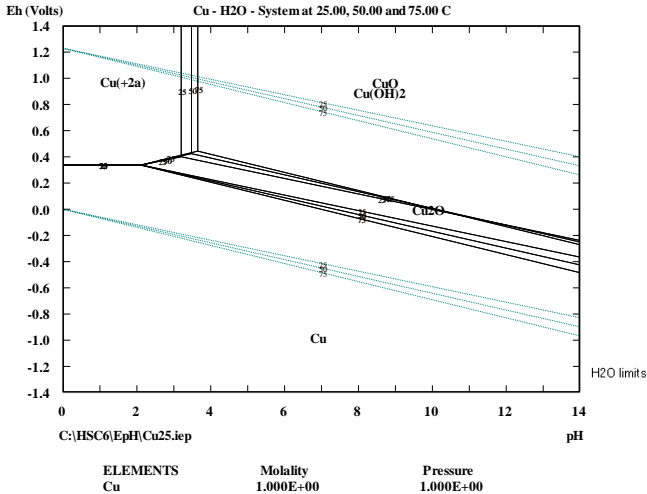
Gambar 3.12 Pengaruh konsentrasi logam terhadap diagram Pourbaix

Pengaruh temperatur terhadap diagram Pourbaix

Temperatur dapat mempengaruhi diagram Pourbaix dalam beberapa cara yang signifikan. Diagram Pourbaix menggambarkan kondisi

elektrokimia suatu spesies kimia pada suhu dan pH tertentu, dan perubahan suhu dapat mengubah diagram ini dalam beberapa aspek:

- Perubahan Potensial Elektrokimia: Temperatur yang lebih tinggi dapat mempengaruhi potensial elektrokimia di mana suatu logam atau spesies logam berada dalam kondisi keseimbangan termodinamika. Pada umumnya, kenaikan suhu dapat menyebabkan pergeseran potensial elektrokimia menuju nilai yang lebih positif atau negatif, tergantung pada sifat kimia reaksi elektrokimia yang terkait.
- Perubahan Kinetika Reaksi: Suhu yang lebih tinggi biasanya meningkatkan laju reaksi kimia. Dalam konteks diagram Pourbaix, ini dapat berarti bahwa reaksi elektrokimia yang pada suhu rendah mungkin lambat atau bahkan tidak terjadi, dapat menjadi lebih cepat atau lebih mudah pada suhu yang lebih tinggi. Hal ini dapat mempengaruhi zona-zona kestabilan dalam diagram.
- Perubahan Kesetimbangan: Suhu juga memengaruhi kesetimbangan termodinamika di antara berbagai spesies kimia dalam larutan elektrokimia. Perubahan suhu dapat mempengaruhi konstanta kesetimbangan dalam reaksi elektrokimia, yang pada gilirannya memengaruhi zona-zona kestabilan dalam diagram.
- Perubahan Kelarutan: Suhu dapat memengaruhi kelarutan berbagai spesies kimia. Pada suhu yang lebih tinggi, beberapa spesies yang mungkin tidak larut pada suhu rendah dapat menjadi larut, dan ini juga dapat memengaruhi diagram Pourbaix, terutama dalam hal zona cair.
- Perubahan Kondisi Fisik: Selain mempengaruhi aspek-aspek termodinamika dan kinetika, suhu juga dapat mempengaruhi keadaan fisik spesies kimia. Sebagai contoh, perubahan suhu dapat merubah fase suatu spesies dari padat ke cair atau dari cair ke gas, yang juga akan tercermin dalam diagram Pourbaix.



Gambar 3.13 Pengaruh temperatur terhadap diagram Pourbaix.

Zona pada diagram Pourbaix

Diagram Pourbaix adalah alat yang berguna untuk memahami fenomena passivasi, korosi, dan perlindungan logam. Dalam konteks diagram Pourbaix, ketiga konsep ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

Passivation (Zona Pasivasi):

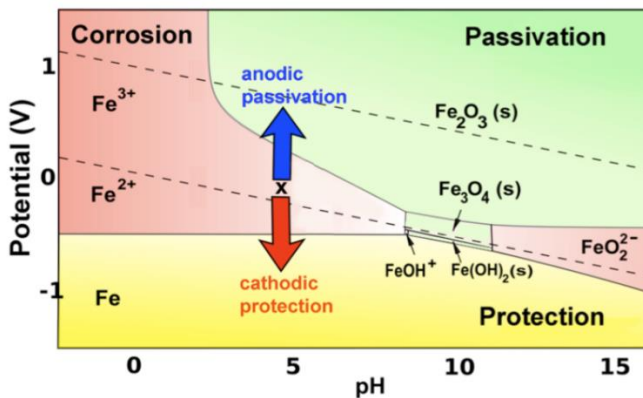
- Passivation adalah fenomena di mana logam membentuk lapisan oksida yang sangat tipis dan padat di permukaannya, yang melindungi logam dari korosi lebih lanjut. Lapisan oksida ini biasanya bersifat pasif atau tidak reaktif terhadap lingkungan korosif.
- Pada diagram Pourbaix, zona pasivasi menggambarkan kondisi elektrokimia di mana logam membentuk lapisan oksida pasif yang melindunginya. Ini biasanya terlihat sebagai daerah yang mendekati garis zona reduksi (pH rendah) dan menunjukkan bahwa logam tersebut cenderung terlindungi dari korosi dalam kondisi ini.

Corrosion (Zona Korosi):

- Korosi adalah proses yang terjadi ketika logam bereaksi dengan lingkungan sekitarnya dan mengalami degradasi atau kerusakan. Ini terjadi ketika potensial elektrokimia logam berada dalam kondisi yang memungkinkan untuk oksidasi logam.
- Pada diagram Pourbaix, zona korosi adalah area di mana potensial elektrokimia logam cenderung menuju nilai yang memungkinkan oksidasi. Zona ini terletak di sekitar garis zona oksidasi (pH tinggi) dan menunjukkan kondisi di mana logam dapat mengalami korosi dalam lingkungan tertentu.

Protection Region (Zona Perlindungan):

- Zona perlindungan dalam diagram Pourbaix adalah area di mana logam mendapatkan perlindungan dari korosi karena potensial elektrokimianya cenderung menuju nilai yang memungkinkan logam tersebut tereduksi dan tidak teroksidasi.
- Ini biasanya terletak di antara zona pasivasi dan zona korosi. Dalam kondisi ini, logam akan membentuk lapisan pasif atau mungkin terendap sebagai senyawa yang melindungi permukaannya dari korosi.
- Zona perlindungan adalah tujuan dalam merancang perlindungan anti-korosi untuk logam, dan kondisi dalam zona ini diinginkan untuk mencegah kerusakan logam yang disebabkan oleh korosi.



Gambar 3.14 3 zona dalam diagram Pourbaix

3.4. Reduksi dan oksidasi logam

3.4.4. Reduksi

Proses reduksi pada suhu tinggi adalah reaksi kimia di mana oksida logam direduksi untuk menghasilkan logam murni. Ini sering memerlukan suhu tinggi karena energi termal diperlukan untuk mengatasi energi aktivasi reaksi reduksi. Beberapa contoh mencakup:

- Reduksi Besi dari Bijih Besi: Proses reduksi besi dari bijih besi menggunakan kokas (karbon padat) sebagai agen reduktor. Reaksi ini terjadi pada suhu sekitar 1.500 - 1.800 °C dan menghasilkan logam besi murni.
- Pembuatan Aluminium: Aluminium diproduksi melalui proses Hall-Héroult, yang melibatkan elektrolisis alumina cair (Al_2O_3) pada suhu tinggi (lebih dari 950 °C).
- Pembuatan Silikon: Silikon murni diproduksi dengan cara mereduksi silikon dioksida (SiO_2) menggunakan karbon pada suhu tinggi dalam tanur lengkuas.

Proses reduksi pada suhu tinggi penting dalam industri logam dan bahan tahan panas, karena ini memungkinkan produksi logam murni dan paduan logam pada skala besar dengan tingkat kemurnian yang tinggi.

3.4.5. Oksidasi

Oksidasi pada suhu tinggi melibatkan reaksi kimia antara suatu zat dengan oksigen (O_2) atau gas oksidasi lainnya pada suhu yang tinggi. Beberapa contoh penting termasuk:

- Pembuatan Baja: Dalam proses produksi baja, besi cair oksidasi pada suhu tinggi dalam konverter atau tanur listrik. Oksigen digunakan untuk menghilangkan berbagai kontaminan seperti karbon, silikon, dan mangan dari besi cair.
- Pembuatan Keramik: Proses pembuatan keramik melibatkan sintering, di mana serbuk keramik atau bahan keramik padat dipanaskan pada suhu tinggi. Ini menghasilkan reaksi oksidasi dan penggabungan partikel-partikel keramik menjadi struktur keramik padat.

- Pembuatan Bahan Tahan Panas: Beberapa material tahan panas, seperti serat karbon dan komposit keramik, mengalami proses oksidasi yang sangat stabil pada suhu tinggi. Ini membuat mereka tahan terhadap lingkungan suhu tinggi seperti dalam mesin jet.

3.4.6. *Diagram Ellingham*

Energi bebas Gibbs (ΔG) dari suatu reaksi adalah ukuran gaya penggerak termodinamika yang yang membuat reaksi terjadi. Nilai negatif untuk ΔG menunjukkan bahwa suatu reaksi dapat berlangsung spontan tanpa input eksternal, sedangkan nilai positif menunjukkan bahwa reaksi tidak akan terjadi. Persamaan untuk energi bebas Gibbs adalah Persamaan untuk energi bebas Gibbs adalah:

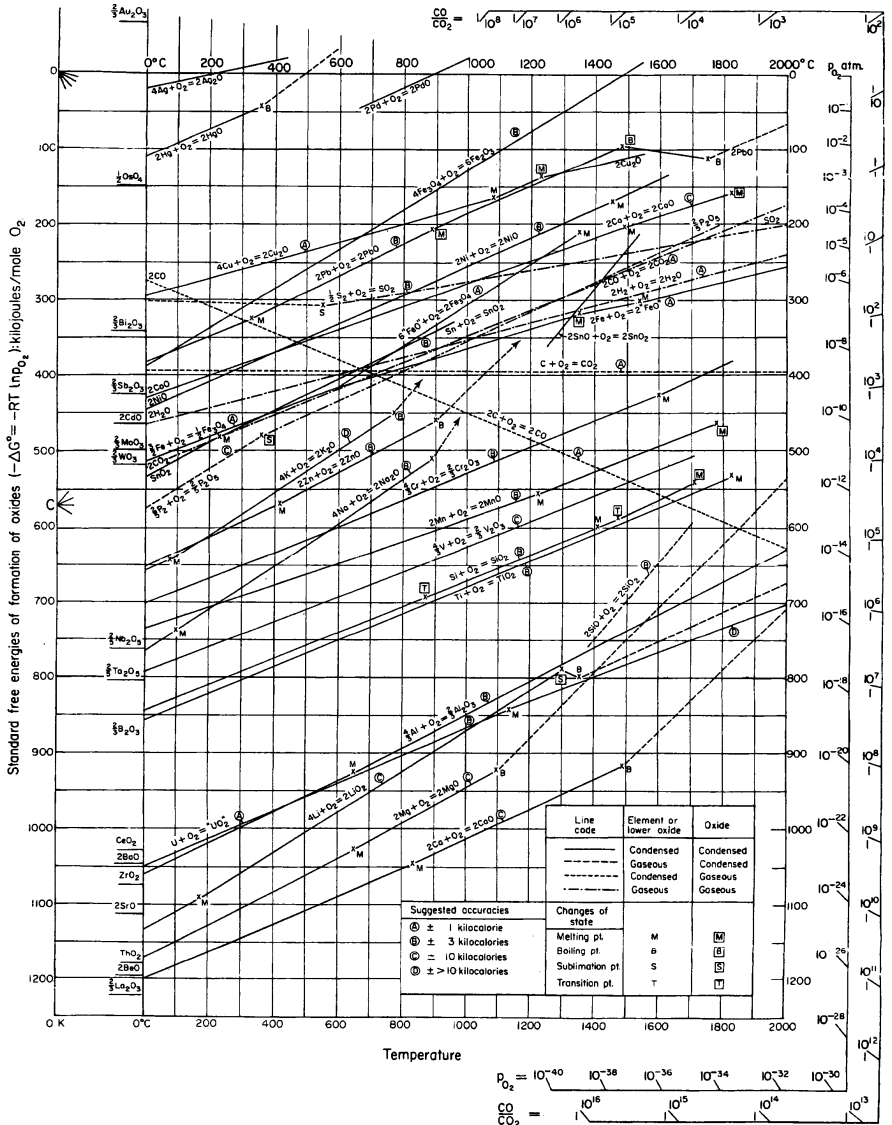
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G^0 = RT \ln PO_2 \text{ (pada reaksi oksidasi)}$$

di mana ΔH adalah entalpi, T adalah suhu absolut, dan ΔS adalah entropi.

Entalpi (ΔH) adalah ukuran energi aktual yang dibebaskan ketika reaksi terjadi ("panas reaksi"). Jika negatif, maka reaksi mengeluarkan energi, sedangkan jika positif reaksi membutuhkan energi.

Entropi (ΔS) adalah ukuran perubahan kemungkinan perubahan pada produk dibandingkan dengan reaktan. Sebagai contoh, jika sebuah padatan (keadaan teratur) bereaksi dengan cairan (keadaan keadaan yang agak kurang teratur) untuk membentuk gas (keadaan yang sangat tidak teratur), biasanya ada perubahan yang besar positif dalam entropi untuk reaksi tersebut.

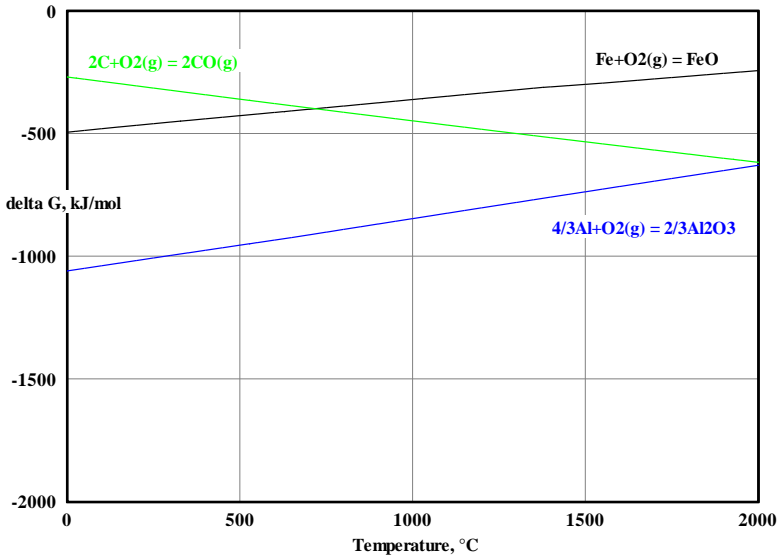


Gambar 3.15 Diagram Ellingham

Kestabilan reaksi oksidasi/reduksi

Diagram Ellingham adalah alat yang sangat berguna untuk memahami stabilitas oksidasi dan reduksi dalam konteks reaksi kimia yang melibatkan logam. Diagram ini menggambarkan perubahan energi bebas Gibbs standar (ΔG°) sebagai fungsi dari suhu untuk reaksi oksidasi logam dengan oksigen. Dalam diagram ini, garis-garis yang mewakili berbagai logam menunjukkan reaksi oksidasi dari logam tersebut dengan oksigen, dan berikut adalah beberapa poin penting yang perlu dijelaskan lebih detail:

- **Stabilitas Oksida Logam:** Garis Ellingham untuk masing-masing logam menunjukkan tingkat stabilitas oksida logam pada suhu tertentu. Logam-logam yang memiliki garis Ellingham yang lebih rendah berarti oksidanya lebih stabil pada suhu tertentu. Ini berarti pada suhu tersebut, reaksi oksidasi logam tersebut dengan oksigen cenderung kurang spontan.
- **Perbandingan Stabilitas:** Dengan menggunakan Diagram Ellingham, kita dapat membandingkan stabilitas oksida logam dari berbagai logam pada suhu yang berbeda. Jika garis Ellingham untuk logam A berada di bawah garis Ellingham untuk logam B pada suhu tertentu, maka oksida logam A akan lebih stabil pada suhu tersebut daripada oksida logam B. Ini berarti logam A akan lebih sulit untuk direduksi oleh logam B pada suhu tersebut.
- **Pemilihan Reduksi:** Diagram Ellingham membantu dalam pemilihan metode reduksi logam. Jika kita ingin mengurangi oksida logam, kita akan memilih logam yang memiliki garis Ellingham yang lebih rendah pada suhu yang sesuai. Logam yang berada di bawah oksida yang ingin direduksi pada Diagram Ellingham adalah pilihan yang tepat untuk reduksi.



Gambar 3.16 Kestabilan oksidasi logam Al dan Fe

Terlihat pada Gambar 3.16 bahwa oksidasi Al₂O₃ lebih stabil pada rentang suhu 0-2000 °C dibandingkan dengan oksidasi FeO pada rentang suhu yang sama. Hal ini disebabkan oleh nilai delta G oksidasi Al₂O₃ lebih rendah dibanding oksidasi FeO yang mana menandakan bahwa logam Al dapat digunakan untuk mereduksi FeO menjadi Fe dengan reaksi sebagai berikut:



$$\Delta H = -765.2536 \text{ kJ}$$

$$\Delta S = -67.48792 \text{ J/K}$$

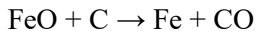
Proses reduksi menggunakan karbon

Proses reduksi logam menggunakan karbon adalah metode yang umum digunakan dalam industri metalurgi untuk menghasilkan logam dari bijihnya. Diagram Ellingham adalah alat yang sangat berguna untuk

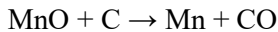
memahami dan merencanakan proses ini. Mari jelaskan dengan lebih rinci bagaimana proses ini bekerja dalam konteks Diagram Ellingham:

- Sebelum proses reduksi, kita memiliki bijih yang mengandung logam dalam bentuk oksida, misalnya FeO (besi(II) oksida) atau MnO (mangan(II) oksida). Tujuan kita adalah mengurangi oksida ini menjadi logamnya masing-masing (Fe untuk FeO, dan Mn untuk MnO).
- Proses reduksi menggunakan karbon melibatkan reaksi antara oksida logam dengan karbon (biasanya dalam bentuk karbon padat seperti kokas atau batu bara) untuk menghasilkan logam bebas dan gas karbon monoksida (CO). Reaksi umum dapat dituliskan sebagai berikut:

Untuk FeO:

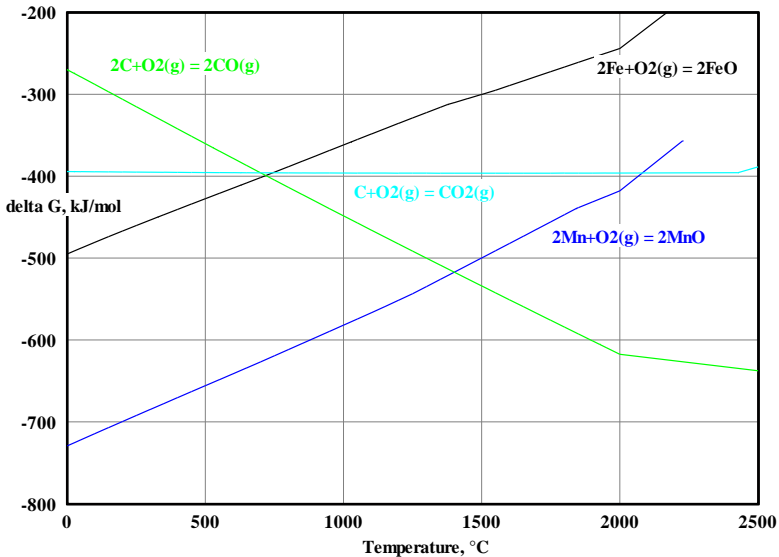


Untuk MnO:



- Dalam Diagram Ellingham, setiap logam dan oksidanya memiliki garis Ellingham tersendiri. Garis ini mencerminkan energi bebas Gibbs standar (ΔG°) sebagai fungsi dari suhu. Garis Ellingham untuk logam menunjukkan reaksi oksidasi logam dengan oksigen, sedangkan karbon (C) dalam bentuk CO juga memiliki garis Ellingham sendiri yang mencerminkan reaksi pembentukan CO.
- Titik di mana garis Ellingham logam bersilangan dengan garis Ellingham CO menandakan suhu di mana reaksi oksidasi oksida logam dengan CO lebih menguntungkan secara termodinamika daripada reaksi oksidasi oksida logam dengan oksigen. Pada suhu ini, oksida logam dapat direduksi menggunakan CO.
- Penggunaan CO sebagai agen reduksi pada suhu yang sesuai memberikan keuntungan termodinamika karena reaksi menjadi lebih spontan, sehingga memungkinkan produksi logam dengan efisiensi tinggi.

- Diagram Ellingham membantu dalam pemilihan suhu yang optimal dan reduktor yang digunakan dalam industri metalurgi. Hal ini penting untuk merancang proses produksi yang efisien dan hemat energi.



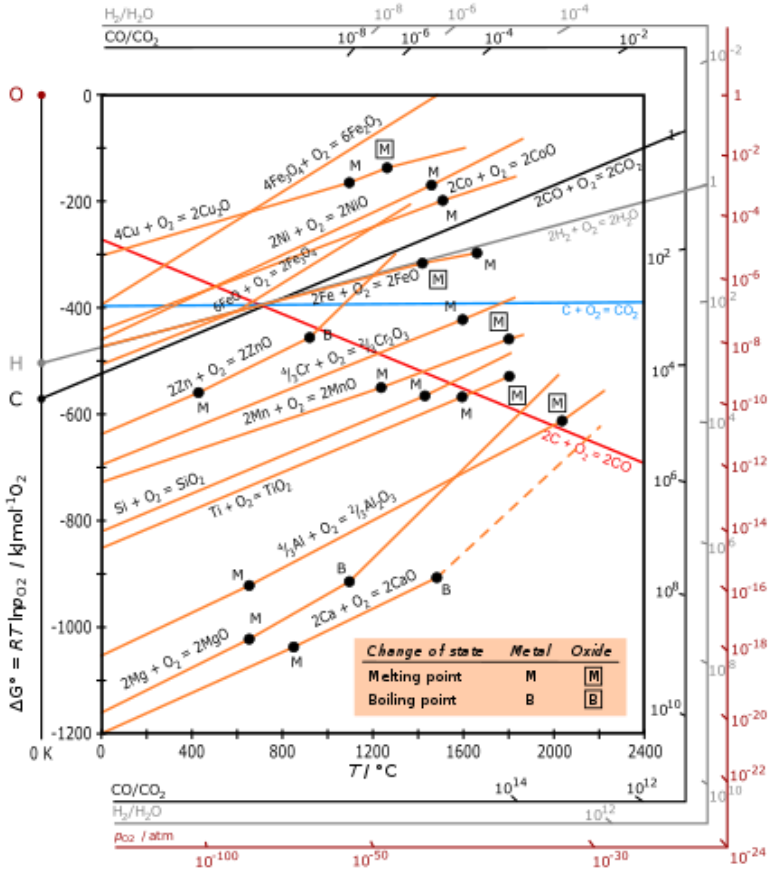
Gambar 3.17 Reduksi logam menggunakan karbon

Terlihat pada Gambar 3.17, bahwa FeO dapat direduksi menggunakan karbon pada suhu sekitar 700 °C dan MnO dapat direduksi menjadi Mn menggunakan karbon pada suhu sekitar 1400 °C. Sedangkan reaksi reduksi yang menghasilkan CO₂ biasanya memerlukan suhu yang lebih tinggi, contoh pada reduksi MnO menjadi Mn menggunakan karbon yang menghasilkan CO₂ baru bisa dilakukan pada suhu sekitar 2100 °C.

Perubahan fase pada diagram Ellingham

Pada diagram Ellingham juga terdapat informasi mengenai melting point, boiling point untuk logam dan oksida nya. Terlihat pada Gambar 3.18, melting point untuk Ca sekitar 820 °C sedangkan boiling point pada sekitar 1500 °C. Tidak hanya itu, pada diagram Ellingham juga terdapat

informasi melting point dari oksida, contoh untuk oksida Al_2O_3 , melting point nya berada sekitar $2000\text{ }^\circ\text{C}$. Berubahnya linearitas kurva delta G biasanya menggambarkan perubahan fase.



Gambar 3.18 Perubahan fase logam

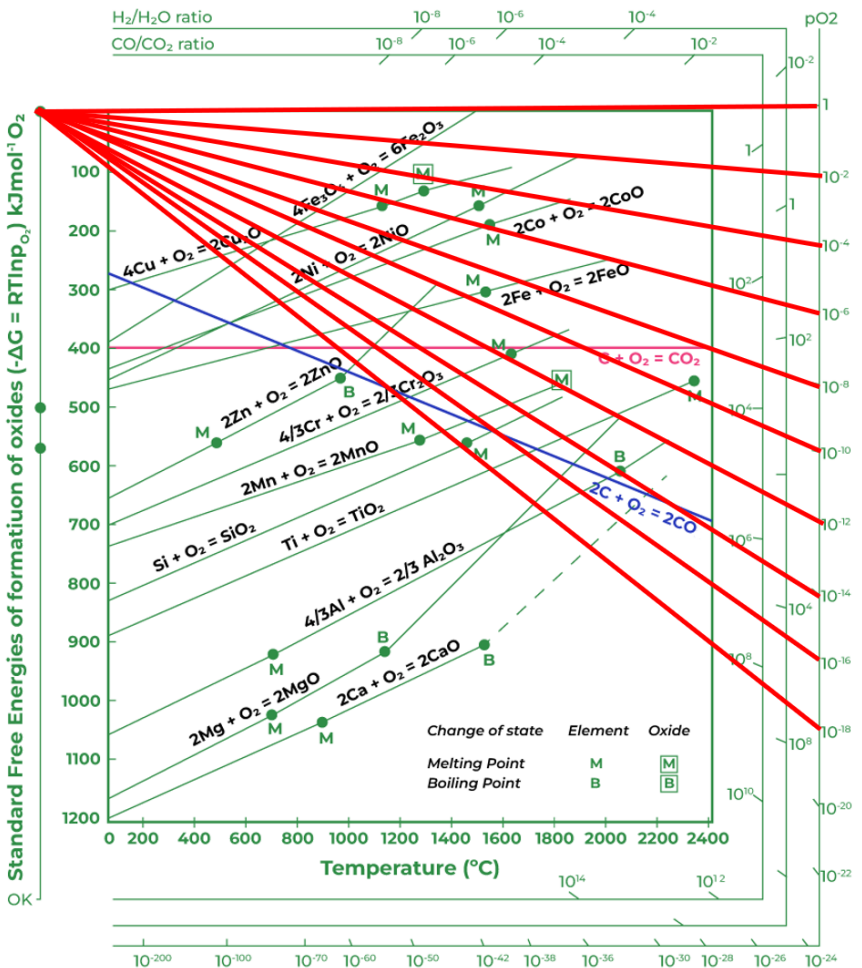
Peran P_{O_2} dan rasio CO/CO_2

P_{O_2} (Tekanan parsial oksigen) dan rasio CO/CO_2 adalah parameter penting dalam Diagram Ellingham yang memengaruhi stabilitas termal

reaksi oksidasi logam dan reduksi oksida logam. Berikut penjelasan lebih rinci tentang peran keduanya:

PO₂ (Tekanan Parsial Oksigen):

- PO₂ adalah ukuran tekanan oksigen yang ada dalam suatu sistem. Pada Diagram Ellingham, PO₂ digunakan sebagai parameter vertikal di sumbu Y.
- Nilai PO₂ mencerminkan konsentrasi oksigen dalam lingkungan reaksi. PO₂ yang tinggi mengindikasikan keberadaan oksigen dalam jumlah besar, sementara PO₂ yang rendah menunjukkan kondisi dengan sedikit oksigen.
- Perubahan dalam nilai PO₂ dapat menggeser posisi garis Ellingham pada diagram. Garis Ellingham akan bergeser lebih rendah pada diagram saat PO₂ meningkat dan bergeser lebih tinggi saat PO₂ menurun. Ini mengindikasikan bahwa nilai PO₂ memengaruhi stabilitas oksida logam dan reaksi oksidasi logam dalam kondisi tertentu.
- Perlu diperhatikan juga bahwa nilai $\Delta G = RT \ln PO_2$
- Jika garis kesetimbangan oksigen berada di atas garis pembentukan oksida logam, maka logam tersebut akan teroksidasi, begitu pula sebaliknya.

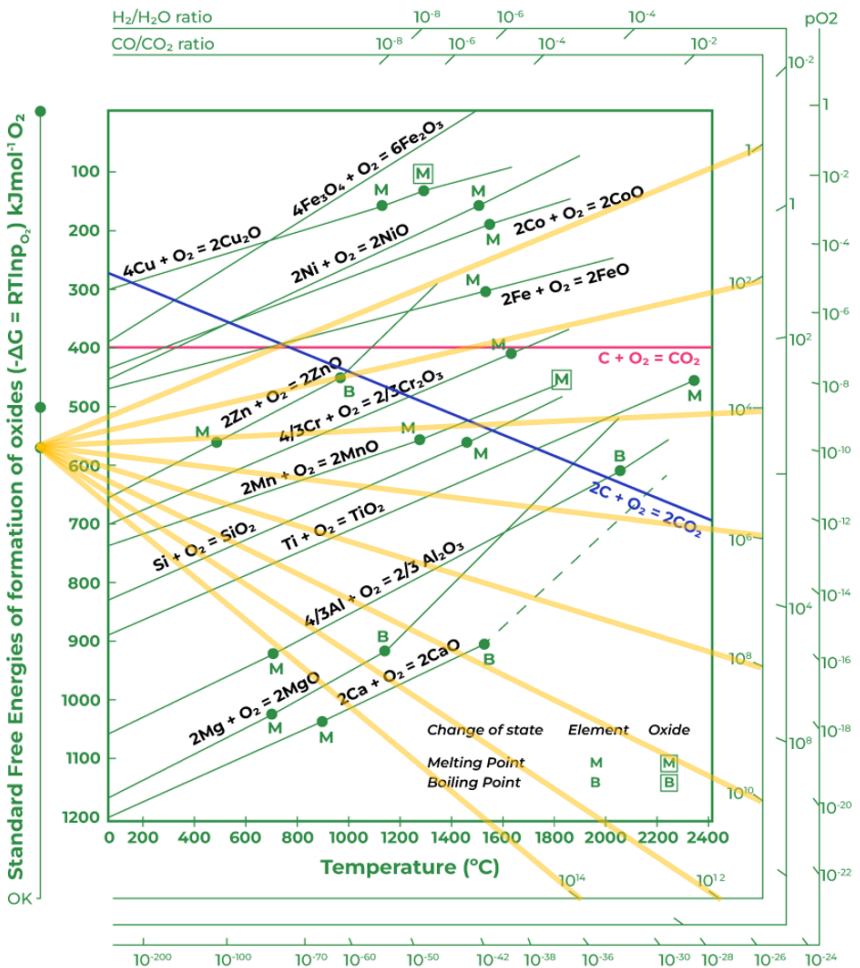


Gambar 3.19 Peran PO₂ pada diagram Ellingham

Contoh pada Gambar 3.19, pada suhu 1850 °C tekanan parsial oksigen berkesetimbangan dengan Mg dan MgO pada 10⁻¹⁶ atm dengan nilai $\Delta G = -610$ kJ/mol.

Rasio CO/CO₂:

- Rasio CO/CO₂ adalah ukuran perbandingan antara karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂) dalam sistem reaksi.
- Dalam proses reduksi logam menggunakan karbon, rasio CO/CO₂ dapat menentukan efisiensi dan keberhasilan reaksi. Semakin tinggi rasio CO/CO₂, semakin banyak karbon monoksida (CO) yang dihasilkan, yang dapat bertindak sebagai agen reduksi.
- Pada Diagram Ellingham, garis Ellingham karbon monoksida (CO) juga termasuk. Perubahan dalam rasio CO/CO₂ dapat memengaruhi stabilitas relatif oksida logam yang dihasilkan dari reaksi reduksi dengan karbon monoksida.
- Keberhasilan proses reduksi dalam praktiknya akan tergantung pada rasio CO/CO₂ yang sesuai untuk mengejar keberhasilan reduksi logam.
- Perlu diperhatikan juga bahwa nilai $\Delta G = RT \ln P_{O_2} - RT \ln(P_{CO}/P_{CO_2})$
- Ketika menggunakan karbon sebagai agen pereduksi, akan ada rasio minimum CO terhadap CO₂ yang harus tersedia ketika mereduksi oksida tertentu. Semakin sulit oksida tersebut untuk direduksi, semakin besar proporsi CO yang dibutuhkan dalam gas.



Gambar 3.20 Peran rasio CO/CO₂ pada diagram Ellingham

Contoh pada Gambar 3.20, untuk mereduksi CaO menjadi Ca dan mereduksi MnO menjadi Mn, rasio CO/CO₂ yang dibutuhkan untuk mereduksi CaO akan lebih tinggi dibandingkan dengan rasio yang dibutuhkan untuk mereduksi MnO.

Bab 4

Proses-proses Metalurgi Ekstraktif

4.1. Proses Hidrometalurgi

Hidrometalurgi, sebuah cabang metalurgi ekstraktif, menggunakan larutan air untuk mengekstraksi logam dari bijih, konsentrat, dan bahan daur ulang atau residu. Proses ini sangat berguna untuk logam yang tidak terlalu reaktif seperti emas dan perak. Proses ini melibatkan tiga langkah utama: pelindian, di mana bahan yang mengandung logam dilarutkan dalam larutan berair; konsentrasi dan pemurnian larutan, yang menghilangkan bahan yang tidak diinginkan; dan pemulihan, di mana logam atau senyawa murninya diendapkan dari larutan. Bahan pelindian yang paling umum adalah asam sulfat encer. Hidrometalurgi telah digunakan sejak abad ke-16 dan telah berkembang secara signifikan dari waktu ke waktu, dan kini digunakan untuk memproduksi lebih dari 70 elemen logam.

4.1.1. Leaching

Leaching adalah salah satu tahapan kunci dalam proses hidrometalurgi di mana bijih logam ditempatkan dalam kontak dengan larutan kimia tertentu untuk melarutkan logam berharga dari bijih tersebut. Leaching adalah langkah awal dalam ekstraksi logam dari bijih dan seringkali menentukan sejauh mana ekstraksi logam berhasil. Berikut adalah poin-poin utama dalam proses leaching:

1. Pemilihan Larutan Pelarut:

Larutan pelarut yang dipilih harus mampu melarutkan logam berharga dalam bijih tanpa melarutkan terlalu banyak impuritas. Pemilihan larutan pelarut sangat tergantung pada jenis bijih dan logam yang akan diekstraksi.

Contoh larutan pelarut yang umum digunakan adalah asam sulfat (untuk tembaga dan nikel), natrium sianida (untuk emas), dan larutan amonium untuk uranium.

2. Kontak Bijih dan Larutan:

Bijih yang telah dihancurkan dan dihaluskan ditempatkan dalam kontak dengan larutan pelarut. Proses ini dapat dilakukan dalam tangki perendaman (leaching tank) atau dalam kolom leaching, tergantung pada desain pabrik dan jenis bijih.

Bijih dan larutan pelarut dicampur secara merata untuk memastikan kontak yang baik antara keduanya.

3. Reaksi Kimia:

Selama kontak dengan larutan pelarut, reaksi kimia terjadi di antara logam berharga dalam bijih dan larutan. Ini menyebabkan larutan melarutkan logam dari bijih tersebut.

Reaksi kimia ini dapat melibatkan oksidasi, reduksi, atau reaksi kompleks lainnya tergantung pada jenis bijih dan logamnya.

4. Kinetika Reaksi:

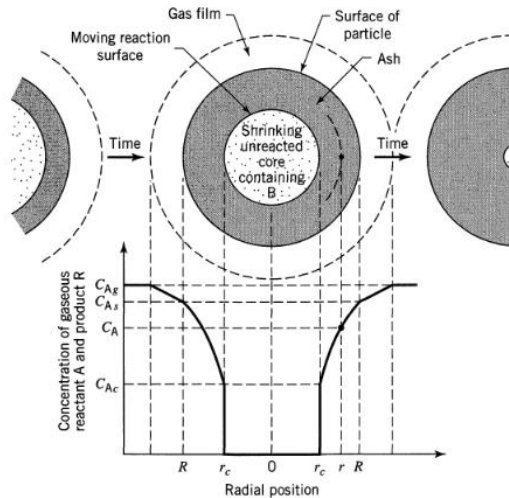
Kinetika reaksi dalam leaching adalah faktor penting. Ini mencakup kecepatan reaksi pelarutan logam dari bijih.

Faktor-faktor yang memengaruhi kinetika reaksi meliputi suhu, kecepatan pencampuran, tekanan, konsentrasi larutan pelarut, dan sifat bijih.

Karena ada lebih dari satu fase, pergerakan material dari fase ke fase harus dipertimbangkan dalam persamaan laju. Dengan demikian, ekspresi laju secara umum akan memasukkan istilah perpindahan massa sebagai tambahan dari istilah kinetika kimia yang biasa. Istilah perpindahan massa ini berbeda dalam jenis dan jumlah dalam berbagai jenis sistem heterogen.

Kinetika reaksi padat-cair biasanya dimodelkan menggunakan shrinking core model (SCM). Kinetika reaksi padat-cair dengan menggunakan "shrinking core model" adalah model matematis yang digunakan untuk memahami dan menggambarkan bagaimana reaksi kimia terjadi pada permukaan padatan dan mempengaruhi pengurangan ukuran inti padatan tersebut seiring berjalannya waktu. Model ini umumnya digunakan untuk menggambarkan reaksi pelarutan atau reaksi kimia lainnya yang terjadi

pada permukaan partikel padatan yang larut dalam cairan. Dalam "shrinking core model," padatan dianggap memiliki inti padatan yang semakin mengecil seiring berjalannya waktu. Inti padatan ini adalah bagian dari padatan yang belum bereaksi. Proses reaksi terjadi pada permukaan inti padatan. Ketika reaksi kimia berlangsung, lapisan padatan yang telah bereaksi akan menghilang, sehingga inti padatan akan menyusut.

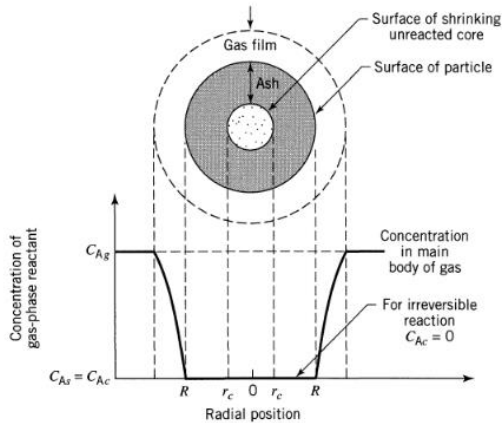


Gambar 4.1 Penyusutan inti dan perluasan product layer pada SCM

a. Film Diffusion Model:

- Asumsi Pencampuran Sempurna (Perfect Mixing): Model film diffusion mengasumsikan bahwa cairan di sekitar permukaan padatan dan di dalam film difusi (lapisan tipis di sekitar permukaan) selalu tercampur sempurna. Ini berarti konsentrasi zat reaktan dalam film difusi selalu sama dengan konsentrasi dalam cairan bulk.
- Asumsi Tidak Ada Perubahan Konsentrasi dalam Lapisan Difusi: Model ini mengasumsikan bahwa tidak ada perubahan signifikan dalam konsentrasi zat reaktan di dalam lapisan difusi saat reaksi

berlangsung. Dalam hal ini, laju reaksi terbatas oleh proses difusi dari cairan bulk ke permukaan padatan.



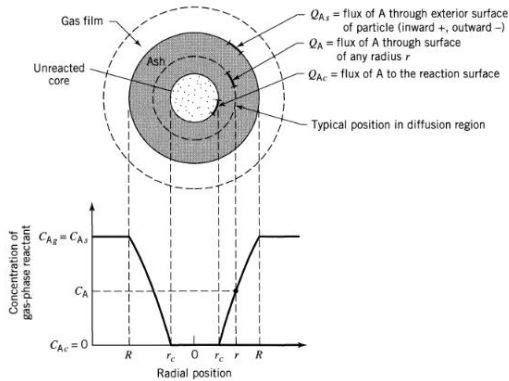
Gambar 4.2 Profil konsentrasi logam pada partikel menggunakan model film layer diffusion mengontrol jalannya leaching

$$kt = XB$$

Dimana k adalah konstanta kecepatan reaksi, t durasi leaching, dan XB adalah konversi / fraksi B pada waktu t

b. Ash Layer Diffusion Model:

- Asumsi Film Diffusion di Dalam Lapisan Abu: Model ini mengasumsikan bahwa reaksi kimia terjadi di dalam inti padatan yang berubah menjadi lapisan abu saat reaksi berlangsung. Dalam lapisan abu ini, ada asumsi film diffusion, di mana konsentrasi zat reaktan di dalamnya homogen.
- Asumsi Perubahan Ketebalan Lapisan Abu (Ash Layer): Model ini mengasumsikan bahwa ketebalan lapisan abu bertambah seiring berjalannya waktu karena reaksi kimia, sehingga mengurangi luas permukaan inti padatan yang belum bereaksi.



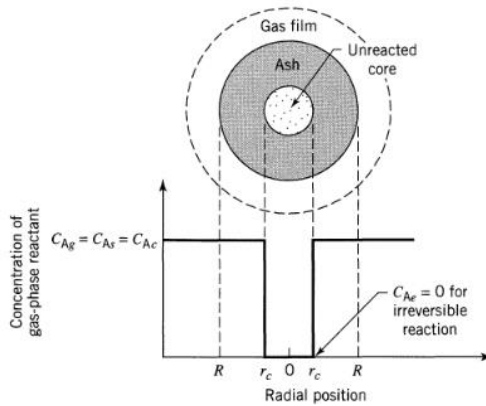
Gambar 4.3 Profil konsentrasi logam pada partikel menggunakan model ash layer diffusion mengontrol jalannya leaching

$$kt = 1 - 3(1 - XB)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - XB)$$

Dimana k adalah konstanta kecepatan reaksi, t durasi leaching, dan XB adalah konversi / fraksi B pada waktu t

c. Shrinking Core Model (Reaksi pada Permukaan Inti):

- Asumsi Inti Padatan yang Mengecil (Shrinking Core): Model ini mengasumsikan bahwa inti padatan yang belum bereaksi menyusut seiring berjalannya waktu karena reaksi kimia. Ini berarti bahwa reaksi kimia terjadi pada permukaan inti padatan yang tersisa.
- Asumsi Kinetika Reaksi di Permukaan Inti: Dalam model ini, ada asumsi bahwa laju reaksi pada permukaan inti padatan mengikuti hukum reaksi tertentu, seperti hukum orde pertama atau orde kedua.



Gambar 4.4 Profil konsentrasi logam pada partikel menggunakan model reaksi pada permukaan inti mengontrol jalannya leaching

$$kt = 1 - (1 - XB)^{\frac{1}{3}}$$

Dimana k adalah konstanta kecepatan reaksi, t durasi leaching, dan XB adalah konversi / fraksi B pada waktu t

5. Pengendapan Impuritas:

Dalam beberapa kasus, leaching juga dapat menghasilkan larutan yang mengandung impuritas. Oleh karena itu, biasanya diperlukan tahap pemisahan untuk menghilangkan impuritas dari larutan sebelum ekstraksi logam.

6. Pengendapan Logam:

Setelah logam berharga larut dalam larutan, langkah selanjutnya adalah memisahkan logam dari larutan. Ini dapat dilakukan melalui berbagai metode, termasuk pengendapan kimia, adsorpsi, elektrodeposisi, atau metode lain yang sesuai.

7. Pengendapan Sisa Bijih:

Setelah proses leaching selesai, bijih yang tersisa biasanya mengandung lebih sedikit logam berharga. Bijih ini dapat dibuang atau diproses lebih lanjut untuk mencari sisa logam berharga yang mungkin terlewat.

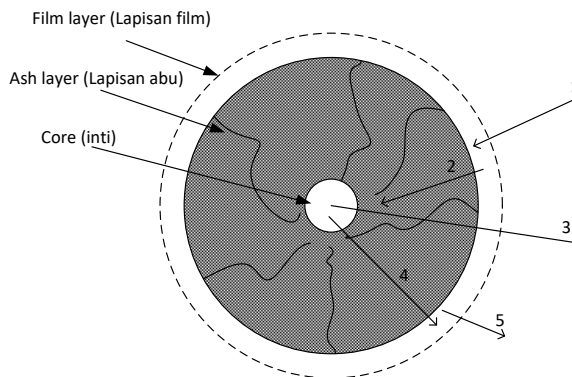
8. Rekoveri Pelarut:

Larutan pelarut yang digunakan dalam proses leaching dapat diregenerasi dan digunakan kembali dalam siklus proses untuk mengurangi pembuangan limbah dan biaya operasional.

Proses leaching adalah salah satu metode yang paling umum digunakan dalam ekstraksi logam dari bijih, terutama untuk logam-logam seperti tembaga, emas, dan uranium. Pemahaman yang baik tentang sifat-sifat bijih dan reaksi kimia yang terlibat sangat penting dalam merancang dan mengelola proses leaching yang efektif.

Tahapan leaching

Tahapan proses leaching ditunjukkan secara detail pada Gambar 4.5 berikut.



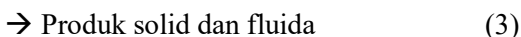
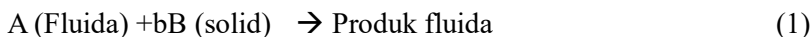
Gambar 4.5 Tahapan proses leaching

Keterangan:

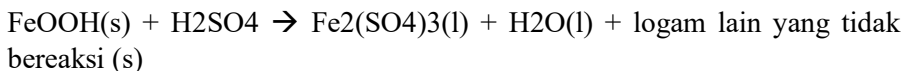
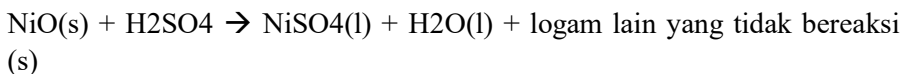
1. Pelarut dari badan pelarut berdifusi melalui lapisan film

2. Pelarut berdifusi dari lapisan film melalui lapisan abu
3. Pelarut bereaksi dengan logam target dan membentuk larutan produk
4. Larutan produk berdifusi melalui lapisan abu
5. Larutan produk berdifusi melalui lapisan film kembali ke badan pelarut

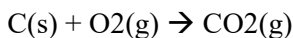
Proses leaching tipikalnya menghasilkan salah satu dari 3 tipe produk berikut:



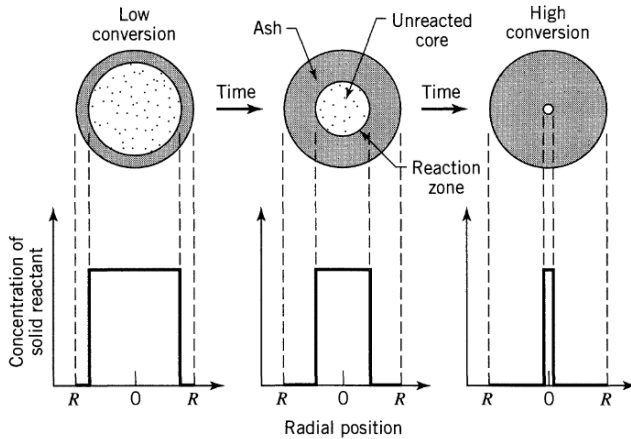
Reaksi (1) terjadi apabila semua B (solid) terlarut oleh pelarut menjadi produk fluida, produk solid terbentuk pada reaksi (2) terjadi apabila semua pelarut diserap dan menghasilkan produk solid, dan reaksi (3) terjadi apabila terdapat pelarutan sebagian dari B (solid). Salah satu contoh proses leaching adalah proses leaching Ni dan Fe dari laterit (Ni,FeOOH)



Atau reaksi pembakaran karbon



Perilaku konversi dari proses leaching disajikan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Perilaku konversi saat proses leaching

Terlihat bahwa semakin lama proses leaching semakin kecil diameter unreacted core pada partikel dan area lapisan abu semakin luas.

4.1.2. *Presipitasi kimia*

Presipitasi kimia adalah proses di mana senyawa kimia mengendap dari larutan dalam bentuk padatan. Ini terjadi ketika konsentrasi zat terlarut dalam larutan melebihi batas kelarutan, yang disebabkan oleh perubahan kondisi seperti penurunan suhu, penambahan reagen kimia tertentu, atau perubahan pH. Proses presipitasi kimia memiliki beberapa karakteristik penting:

1. **Kelebihan Kelarutan (Supersaturation):**

Proses presipitasi terjadi ketika larutan memiliki konsentrasi zat terlarut yang melebihi batas kelarutan pada kondisi tertentu. Ini berarti zat terlarut pada awalnya terlarut dalam larutan tetapi keluar dari larutan karena kondisi berubah.

Supersaturation adalah kondisi di mana konsentrasi zat terlarut dalam larutan melebihi batas kelarutan pada suhu dan tekanan tertentu. Ini berarti ada lebih banyak zat terlarut dalam larutan daripada yang seharusnya larut pada kondisi tersebut. Supersaturation terjadi ketika zat terlarut telah larut

dalam larutan pada suhu yang lebih tinggi dan kemudian larutan tersebut didinginkan ke suhu yang lebih rendah tanpa mengendapkan zat terlarut yang larut sebelumnya. Fenomena ini memiliki beberapa karakteristik penting:

Kelebihan Konsentrasi: Dalam supersaturation, jumlah zat terlarut dalam larutan melebihi nilai yang sesuai dengan batas kelarutan pada suhu tertentu. Dengan kata lain, larutan mengandung lebih banyak zat terlarut daripada yang bisa larut dalam keadaan jenuh.

Kondisi Tidak Stabil: Supersaturation adalah kondisi yang tidak stabil. Ini karena larutan dalam keadaan supersaturasi cenderung untuk mengendap dan mencapai keadaan jenuh (kesetimbangan) begitu ada stimulus atau nukleasi yang memicu pengendapan.

Penciptaan Supersaturation: Supersaturation dapat diciptakan dengan beberapa metode, seperti:

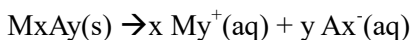
- Menghangatkan larutan dan kemudian mendinginkannya secara cepat.
- Menambahkan zat terlarut ke larutan panas dan kemudian mendinginkannya.
- Menggunakan metode khusus dalam laboratorium atau industri untuk menciptakan kondisi supersaturation.

2. Batas Kelarutan:

Setiap senyawa kimia memiliki batas kelarutan yang merupakan jumlah maksimum zat terlarut yang dapat larut dalam larutan pada suhu dan tekanan tertentu. Ketika konsentrasi melebihi batas kelarutan, presipitasi terjadi.

Salah satu cara untuk menentukan batas kelarutan adalah dengan mengetahui hasil kali kelarutannya (K_{sp}). Konstanta hasil kali kelarutan digunakan untuk menggambarkan larutan jenuh senyawa ionik dengan kelarutan yang relatif rendah. Larutan jenuh berada dalam keadaan

kesetimbangan dinamis antara senyawa ionik yang terlarut, terdisosiasi, dan padatan yang tidak terlarut.



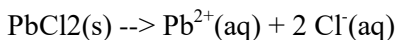
Konstanta keseimbangan umum untuk proses tersebut dapat ditulis sebagai:

$$K_c = [My^+]^x [Ax^-]^y$$

Karena konstanta kesetimbangan mengacu pada hasil kali konsentrasi ion-ion yang ada dalam larutan jenuh senyawa ionik, maka konstanta ini diberi nama konstanta hasil kali kelarutan, dan diberi simbol K_{sp} . Tetapan hasil kali kelarutan dapat dihitung dan digunakan dalam berbagai aplikasi.

Contoh: Hitunglah konstanta hasil kali kelarutan untuk timbal (II) klorida, jika 50 mL larutan jenuh timbal (II) klorida diketahui mengandung 0,2207 g timbal (II) klorida yang terlarut di dalamnya.

- Pertama, tuliskan persamaan untuk pelarutan timbal (II) klorida dan ekspresi kesetimbangan untuk proses pelarutan.



$$K_{sp} = [Pb^{2+}][Cl^-]^2$$

- Kedua, ubahlah jumlah timbal (II) klorida terlarut menjadi mol per liter.

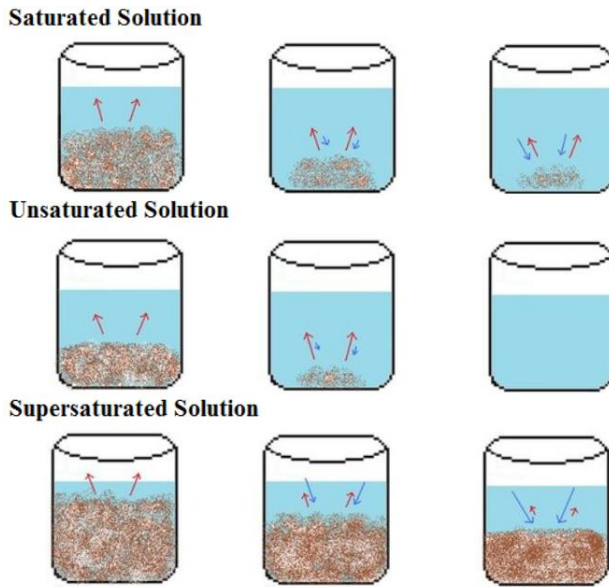
$$0.2207 \text{ g } PbCl_2 \frac{1}{50 \text{ mL}} \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} \frac{1 \text{ mol } PbCl_2}{278.1 \text{ g } PbCl_2} = 0.0159 \text{ M } PbCl_2$$

- Ketiga, buat tabel "MRS".

	PbCl₂	Pb²⁺	Cl⁻
Mula-mula	All solid	0	0
Reaksi	- 0.0159 M (dissolves)	+ 0.0159 M	+ 0.0318 M
Setimbang	Less solid	0.0159 M	0.0318 M

- Keempat, substitusikan konsentrasi kesetimbangan ke dalam ekspresi kesetimbangan dan selesaikan untuk K_{sp} .

$$K_{sp} = [0.0159][0.0318]^2 = 1.61 \times 10^{-5}$$



Gambar 4.7 Perbedaan larutan saturated, unsaturated dan supersaturated

3. Faktor Pemicu:

Presipitasi dapat dipicu oleh berbagai faktor seperti penurunan suhu, perubahan pH, atau penambahan senyawa pengendap (pereaksi pengendap). Misalnya, ketika dua larutan yang mengandung ion yang membentuk senyawa yang tidak larut dicampurkan, senyawa tersebut dapat terbentuk dan mengendap.

4. Bentuk Padatan:

Hasil dari proses presipitasi adalah pembentukan padatan yang disebut presipitat. Presipitat ini dapat berupa partikel-partikel halus atau

kristal-kristal yang lebih besar tergantung pada kondisi dan jenis senyawa yang mengendap.

5. Pemisahan Senyawa:

Presipitasi kimia sering digunakan dalam berbagai aplikasi untuk memisahkan senyawa tertentu dari larutan. Contohnya adalah pemisahan ion logam berharga dari larutan limbah industri atau pemurnian logam dalam industri metalurgi.

6. Pengendapan Gravitasi:

Biasanya, partikel padat yang mengendap akan jatuh ke dasar wadah larutan karena pengaruh gravitasi. Setelah proses selesai, padatan dapat diambil dengan mengendapkan atau menyaring larutan.

7. Pengendalian Faktor Proses:

Presipitasi kimia adalah proses yang dapat dikontrol dengan hati-hati melalui pengaturan faktor-faktor seperti suhu, pH, dan penambahan reagen kimia. Ini memungkinkan untuk mencapai hasil yang diinginkan dalam pemisahan atau pemurnian senyawa.

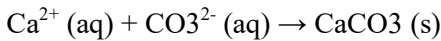
Presipitasi kimia adalah teknik penting dalam kimia analitik, pengolahan limbah, industri farmasi, dan banyak aplikasi lainnya. Pemahaman tentang konsep ini memungkinkan penggunaannya dalam berbagai proses kimia untuk tujuan pemisahan, pemurnian, dan pengendalian kualitas.

Berikut adalah beberapa contoh reaksi pengendapan kimia yang umum terjadi:

Pengendapan Garam:

Reaksi antara ion-ion positif dan ion-ion negatif dalam larutan dapat menghasilkan pengendapan garam. Sebagai contoh, jika larutan berisi ion kalsium (Ca^{2+}) dan ion karbonat (CO_3^{2-}), mereka dapat bereaksi untuk membentuk garam kalsium karbonat (CaCO_3), yang akan mengendap sebagai endapan padatan putih.

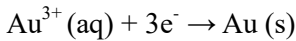
Contoh Reaksi:



Pengendapan Logam dalam Proses Elektroplating:

Proses elektroplating melibatkan pengendapan lapisan tipis logam pada permukaan benda dengan mengalirkan arus listrik melalui larutan elektrolit yang mengandung ion logam yang akan dideposisikan. Contoh umumnya adalah elektroplating emas pada perhiasan logam.

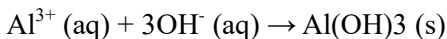
Contoh Reaksi (Elektroplating Emas):



Pengendapan Hidroksida Logam:

Ketika larutan berisi ion logam yang membentuk hidroksida yang tidak larut, penambahan larutan basa seperti natrium hidroksida (NaOH) dapat menyebabkan pengendapan hidroksida logam. Misalnya, larutan ion aluminium (Al^{3+}) dapat mengendap sebagai hidroksida aluminium ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ketika larutan natrium hidroksida ditambahkan.

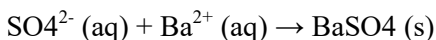
Contoh Reaksi:



Pengendapan Sulfat:

Reaksi antara larutan sulfat (SO_4^{2-}) dan larutan barium klorida (BaCl_2) menghasilkan pengendapan sulfat barium (BaSO_4) yang sangat tidak larut. Ini digunakan dalam analisis kimia sebagai metode untuk mengidentifikasi keberadaan ion sulfat dalam larutan.

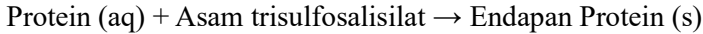
Contoh Reaksi:



Pengendapan Protein dalam Analisis Biokimia:

Dalam analisis biokimia, protein dapat diendapkan dari larutan dengan menggunakan reagen seperti asam trisulfosalisilat. Protein-protein ini kemudian mengendap dan dapat dianalisis lebih lanjut.

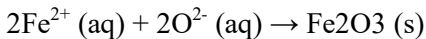
Contoh Reaksi:



Pengendapan dalam Reaksi Redoks:

Beberapa reaksi redoks menghasilkan pengendapan senyawa-senyawa yang kurang larut. Sebagai contoh, dalam reaksi antara ion besi (Fe^{2+}) dan ion oksigen (O^{2-}), senyawa besi oksida (Fe_2O_3) dapat terbentuk dan mengendap sebagai endapan merah-brown.

Contoh Reaksi:



4.1.3. Ion exchange (pertukaran ion)

Proses pertukaran ion (ion exchange) adalah metode kimia yang digunakan untuk mengganti ion-ion tertentu dalam larutan dengan ion-ion lain dalam suatu medium pertukaran. Proses ini bergantung pada sifat-sifat adsorpsi ionik zat tertentu pada permukaan bahan pertukaran ion, yang biasanya berupa resin atau material padat lainnya. Berikut adalah penjelasan lebih detail tentang proses pertukaran ion:

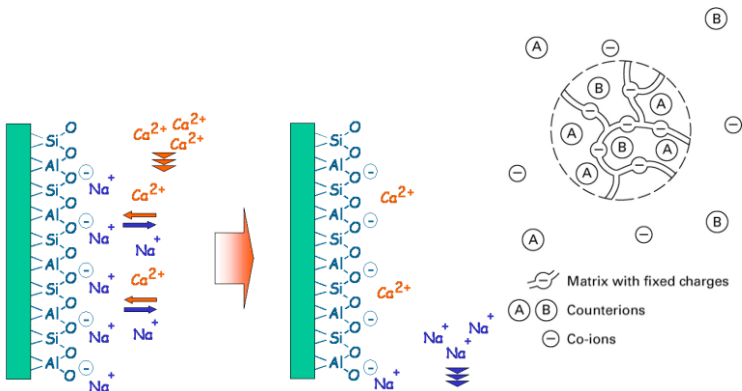
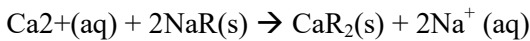
- Dalam proses pertukaran ion, bahan pertukaran ion yang digunakan adalah zat padat dengan permukaan yang memiliki gugus fungsional yang mampu menangkap dan melepaskan ion. Resin kation adalah contoh bahan yang digunakan untuk menangkap ion-ion positif (kation), sedangkan resin anion menangkap ion-ion negatif (anion).
- Ion-ion dalam larutan yang mengalir melalui bahan pertukaran ion akan berinteraksi dengan gugus fungsional pada permukaan bahan tersebut. Gugus fungsional ini memiliki afinitas terhadap jenis ion tertentu. Ion-ion dalam larutan akan menggantikan ion-ion yang terikat pada permukaan bahan pertukaran ion.

- Misalnya, dalam resin kation, ion hidrogen (H^+) pada permukaan resin akan digantikan oleh ion kation yang ada dalam larutan seperti natrium (Na^+) atau kalsium (Ca^{2+}).
- Terdapat dua jenis pertukaran ion utama:
 - a. Pertukaran Kation: Dalam pertukaran kation, ion positif dalam larutan digantikan oleh ion positif yang terikat pada bahan pertukaran ion (resin kation).
 - b. Pertukaran Anion: Dalam pertukaran anion, ion negatif dalam larutan digantikan oleh ion negatif yang terikat pada bahan pertukaran ion (resin anion).
- Setelah bahan pertukaran ion jenuh dengan ion-ion tertentu, ia perlu diregenerasi agar dapat digunakan kembali. Regenerasi melibatkan proses mencuci bahan dengan larutan yang mengandung ion-ion yang lebih kuat yang dapat menggantikan ion-ion yang telah terikat.
- Pertukaran ion efektif dalam menghilangkan ion-ion tertentu dari larutan dan dapat diarahkan untuk menghasilkan air atau larutan dengan komposisi yang diinginkan. Ini adalah metode yang bersifat kontekstual, yang berarti dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesifik dalam pengolahan air, industri, atau laboratorium kimia.
- Berikut adalah beberapa kegunaan utama ion exchange dalam industri pengolahan mineral:
 - a. Pemisahan Mineral Berharga: Dalam pertambangan dan pengolahan mineral, kadang-kadang diperlukan untuk memisahkan mineral berharga dari mineral pengotor atau mineral yang tidak diinginkan. Ion exchange dapat digunakan untuk memisahkan mineral berharga dari mineral lain dengan menangkap ion-ion yang mengandung mineral tersebut dan melepaskan ion-ion pengotor.
 - b. Pemurnian Mineral: Proses ion exchange dapat digunakan untuk memurnikan mineral tertentu dari kontaminan atau mineral pengotor. Ini adalah langkah penting dalam produksi mineral yang sangat murni seperti mineral untuk industri semikonduktor.
 - c. Pemisahan Logam: Ion exchange dapat digunakan untuk memisahkan logam-logam berharga dari larutan dengan menangkap ion-ion logam tertentu pada bahan pertukaran ion. Ini

berguna dalam pemurnian logam atau pemisahan logam dalam industri metalurgi.

- d. Pemurnian Air: Dalam industri pengolahan mineral, air sering digunakan dalam berbagai proses. Ion exchange dapat digunakan untuk menghilangkan ion-ion yang dapat membahayakan atau mengganggu proses pengolahan mineral dari air, sehingga menjaga kualitas air yang digunakan dalam proses.
- e. Regenerasi Larutan: Dalam proses pengolahan mineral, larutan kimia sering digunakan untuk ekstraksi atau pemisahan mineral. Setelah digunakan, larutan ini mungkin jenuh dengan ion-ion tertentu. Ion exchange digunakan untuk meregenerasi larutan ini dengan menghilangkan ion-ion yang tidak diinginkan dan menggantinya dengan ion-ion yang diinginkan untuk digunakan kembali dalam proses.
- f. Pengendalian pH: Ion exchange juga dapat digunakan untuk mengendalikan pH dalam proses pengolahan mineral. Ini dapat digunakan untuk menjaga pH larutan pada tingkat yang diperlukan untuk mengoptimalkan reaksi kimia tertentu.

Contoh dari proses ini adalah pertukaran ion Na dan Ca menggunakan ion exchanger, sebagai berikut:



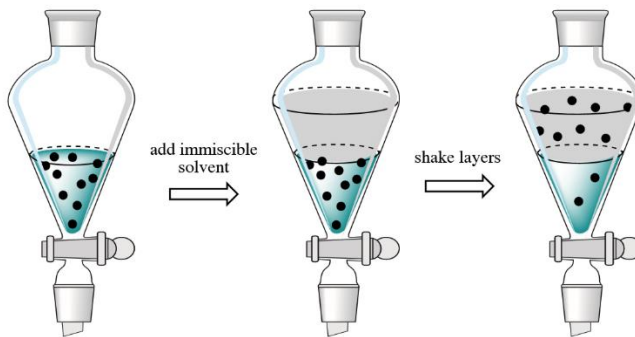
Gambar 4.8 Skema pertukaran ion Na^+ dan Ca^{2+}

4.1.4. *Solvent extraction (ekstraksi pelarut)*

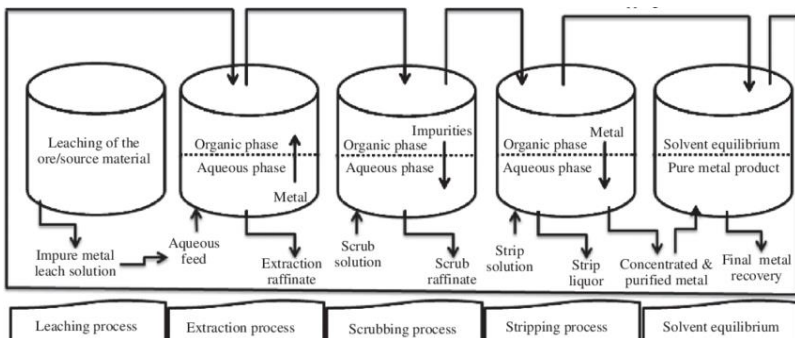
Ekstraksi pelarut (solvent extraction), juga dikenal sebagai ekstraksi cair-cair (liquid-liquid extraction), adalah proses pemisahan komponen-komponen dalam suatu campuran berdasarkan perbedaan dalam kelarutan mereka dalam dua atau lebih pelarut yang tidak bercampur. Proses ini sering digunakan dalam industri kimia, pengolahan mineral, pemurnian logam, pengolahan minyak dan gas, dan banyak aplikasi lainnya. Berikut adalah penjelasan lebih rinci tentang solvent extraction:

- Prinsip dasar solvent extraction adalah bahwa berbagai komponen dalam campuran akan terdistribusi antara dua pelarut yang tidak bercampur (biasanya pelarut organik dan air) berdasarkan kelarutan mereka dalam masing-masing pelarut.
- Proses ini mengambil keuntungan dari perbedaan afinitas komponen terhadap pelarut organik dan air. Komponen yang lebih larut dalam pelarut organik akan terkonsentrasi dalam fase organik, sementara komponen yang lebih larut dalam air akan terkonsentrasi dalam fase air.
- Langkah-langkah Proses Solvent Extraction:
 - a. Kontak Awal: Campuran yang akan dipisahkan dicampur dengan pelarut organik dalam suatu perangkat ekstraksi. Pada tahap awal, kedua fase cair ini terpisah secara jelas.
 - b. Adsorpsi pada Interface: Ketika campuran larutan pertama kali dicampur dengan pelarut organik, komponen-komponen dalam campuran mulai berinteraksi dengan fase organik pada antarmuka antara kedua fase cair. Ini terjadi karena ada beberapa interaksi antara molekul-molekul dalam pelarut organik dengan molekul-molekul komponen dalam campuran.
 - c. Distribusi Komponen: Secara bertahap, komponen-komponen dalam campuran akan mulai terdistribusi antara fase organik dan fase air berdasarkan kelarutannya. Komponen-komponen yang lebih larut dalam fase organik akan cenderung berpindah ke fase organik, sedangkan komponen-komponen yang lebih larut dalam air akan tetap berada dalam fase air.

- d. Pencampuran dan Pencampuran Balik: Fase-fase cair ini kemudian dicampurkan secara intensif untuk memastikan kontak yang baik antara komponen-komponen dan pelarut. Pencampuran ini memfasilitasi pertukaran komponen antara dua fase.
- e. Pemisahan Fase Cair: Setelah pencampuran yang cukup lama untuk mencapai keseimbangan, fase organik dan fase air dipisahkan. Pemisahan ini biasanya menggunakan pemisah seperti sentrifugasi atau dekantasi.
- f. Pemulihan Komponen: Setelah pemisahan, komponen yang diinginkan dapat dipulihkan dari salah satu fase cair, tergantung pada kebutuhan. Misalnya, jika komponen yang diinginkan adalah yang larut dalam fase organik, maka fase organik mungkin diproses lebih lanjut untuk memulihkan komponen tersebut.



Gambar 4.9 Skematik proses ekstraksi pelarut



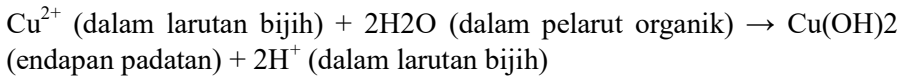
Gambar 4.10 Tipikal proses ekstraksi pelarut pada pengolahan mineral

Contoh proses dalam pemurnian Cu dari bijih kalkopirit (CuFeS_2)

Proses leaching



Proses ekstraksi pelarut



Berikut adalah beberapa pertimbangan yang dapat membantu Anda menentukan apakah ion tersebut akan lebih larut dalam fase organik:

- Afinitas Pelarut: Pertimbangkan afinitas ion terhadap pelarut organik dan air yang digunakan dalam ekstraksi. Jika ion tersebut memiliki afinitas yang lebih besar terhadap pelarut organik, maka cenderung lebih larut dalam fase organik.
- Koefisien Partisi (Partition Coefficient): Koefisien partisi (K) adalah perbandingan konsentrasi ion dalam fase organik dan fase air dalam kondisi tertentu. Jika $K > 1$, ini menunjukkan bahwa ion tersebut lebih larut dalam fase organik. Perhitungan eksperimental atau perhitungan teoretis dapat digunakan untuk menentukan K .

$$K = \frac{[\text{zat dalam fase organik}]}{[\text{zat dalam fase cair}]}$$

Di mana:

[Zat dalam fase organik] adalah konsentrasi zat dalam fase organik.

[Zat dalam fase air] adalah konsentrasi zat dalam fase air.

Contoh:

Misalkan kita memiliki senyawa A (asam benzoat) yang akan diekstraksi dari air ke pelarut organik (etanol) dan kita ingin menentukan apakah senyawa ini lebih cenderung larut dalam etanol daripada dalam air. Data eksperimen menunjukkan bahwa konsentrasi asam benzoat dalam etanol adalah 0,1 M, sedangkan dalam air adalah 0,01 M:

$$K = \frac{[\text{zat dalam fase organik}]}{[\text{zat dalam fase cair}]}$$

$$K = \frac{0.1M}{0.01M} = 10$$

- a. Jika nilai $K > 1$: Ini menunjukkan bahwa zat lebih larut dalam fase organik (etanol dalam kasus ini) daripada dalam fase air. Dalam contoh ini, $K > 1$ ($K = 10$), yang berarti asam benzoat lebih cenderung larut dalam etanol daripada dalam air. Oleh karena itu, ekstraksi ke etanol akan lebih efisien daripada ekstraksi ke air.
 - b. Jika nilai $K = 1$: Ini menunjukkan bahwa zat memiliki kelarutan yang sama dalam kedua pelarut. Dalam kasus ini, ekstraksi ke etanol atau air akan sama efisien.
 - c. Jika nilai $K < 1$: Ini menunjukkan bahwa zat lebih larut dalam fase air daripada dalam fase organik. Dalam konteks ekstraksi, ini berarti zat lebih cenderung tetap dalam fase air.
- Sifat Ion: Sifat kimia ion tersebut memainkan peran penting. Ion-ion dengan muatan yang lebih besar atau struktur molekuler yang lebih kompleks cenderung memiliki afinitas yang berbeda terhadap pelarut organik dan air.
 - Polaritas Pelarut: Sifat polaritas pelarut organik dan air juga memengaruhi kelarutan ion. Jika pelarut organik kurang polar daripada air, ion polar cenderung lebih larut dalam fase organik. Berikut adalah beberapa pelarut organik yang sering digunakan dalam proses solvent extraction di industri pengolahan mineral:

- a. Kerosin: Kerosin adalah pelarut organik yang umum digunakan dalam ekstraksi pelarut untuk pemisahan mineral, terutama dalam pemisahan sulfida logam.
 - b. D2EHPA (Di-2-Ethylhexyl Phosphoric Acid): D2EHPA adalah salah satu ekstrakтан organik yang digunakan untuk ekstraksi pelarut dalam pemisahan logam dari campuran mineral. Ini sering digunakan dalam pemisahan logam berat seperti uranium dan thorium.
 - c. TBP (Tributyl Phosphate): TBP adalah agen ekstrakтан organik yang digunakan dalam solvent extraction untuk pemisahan logam, terutama logam transisi seperti kobalt, nikel, dan tembaga.
 - d. Cyanex: Seri senyawa Cyanex, seperti Cyanex 272 (bis(2,4,4-trimethylpentyl)phosphinic acid), digunakan dalam solvent extraction untuk pemisahan logam, termasuk logam langka seperti cerium dan lantanida.
 - e. Amonia Cair (Liquid Ammonia): Amonia cair dapat digunakan sebagai pelarut dalam solvent extraction untuk pemisahan beberapa logam berat.
 - f. MIBC (Methyl Isobutyl Carbinol): MIBC adalah pelarut organik yang digunakan dalam beberapa proses ekstraksi pelarut mineral untuk pemisahan mineral sulfida.
 - g. DEHPA (Di(2-ethylhexyl)phosphoric acid): DEHPA adalah ekstrakтан organik yang digunakan dalam solvent extraction untuk pemisahan logam seperti logam tanah jarang.
 - h. Alkil Amina: Berbagai jenis alkil amina digunakan dalam solvent extraction untuk pemisahan logam berat.
 - i. Alkil Fosfat: Alkil fosfat, seperti tributil fosfat, juga digunakan dalam solvent extraction untuk pemisahan logam.
 - j. Ketone dan Ester: Beberapa senyawa seperti aseton, metil isobutil keton (MIBK), dan etil asetat juga dapat digunakan sebagai pelarut organik dalam solvent extraction, tergantung pada kebutuhan aplikasi.
- Reaksi Kimia: Reaksi kimia yang terjadi selama proses ekstraksi juga dapat memengaruhi kelarutan ion. Misalnya, pembentukan senyawa

kompleks antara ion dan molekul tertentu dalam fase organik atau air dapat memengaruhi kelarutan ion tersebut.

- Suhu: Suhu juga dapat memengaruhi kelarutan ion dalam pelarut. Perubahan suhu dapat mengubah koefisien partisi dan karenanya memengaruhi kelarutan ion dalam fase organik dan air.
- Penggunaan Bahan Tambahan: Beberapa bahan tambahan seperti agen ekstraksi (ekstraktan) atau kompleksan (pembentuk kompleks) dapat digunakan untuk meningkatkan kelarutan ion dalam fase organik atau air.

4.2. Proses Pirometalurgi

Pirometalurgi adalah cabang dari metalurgi ekstraktif dan melibatkan perlakuan termal mineral dan bijih metalurgi serta konsentrat untuk menghasilkan transformasi fisik dan kimiawi pada bahan untuk memungkinkan rekoveri logam berharga

4.2.1. Kalsinasi

Kalsinasi adalah tahap awal dalam proses pirometalurgi. Pada tahap ini, bijih atau konsentrat bijih yang mengandung logam-logam berharga dipanaskan pada suhu tinggi, tetapi di bawah suhu peleburan. Tujuan utama kalsinasi adalah menghilangkan air, karbon dioksida, dan volatil lainnya dari bijih serta mengubah beberapa senyawa mineral dalam bijih menjadi bentuk yang lebih reaktif. Ini adalah langkah persiapan sebelum tahap peleburan atau reduksi yang sebenarnya.

Tujuan Utama Kalsinasi:

- Penghilangan Komponen Volatil: Tujuan utama dari kalsinasi adalah menghilangkan komponen volatil dari bijih atau bahan mentah logam. Komponen volatil ini dapat mencakup air, karbon dioksida, komponen organik, dan sebagainya. Penghilangan komponen volatil ini sering kali diperlukan karena mereka dapat mengganggu proses-proses selanjutnya dalam pengolahan mineral dan logam.
- Pemisahan dan Pemurnian: Kalsinasi juga dapat digunakan untuk pemisahan dan pemurnian logam-logam tertentu dari bijih. Misalnya, dalam kalsinasi bijih seng (sphalerite), seng sulfida dapat diubah

menjadi oksida seng (ZnO) yang lebih mudah dipisahkan dari impuritas lainnya.

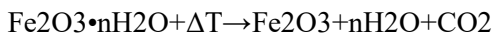
Proses Kalsinasi:

Proses kalsinasi melibatkan pemanasan bijih pada suhu yang cukup tinggi, tetapi di bawah suhu peleburan logam yang terkandung dalam bijih. Beberapa hal yang terjadi selama proses kalsinasi meliputi:

- Pemanasan Awal: Bijih atau bahan mentah logam diawali dengan pemanasan pada suhu yang relatif rendah untuk menghilangkan air dan volatil lainnya yang mungkin ada dalam bahan tersebut.
- Pemanasan Tinggi: Kemudian, bahan tersebut dipanaskan pada suhu yang lebih tinggi, sering kali dalam tungku atau reaktor. Suhu yang digunakan akan bervariasi tergantung pada jenis bijih dan tujuan kalsinasi.
- Oksidasi Terkontrol: Selama kalsinasi, kondisi oksidasi biasanya dikendalikan. Ini berarti pasokan oksigen atau udara diatur sedemikian rupa sehingga sebagian besar reaksi yang terjadi adalah oksidasi komponen volatil atau reaksi yang diinginkan.
- Perubahan Mineral: Dalam beberapa kasus, selama kalsinasi, senyawa mineral dalam bijih dapat mengalami perubahan kimia, seperti dekomposisi atau konversi menjadi bentuk yang lebih reaktif. Ini dapat mempersiapkan bijih untuk tahap selanjutnya dalam proses pirometalurgi.

Contoh Aplikasi Kalsinasi:

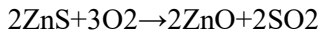
- Kalsinasi bijih besi (iron ore) dapat menghilangkan air dan karbon dioksida dari bijih, meninggalkan besi oksida sebagai produk. Besi oksida ini kemudian dapat digunakan dalam tahap selanjutnya untuk memproduksi besi atau baja.



Dalam reaksi ini, bijih besi ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) mengalami dehidrasi (penghilangan air) dan dekarbonisasi (penghilangan karbon dioksida)

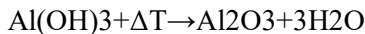
selama kalsinasi. Hasilnya adalah besi oksida (Fe_2O_3) sebagai produk utama bersama dengan air (H_2O) dan karbon dioksida (CO_2) yang terbentuk sebagai produk sampingan.

- Kalsinasi bijih seng sulfida (sphalerite) mengubahnya menjadi oksida seng (ZnO), yang kemudian dapat diolah lebih lanjut untuk memisahkan seng dari impuritas lainnya.



Dalam reaksi ini, bijih seng sulfida (2ZnS) bereaksi dengan oksigen (3O_2) selama kalsinasi. Hasilnya adalah oksida seng (2ZnO) sebagai produk utama bersama dengan dioksida belerang (2SO_2) yang terbentuk sebagai produk sampingan.

- Kalsinasi bijih alumina (bauxite) menghasilkan alumina (Al_2O_3), yang digunakan dalam produksi aluminium.



Dalam reaksi ini, bijih alumina ($\text{Al}(\text{OH})_3$) mengalami dekomposisi (penghilangan air) selama kalsinasi. Hasilnya adalah alumina (Al_2O_3) sebagai produk utama bersama dengan air (H_2O) yang terbentuk sebagai produk sampingan.

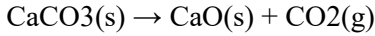
Panas yang dibutuhkan untuk proses

Suhu kalsinasi untuk reaksi biasanya ditentukan oleh suhu dekomposisi termal atau suhu transisi untuk transisi fase. Suhu ini biasanya didefinisikan sebagai suhu di mana energi bebas Gibbs standar untuk reaksi kalsinasi tertentu sama dengan nol. Misalnya, dalam kalsinasi batu kapur (kalsium karbonat), proses dekomposisi terjadi pada 900 hingga 1200 °C.

Contoh

Mari kita lihat kalsinasi batu kapur (Limestone, CaCO_3), yang merupakan contoh umum di industri.

Reaksinya adalah sebagai berikut:



ΔH reaksi pada 298 K = 177.100 J/mol

ΔS reaksi pada 298 K = 158 J/mol.K

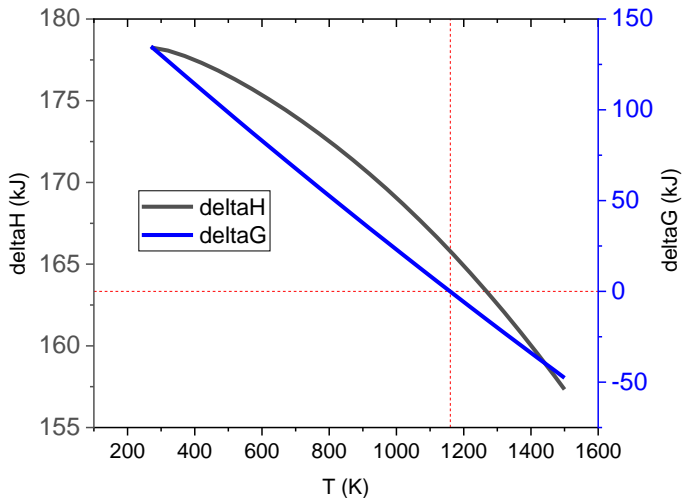
$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

$\Delta G = 0$ (reaksi dapat terjadi jika nilai $\Delta G \leq 0$)

$$T \Delta S = \Delta H$$

$$T = \Delta H / \Delta S$$

$$T = 177.100 / 158 = 1120 \text{ K}$$



Gambar 4.11 Entalpi dan perubahan energi bebas Gibbs untuk kalsinasi limestone

4.2.2. *Roasting*

Roasting adalah salah satu tahap dalam proses pirometalurgi di mana bijih atau bahan mentah logam dipanaskan pada suhu tinggi dalam kondisi oksidasi terkontrol. Tujuan dari proses roasting dapat bervariasi tergantung

pada jenis bijih dan logam yang sedang diolah. Berikut adalah penjelasan lebih rinci tentang proses roasting:

Tujuan Proses Roasting:

Proses roasting memiliki beberapa tujuan utama, termasuk:

- Penghilangan Komponen Volatil: Proses ini bertujuan untuk menghilangkan komponen volatil dari bijih atau bahan mentah logam. Ini dapat mencakup air, karbon dioksida, belerang, dan sebagainya. Penghilangan komponen volatil ini dapat mengubah sifat-sifat bijih atau logam.
- Praperlakuan Logam: Roasting dapat digunakan sebagai praperlakuan bijih sebelum tahap selanjutnya dalam proses pirometalurgi. Ini dapat merubah mineral dalam bijih menjadi bentuk yang lebih reaktif atau lebih mudah untuk dipisahkan.
- Pemisahan Logam dari Impuritas: Dalam beberapa kasus, roasting dapat digunakan untuk mengubah senyawa logam dalam bijih menjadi bentuk oksida yang lebih mudah dipisahkan dari impuritas lainnya.

Proses Roasting:

- Proses roasting melibatkan pemanasan bijih pada suhu tinggi dalam tungku atau reaktor di bawah kondisi oksidasi terkontrol. Beberapa hal yang terjadi selama proses roasting adalah sebagai berikut:
- Pemanasan Awal: Bijih atau bahan mentah logam diawali dengan pemanasan pada suhu yang rendah untuk menghilangkan komponen volatil awal seperti air.
- Pemanasan Tinggi: Kemudian, bahan tersebut dipanaskan pada suhu yang lebih tinggi. Pada tahap ini, terjadi oksidasi komponen bijih yang terdiri dari logam atau mineral yang akan diolah.
- Oksidasi Terkontrol: Selama roasting, kondisi oksidasi diatur sedemikian rupa sehingga reaksi oksidasi terjadi sesuai dengan yang diinginkan. Pengendalian kondisi oksidasi sangat penting dalam menentukan hasil proses roasting.

Contoh Aplikasi Proses Roasting:

- Roasting bijih sulfida seperti pirit (FeS_2) menghasilkan oksida besi (Fe_2O_3) dan dioksida belerang (SO_2). Oksida besi ini lebih mudah dipisahkan dari impuritas dan digunakan dalam produksi besi dan baja.
- Roasting bijih tembaga sulfida seperti kalkopirit (CuFeS_2) menghasilkan oksida tembaga (Cu_2O) dan dioksida belerang (SO_2). Oksida tembaga ini kemudian digunakan dalam produksi tembaga.

Reaksi kimia:



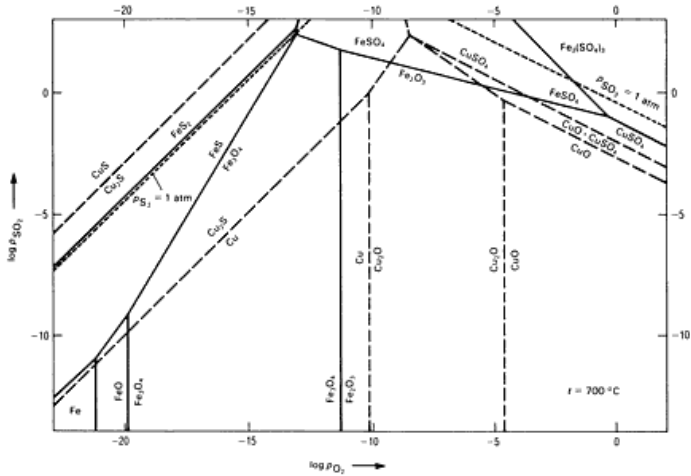
Dalam reaksi ini, bijih tembaga sulfida (2CuFeS_2) bereaksi dengan oksigen (3O_2) selama roasting. Hasilnya adalah oksida tembaga ($2\text{Cu}_2\text{O}$) sebagai produk utama bersama dengan oksida besi (2FeO) dan dioksida belerang (4SO_2) yang terbentuk sebagai produk sampingan.

- Roasting bijih antimon sulfida (stibnite) mengubahnya menjadi antimon oksida (Sb_2O_3), yang digunakan dalam berbagai aplikasi termasuk pembuatan keramik.

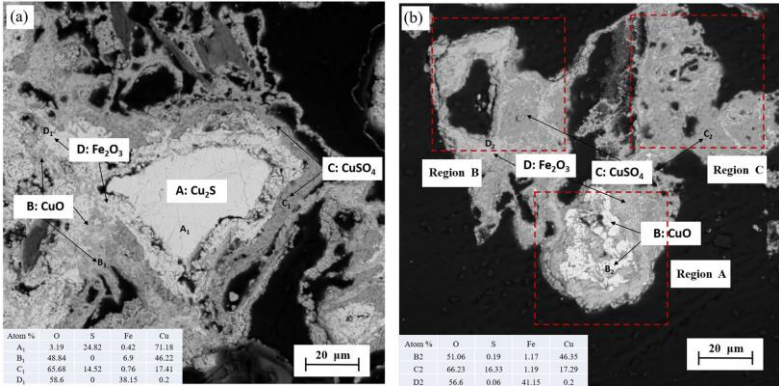
Reaksi kimia:



Dalam reaksi ini, bijih antimon sulfida ($2\text{Sb}_2\text{S}_3$) bereaksi dengan oksigen (9O_2) selama roasting. Hasilnya adalah antimon oksida ($4\text{Sb}_2\text{O}_3$) sebagai produk utama bersama dengan dioksida belerang (6SO_2) yang terbentuk sebagai produk sampingan.



Gambar 4.12 Diagram kesetimbangan “Predominance area” untuk roasting Fe dan Cu pada 700 °C. Garis solid = komponen Fe, Garis dash = komponen Cu, Garis dot = gas



Gambar 4.13 Contoh mineral kalkopirit hasil roasting selama 8 jam (Wan et al., 2020)

Perbedaan kalsinasi dan roasting

- Tujuan: Kalsinasi bertujuan utama untuk menghilangkan komponen volatil dari bijih atau bahan mentah logam, sementara roasting bertujuan untuk mengubah komponen bijih atau logam menjadi bentuk oksida atau sulfida yang lebih reaktif atau lebih mudah dipisahkan.
- Kondisi Oksidasi: Kalsinasi terjadi dalam kondisi tanpa oksigen yang cukup, sedangkan roasting terjadi dalam kondisi oksidasi terkontrol dengan kehadiran oksigen yang cukup.
- Suhu: Kalsinasi umumnya melibatkan suhu yang lebih rendah dibandingkan roasting.
- Hasil: Hasil kalsinasi adalah oksida logam atau bentuk yang lebih reaktif, sedangkan hasil roasting dapat berupa oksida, sulfida, atau gas sampingan.

4.2.3. *Smelting*

Proses smelting adalah tahap penting dalam pengolahan bijih logam yang mengubah bijih yang telah diolah menjadi logam murni. Proses ini melibatkan peleburan bijih yang telah dipersiapkan sebelumnya untuk memisahkan logam dari komponen lainnya seperti mineral, gangue (material berharga), dan impuritas. Berikut adalah penjelasan lebih rinci tentang proses smelting:

Tujuan Proses Smelting:

Tujuan utama dari proses smelting adalah untuk mengisolasi logam dari bijihnya dalam bentuk yang lebih murni. Proses ini mencapai tujuan ini melalui peleburan bijih dan pemisahan logam dari material sampingan seperti mineral dan impuritas.

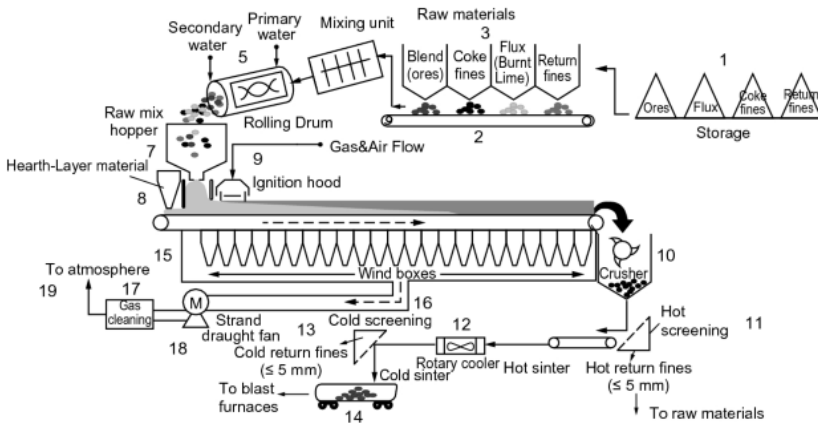
Tahap Persiapan:

Sebelum bijih dapat dilebur, beberapa tahap persiapan biasanya diperlukan

- **Crushing dan Grinding (Penghancuran dan Penggilingan):** Bijih dihancurkan menjadi potongan kecil dan dihaluskan menjadi serbuk.

Ini meningkatkan area permukaan bijih yang dapat bereaksi selama proses smelting.

- Agglomeration (Pengaglomerasian)/Sintering: Dalam beberapa kasus, bijih diaglomerasi menjadi potongan-potongan yang lebih besar atau pelet sebelum smelting. Proses yang digunakan untuk menyebabkan reduksi parsial dan aglomerasi konsentrat bijih yang relatif halus dikenal sebagai sintering. Dalam sintering, suhu tinggi digunakan untuk memperoleh fusi parsial partikel untuk membentuk sinter. Sintering merupakan bagian integral dari pembuatan besi modern. Sintering konsentrat bijih besi menghasilkan penggabungan partikel-partikel kecil menjadi aglomerat pra-reduksi yang lebih besar yang tidak akan keluar dari tungku. Pengeringan, kalsinasi, dan pemanggangan dilakukan secara bersamaan. Sintering konsentrat sulfida nonferrous dari timbal, tembaga, seng, dan logam lainnya memiliki fungsi ganda yaitu mengontrol ukuran partikel dan pemanggangan secara bersamaan.



Gambar 4.14 Proses sintering pada pembuatan logam Fe (Bizhanov & Chizhikova, 2020)

- Flotation (Flotasi): Untuk bijih sulfida, proses flotasi dapat digunakan untuk mengisolasi bijih berharga dari mineral pengotor.

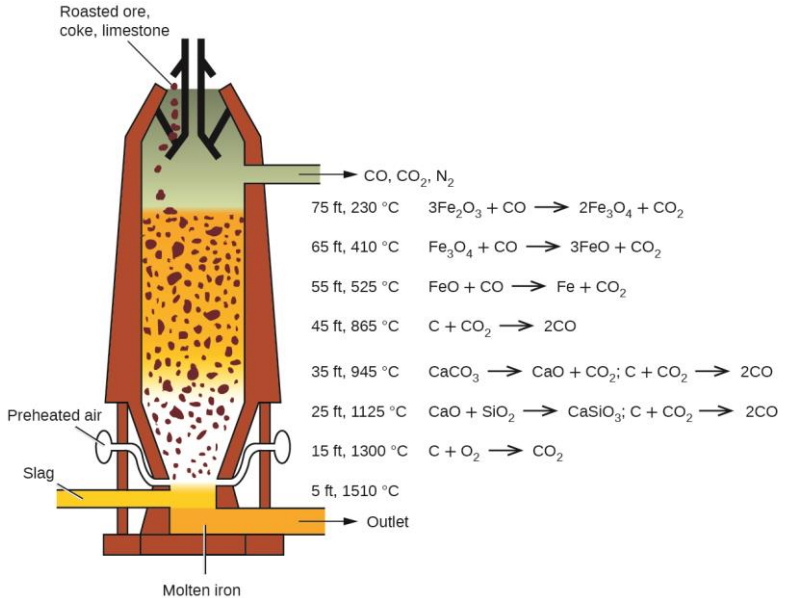
Proses Smelting:

Proses smelting sebagian besar melibatkan peleburan bijih dalam tungku pada suhu tinggi. Beberapa langkah umum dalam proses smelting adalah sebagai berikut:

- Pemanasan Awal: Bijih atau bahan yang telah dipersiapkan dipanaskan pada suhu tinggi, seringkali dengan bantuan bahan bakar seperti kokas atau batu bara. Pemanasan awal ini dapat mencapai suhu lebih dari seribu derajat Celsius.
- Reaksi Kimia: Pada suhu tinggi, terjadi serangkaian reaksi kimia kompleks. Ini mungkin termasuk oksidasi bijih menjadi oksida logam dan peleburan oksida logam menjadi logam cair.

Pemisahan:

- Skim dan Slag (Terak) Formation: Selama smelting, mineral pengotor atau gangue membentuk lapisan slag di atas logam cair. Slag ini terapung di atas logam dan dapat dengan mudah dipisahkan. Reaksi reduksi pada bijih logam tidak murni biasanya memerlukan pembentukan terak untuk membuang material gangue ke dalam umpan. Misalnya, Fe_2O_3 yang direduksi dengan karbon menghasilkan besi cair metalik tidak murni dan campuran CO/CO_2 yang dapat keluar dari tungku. Namun gangue yang menyertainya yang terdiri dari alumina, silika, magnesia, dan lain-lain harus diubah menjadi bentuk yang meleleh dan dapat dipisahkan. Cairan oksida cair ini adalah terak. Kadang-kadang, lebih baik menambahkan fluks, seperti kapur terkalsinasi, yang akan bereaksi dengan gangue untuk menghasilkan terak cair. Ciri-ciri lain yang diinginkan dari terak adalah titik leleh rendah, viskositas rendah, kecenderungan rendah untuk bereaksi dengan refraktori atau melarutkan logam, dan kepadatan rendah untuk memperoleh pemisahan yang baik. Karena terak tidak mempunyai kegunaan yang cukup besar, terak juga harus mempunyai nilai yang rendah. Jika gangue bersifat asam, diperlukan fluks basa, bukan gangue basa yang dapat dinetralkan dengan fluks asam.



Gambar 4.15 Pembentukan molten Fe dan slag di dalam blast furnace (Flowers et al., 2023)

- Penyaringan dan Pemurnian: Logam cair dapat disaring dan dimurnikan untuk menghilangkan impuritas yang tersisa.

Hasil Proses Smelting:

Hasil akhir dari proses smelting adalah logam murni yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi. Slag, yang terbentuk sebagai produk sampingan, adalah residu yang sering kali digunakan dalam konstruksi atau dapat memiliki nilai dalam pengolahan lainnya.

Contoh Aplikasi Proses Smelting:

- Smelting besi dalam proses pembuatan baja.
- Smelting tembaga untuk memproduksi tembaga murni.
- Smelting aluminium dari bauksit.
- Smelting perak dari bijih perak.

4.3. Proses Elektrometalurgi

Elektrometalurgi, atau pemrosesan elektrolitik, berkaitan dengan produksi logam dari ion melalui penerapan energi listrik. Berbeda dengan pemrosesan elektrokimia, dimana reaksi kimia menghasilkan listrik seperti pada baterai atau korosi, pemrosesan elektrolitik menggunakan listrik untuk menjalankan fungsi kimia seperti pada ekstraksi logam. Oleh karena itu, korosi juga dikenal sebagai “metalurgi ekstraktif secara terbalik”. Seperti yang telah dibahas sejauh ini, ekstraksi biasanya berarti reduksi suatu senyawa, sedangkan korosi berarti oksidasi suatu logam menjadi suatu senyawa. Istilah elektrowinning digunakan untuk menggambarkan perolehan logam dari larutan atau elektrolit pada elektroda negatif, atau katoda, sedangkan elektroda positif, atau anoda, bersifat inert terhadap reaksi yang sedang berlangsung. Elektro refining memerlukan proses pemurnian di mana anoda terbuat dari logam padat tidak murni yang secara aktif larut dalam elektrolit; pengendapan logam murni terjadi pada katoda. Larutan ini dapat dihasilkan selama pelindian dan/atau pemurnian, seperti yang dibahas dalam hidrometalurgi.

Fused salt electrolysis adalah produksi logam yang tidak dapat dielektrolisis dari larutan berair karena posisi relatifnya dalam rangkaian gerak listrik dan, oleh karena itu, direduksi dari garam cair. Dengan kata lain, produksi hidrogen dari oksidanya (air), dari segi energi, lebih menguntungkan daripada produksi logam dari senyawanya. Konsep electrowinning dan electrorefining juga dapat diterapkan pada elektrolisis garam cair. Jika senyawa logam memiliki titik leleh yang tinggi dan sulit untuk meleleh, senyawa tersebut dapat dilarutkan dalam elektrolit pembawa inert (garam cair) yang lebih stabil daripada senyawa logam yang diinginkan. Proses Hall-Héroult untuk produksi aluminium pada dasarnya mengikuti skema ini di mana alumina dilarutkan dalam kriolit cair (natrium-aluminium fluorida).

4.3.1. Konsep Dasar

Persamaan Nernst adalah persamaan penting dalam elektrokimia yang digunakan untuk menghubungkan potensial sel elektrokimia dengan konsentrasi ion-ion dalam larutan elektrolit. Persamaan ini dinamai dari

fisikawan Jerman, Walther Nernst, yang mengembangkannya pada awal abad ke-20. Persamaan Nernst dasar yang umumnya digunakan adalah sebagai berikut:

$$\Delta G^0 = -E^0 nF$$

$$\Delta G = -EnF$$

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \left(\frac{a_D^d a_E^e}{a_A^a a_B^b} \right) = \Delta G^0 + RT \ln(k)$$

$$E = E^0 - \frac{RT \ln(k)}{nF}$$

Dalam persamaan ini:

ΔG = perubahan energi bebas Gibbs (J/mol)

ΔG^0 = perubahan energi bebas Gibbs pada keadaan standar (J/mol)

R = Konstanta gas

T = suhu absolut (K)

k = konstanta kesetimbangan atau rasio aktivitas

E = Potensial sel

E^0 = Potensial sel standar (pada aktivitas = 1)

N = jumlah elektron yang terlibat

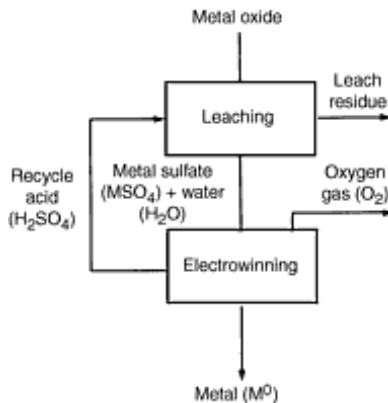
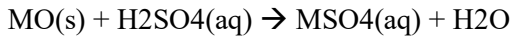
F = konstanta faraday

Persamaan Nernst ini memberikan hubungan antara potensial sel elektrokimia (E) dengan konsentrasi ion-ion dalam larutan elektrolit (Q) saat kondisi non-standar. Persamaan Nernst adalah alat yang sangat berguna dalam menganalisis dan memprediksi perilaku sel elektrokimia di luar kondisi standar, di mana konsentrasi ion-ion dapat berubah dari nilai standar.

Ini juga penting dalam pemahaman potensial elektrokimia dan peran elektrokimia dalam berbagai reaksi kimia, serta digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti dalam elektrokimia industri, pemantauan pH, elektroanalisis, dan pemahaman dasar tentang sel galvanik dan sel elektrolisis.

4.3.2. *Elektrowinning*

Pengaturan electrowinning biasanya dilakukan dengan mendaur ulang asam antara operasi leaching dan operasi electrowinning untuk efisiensi ekonomi. Diagram yang disederhanakan dari proses leaching/electrowinning disajikan pada Gambar 4.16. Sebagai contoh, pada langkah leaching, asam sulfat dikonsumsi saat logam larut, sesuai dengan reaksi dalam persamaan:



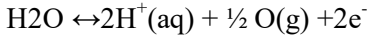
Gambar 4.16 Diagram alir proses leaching-elektrowinning

Larutan leaching, $\text{H}_2\text{O} + \text{MSO}_4(\text{aq})$, ditransfer ke langkah electrowinning untuk pengendapan logam. Larutan leaching dimasukkan ke dalam sel yang terdiri dari anoda inert (biasanya terbuat dari timbal) dan katoda (yang dapat terbuat dari baja tahan karat, aluminium, atau lembaran starter logam M), yang disusun sebagai pelat paralel katoda dan anoda yang bergantian.

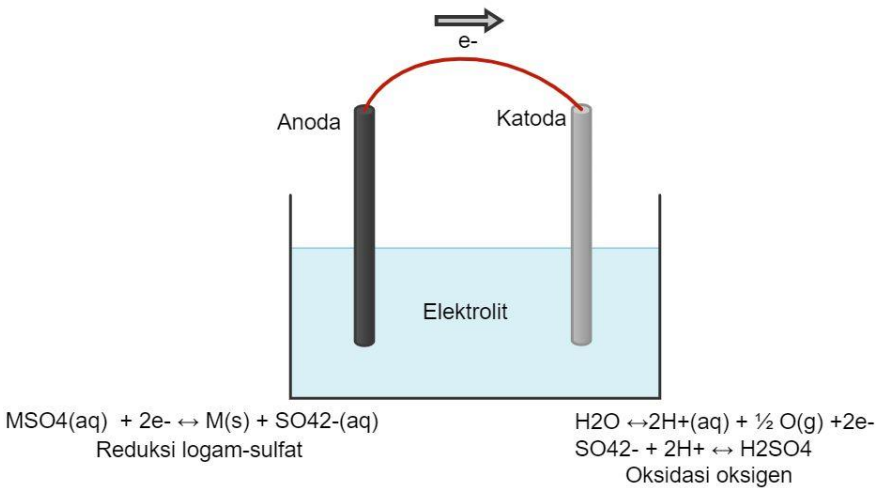
Pada tahap electrowinning, power supply mengalirkan elektron ke katoda, dan logam sulfat direduksi untuk menghasilkan logam murni:

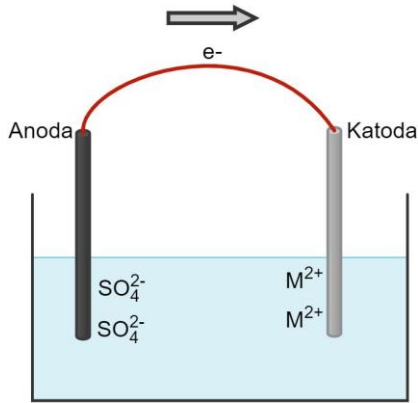


Pada anoda, oksigen dihasilkan oleh penguraian air dan regenerasi asam dilakukan melalui reaksi dan didaur ulang kembali ke langkah pelindian :



Dalam hal ini, potensial yang diperlukan antara katoda dan anoda dalam electrowinning adalah sekitar 1,25 hingga 1,75 V. Potensial ini adalah kombinasi dari potensial penguraian yang didefinisikan sebelumnya (potensial yang dapat dibalik antara katoda dan anoda).

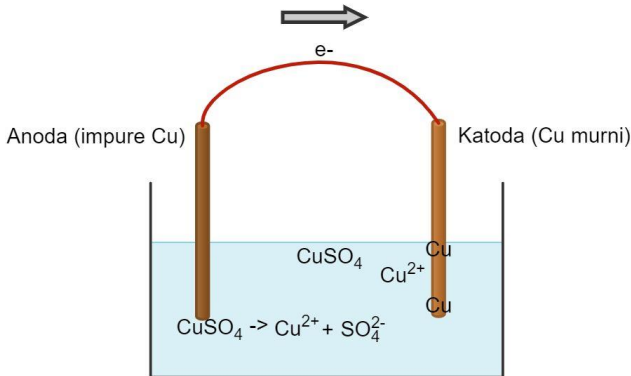




Gambar 4.17 Skema proses elektrowinning logam

Contoh:

Proses elektrowinning adalah metode yang umum digunakan dalam industri untuk memurnikan tembaga dari larutan tembaga sulfat (CuSO_4). Dalam proses ini, anoda terbuat dari logam tembaga atau bahan yang kaya akan tembaga dan katoda terbuat dari lembaran tembaga murni. Larutan tembaga sulfat digunakan sebagai elektrolit. Saat arus listrik DC diterapkan, ion tembaga (Cu^{2+}) dari larutan teroksidasi pada anoda, melepaskan elektron. Elektron-elektron ini mengalir melalui sirkuit ke katoda, di mana ion tembaga (Cu^{2+}) menerima elektron dan direduksi menjadi tembaga padat. Tembaga yang terbentuk pada katoda diangkat secara berkala sebagai logam murni. Proses ini dapat terjadi jika tegangan yang diberikan sebesar 0.159 Volt.



Gambar 4.18 Elektrowinning Cu dari CuSO₄

4.3.3. *Elektro Refining*

Elektrorefining adalah proses pemurnian logam yang menggunakan metode elektrolisis untuk menghilangkan kontaminan atau unsur-unsur tidak diinginkan dari logam dasar. Proses ini sering digunakan dalam industri untuk memperoleh logam yang memiliki kemurnian tinggi, yang sangat penting dalam berbagai aplikasi teknis dan industri, terutama dalam produksi logam-logam seperti tembaga, perak, emas, dan logam-logam lainnya.

Proses elektrorefining biasanya melibatkan beberapa langkah utama:

- **Pelat Elektroda:** Proses dimulai dengan persiapan elektroda positif (anoda) dan elektroda negatif (katoda). Anoda biasanya terbuat dari logam yang akan diolah, sedangkan katoda adalah logam murni atau bahan yang akan menerima logam yang akan dimurnikan.
- **Elektrolit:** Logam dasar yang akan dimurnikan ditempatkan dalam larutan elektrolit yang mengandung ion-ion dari logam tersebut.
- **Elektrolisis:** Ketika arus listrik diterapkan melalui sistem, ion-ion dari logam dasar bergerak dari anoda ke katoda. Ion-ion ini bereaksi dengan elektroda dan terlarut dalam larutan elektrolit. Selama proses ini, logam murni terendap pada katoda, sedangkan kontaminan dan unsur-unsur lain tetap di anoda atau tetap dalam larutan elektrolit.

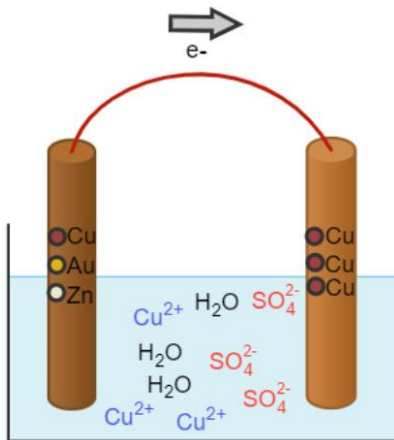
- Pemisahan: Setelah proses elektrowinning selesai, logam murni yang terendap pada katoda dapat diambil, sementara anoda yang telah berkurang beratnya karena kehilangan logamnya dapat diganti atau dimurnikan kembali.

Proses elektrowinning sangat bergantung pada sifat kimia dan fisik logam yang sedang dimurnikan. Oleh karena itu, setiap jenis logam memerlukan parameter khusus, seperti kecepatan arus listrik, suhu, jenis elektrolit, dan elektrode yang digunakan. Proses ini merupakan metode yang efektif untuk memperoleh logam murni dengan kemurnian yang sangat tinggi dan memiliki banyak aplikasi dalam industri logam dan pengolahan material.

Elektrowinning dan elektro winning adalah dua proses yang digunakan dalam pemurnian dan pengolahan logam, dan keduanya melibatkan penggunaan elektrolisis. Meskipun mereka memiliki kesamaan dalam penggunaan listrik untuk memanipulasi ion-ion logam, terdapat perbedaan signifikan antara keduanya dalam tujuan, prosedur, dan hasil akhir. Di bawah ini, saya akan menjelaskan perbedaan detail antara elektrowinning dan elektro winning:

- Tujuan:
 - Elektrowinning: Tujuan utama elektrowinning adalah untuk meningkatkan kemurnian logam yang sudah ada. Ini digunakan ketika Anda memiliki logam dasar yang memiliki kandungan kontaminan atau unsur-unsur yang tidak diinginkan dan Anda ingin menghilangkan kontaminan tersebut untuk menghasilkan logam murni. Contoh penggunaan elektrowinning adalah pemurnian tembaga, perak, emas, dan logam-logam lainnya.
 - Elektro winning: Proses elektro winning digunakan untuk mendapatkan logam dari bijih yang mengandung logam tersebut. Tujuannya adalah untuk mengisolasi logam murni dari bijih atau bahan sumber yang mengandungnya. Ini sering digunakan dalam pertambangan untuk mendapatkan logam seperti aluminium, besi, nikel, dan sebagainya dari bijih mereka.

- Teori Dasar:
 - Elektrorefining: Dalam elektrorefining, anoda biasanya terbuat dari logam yang akan dimurnikan. Proses ini bekerja dengan menghilangkan kontaminan dari logam dasar yang ada di anoda.
 - Elektro winning: Proses elektro winning menggunakan bijih atau bahan sumber yang mengandung logam yang ingin diekstraksi. Anoda dalam elektro winning biasanya terdiri dari bahan yang mengandung logam tersebut, bukan logam murni.
- Contoh Aplikasi:
 - Elektrorefining: Elektrorefining sering digunakan dalam industri pemrosesan logam untuk memurnikan logam yang sudah ada. Contoh termasuk pemurnian tembaga dalam produksi kawat tembaga yang berkualitas tinggi, pemurnian emas dan perak dalam perhiasan, dan pemurnian logam-logam lainnya untuk berbagai aplikasi industri.
 - Elektro winning: Proses elektro winning digunakan dalam pertambangan dan pengolahan bijih untuk mendapatkan logam dari bijih. Sebagai contoh, aluminium diekstraksi dari bauksit melalui elektro winning, sedangkan besi diekstraksi dari bijih besi dalam proses elektro winning.



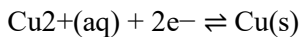
Gambar 4.19 Contoh proses electrorefining logam Cu dari anoda Cu, Au, dan Zn

Half-Reaction	E°/SHE (V)
$Zn^{2+}(aq) + 2e^{-} \rightleftharpoons Zn(s)$	-0.7618
$Cu^{2+}(aq) + e^{-} \rightleftharpoons Cu^{+}(aq)$	0.159
$Cu^{2+}(aq) + 2e^{-} \rightleftharpoons Cu(s)$	0.3419
$Au^{3+} + 3e^{-} \rightleftharpoons Au(s)$	1.52

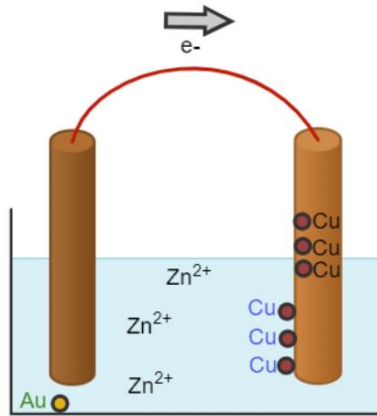
Terlihat pada Gambar 4.19 terdapat anoda yang terdiri dari Cu, Zn, dan Au dan katoda pure Cu. Larutan elektrolit yang digunakan adalah $CuSO_4$. Reaksi yang terjadi pada anoda adalah reaksi oksidasi yang mengikuti table half reaction. Semakin kecil SHE maka akan semakin mudah teroksidasi, maka reaksi pada anoda adalah:

1. $Zn(s) \rightleftharpoons Zn^{2+}(aq) + 2e^{-}$
2. $Cu(s) \rightleftharpoons Cu^{2+}(aq) + 2e^{-}$

Sedangkan Au tidak akan teroksidasi dikarenakan proses disetting pada 0.35 volt. Tidak hanya itu, air dan sulfat juga tidak akan ikut teroksidasi pada 0.35 volt dikarenakan potensial oksidasinya sebesar 0.82 dan 2.01 volt berurutan. Sehingga sekarang hanya tersisa Cu^{2+} dan Zn^{2+} yang berperan pada proses selanjutnya (reduksi pada katoda). $Au(s)$ akan luruh ke dasar tangka elektrolisis dikarenakan tidak ada penyokong Cu dan Zn pada anoda, luruhan ini biasa disebut dengan “slime anoda”. Beralih ke katoda, reaksi yang terjadi adalah reaksi reduksi kation yang ada di larutan elektrolit dengan electron, reaksi nya sebagai berikut:



Sehingga didapatkan logam Cu kadar tinggi yang menempel pada katoda.



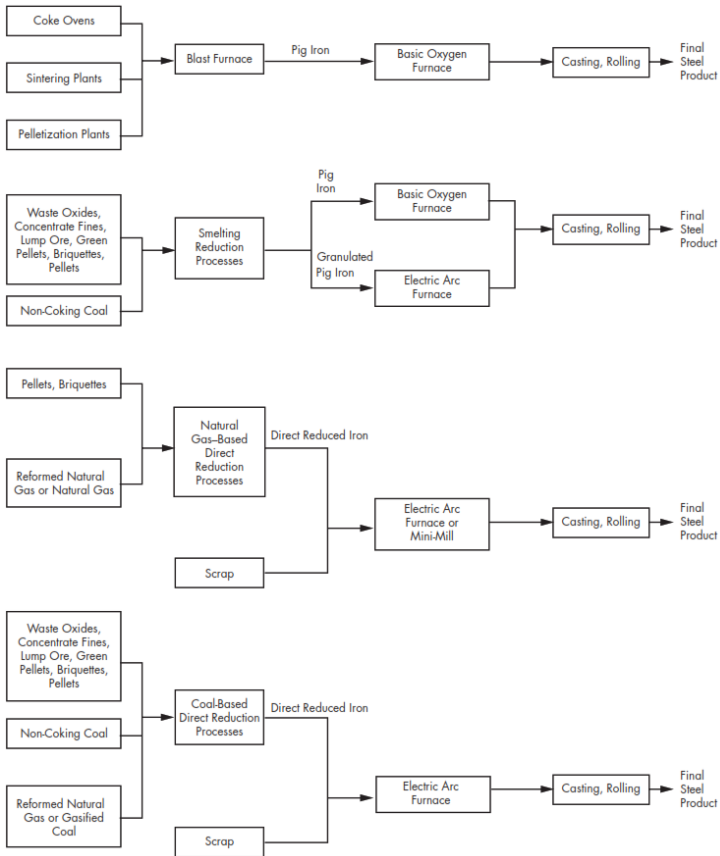
Gambar 4.20 Cu setelah proses elektrorefining

Bab 5

Pengolahan Beberapa Mineral menjadi Logam

5.1. Laterite/Hematite menjadi Besi

Konsentrat bijih besi oksida direduksi, dilebur, dan dimurnikan untuk menghasilkan baja melalui rute pemrosesan yang ditunjukkan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Rute pengolahan mineral besi oksida menjadi logam Fe/baja (Dunne et al., 2019)

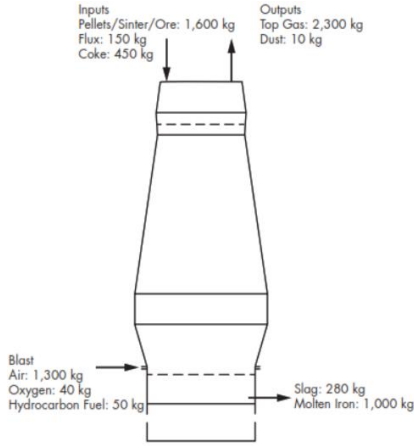
Scrap dapat menjadi satu-satunya umpan untuk EAF, atau dapat digunakan bersama dengan besi tereduksi langsung (DRI) dalam EAF. Scrap juga merupakan umpan tambahan dalam BOF. Proses BF dan BOF dianggap sebagai rute tradisional. DR, DS, dan peleburan scrap dan EAF dianggap sebagai rute alternatif. Produksi baja EAF lebih banyak digunakan di Amerika Serikat, tetapi dalam skala dunia, BOF lebih banyak digunakan untuk produksi baja. Di seluruh dunia, sekitar 65% besi dan baja diproduksi menggunakan rute tradisional, dan sekitar 35% diproduksi menggunakan rute alternatif.

Blast Furnace (BF)

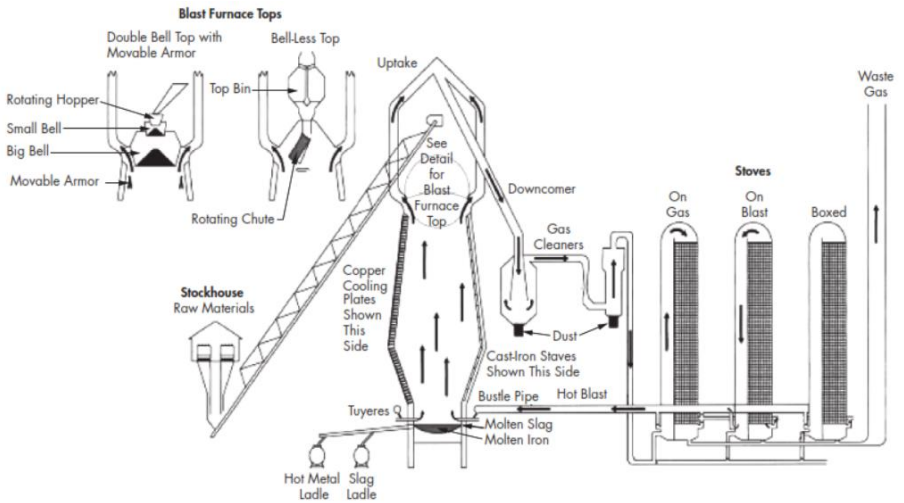
BF adalah tungku poros berlawanan arah, yang menggunakan karbon, terutama dalam bentuk kokas untuk reduksi dan peleburan oksida besi untuk menghasilkan logam panas (pig iron) dan terak. Logam panas biasanya mengandung 4%-5% karbon dan 0,3%-1% silikon, dan cocok untuk pemurnian selanjutnya menjadi baja. Bahan baku untuk BF meliputi bahan baku berikut ini:

- Bahan baku padat-oksida besi, fluks, dan kokas
- Bahan baku gas-ledakan udara panas, oksigen, dan hidrokarbon

Operasi BF terdiri dari pengisian bahan baku padat secara terus-menerus dari bagian atas tungku, tapping logam panas dan terak yang dihasilkan dari bagian bawah secara berkala, injeksi terus menerus dari semburan panas dengan injektor hidrokarbon dan pengayaan oksigen melalui tuyere, dan pembuangan gas dan debu bagian atas secara terus menerus. Neraca massa dari blast furnace dan plat layout disajikan pada Gambar 5.2 dan 5.3.



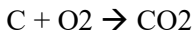
Gambar 5.2 Neraca massa blast furnace (Dunne et al., 2019)



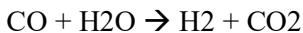
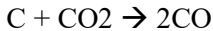
Gambar 5.3 Plant layout blast furnace (Dunne et al., 2019)

Peristiwa kimia utama yang terjadi di dalam tungku meliputi langkah-langkah berikut:

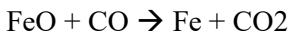
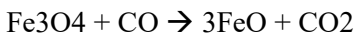
1. Pembakaran karbon oleh udara panas pada tuyer untuk menghasilkan panas dan CO₂



2. Reaksi endotermis dari karbon dan karbon dioksida untuk memproduksi gas pereduksi



3. Reduksi besi oksida menjadi logam Fe



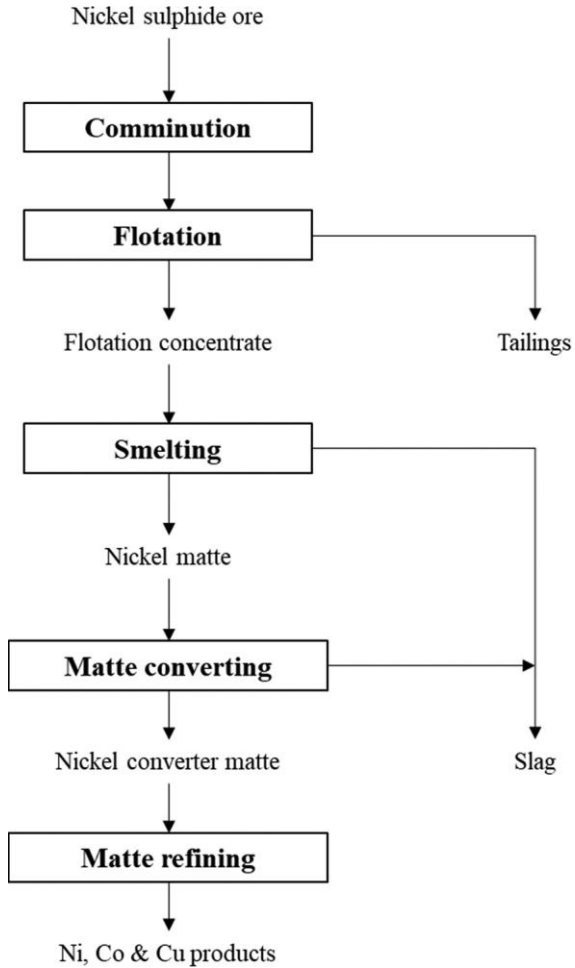
4. Pembentukan dan peleburan slag
5. Pemisahan logam cair dari slag

5.2. Nikel Sulfida menjadi Logam Ni

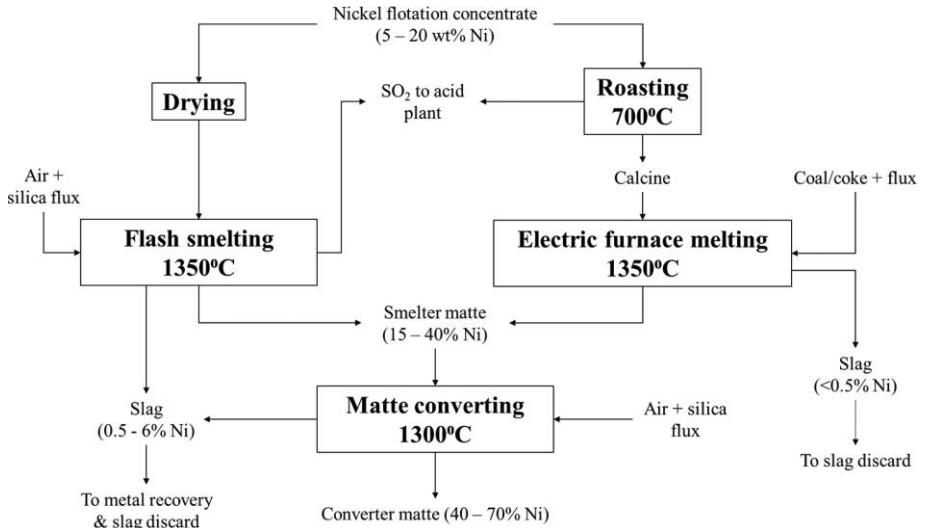
Kandungan logam yang rendah pada bijih sulfida yang ada saat ini membuat bijih tersebut tidak cocok untuk peleburan langsung maupun proses hidrometalurgi langsung. Karena mineral sulfida biasanya muncul sebagai butiran yang berbeda dalam matriks batuan, bijih-bijih ini dapat dilakukan peningkatan secara mekanis di mana sebagian besar kandungan batuan dapat dihilangkan. Oleh karena itu, pemanfaatan bijih nikel sulfida umumnya dilakukan dengan cara penggilingan dan flotasi; namun demikian, terdapat banyak flowsheet yang berbeda, karena mineralogi (dan asosiasi mineral), tekstur, ukuran butiran, dan kekerasan sangat bervariasi dari satu endapan ke endapan lainnya. Pada prinsipnya, adalah mungkin untuk memproduksi konsentrat nikel (pentlandit), tembaga (kalkopirit), dan besi (pirhotit) yang terpisah. Namun demikian, pemisahan pentlandit dari

pirhotit secara bersih dari pirhotit sulit dilakukan karena pirhotit biasanya mengandung inklusi pentlandit yang tumbuh bersamaan dengan nikel dalam larutan padat di dalam pirhotit. Faktanya, pirhotit sering kali mengandung 0,5-1% Ni yang tidak dapat dipisahkan dengan metode fisik. Kandungan nikel yang relatif tinggi dalam pirhotit menyulitkan untuk mencapai hasil nikel yang tinggi dari bijih kecuali jika pirhotit diproses untuk mendapatkan kembali kandungan nikelnya; sebaliknya, keberadaan nikel menyulitkan untuk mendapatkan produk besi yang dapat dipasarkan dari pirhotit.

Pyrrhotite dapat dipisahkan dari pentlandit dan kalkopirit dengan menggunakan sifat feromagnetiknya atau dengan flotasi. Tidak semua pirhotit bersifat feromagnetik, meskipun pada bijih dari daerah Sudbury, Ontario, bentuk monoklinik magnetik mendominasi bentuk heksagonal paramagnetik atau "nonmagnetik" (Toguri 1975). Secara umum, pirhotit yang mengandung lebih sedikit sulfur daripada $\text{Fe}_{0,87}\text{S}$ bersifat nonmagnetik. Material ini biasanya dapat dipisahkan dari pentlandit dengan flotasi.



Gambar 5.4 Pengolahan Ni sulfida secara umum (Faris et al., 2023)



Gambar 5.5 Pengolahan Ni concentrate menjadi matte Ni (Faris et al., 2023)

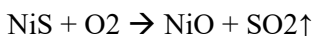
- Flotasi

Flotasi melibatkan penambahan reagen kimia ke dalam campuran bijih nikel dan air. Reagen ini mengubah sifat permukaan mineral, memungkinkan konsentrat nikel mengapung dan dipisahkan dari mineral-mineral lainnya.

- Roasting

Pada tahap ini, sulfida nikel teroksidasi menjadi oksida nikel dan gas belerang dioksida.

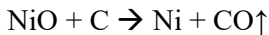
Contoh reaksi:



- Reduksi Smelting/melting

Reduksi dilakukan untuk mengembalikan nikel dari bentuk oksida ke bentuk logam nikel. Ini bisa terjadi melalui proses reduksi menggunakan karbon sebagai agen reduksi.

Contoh reaksi:

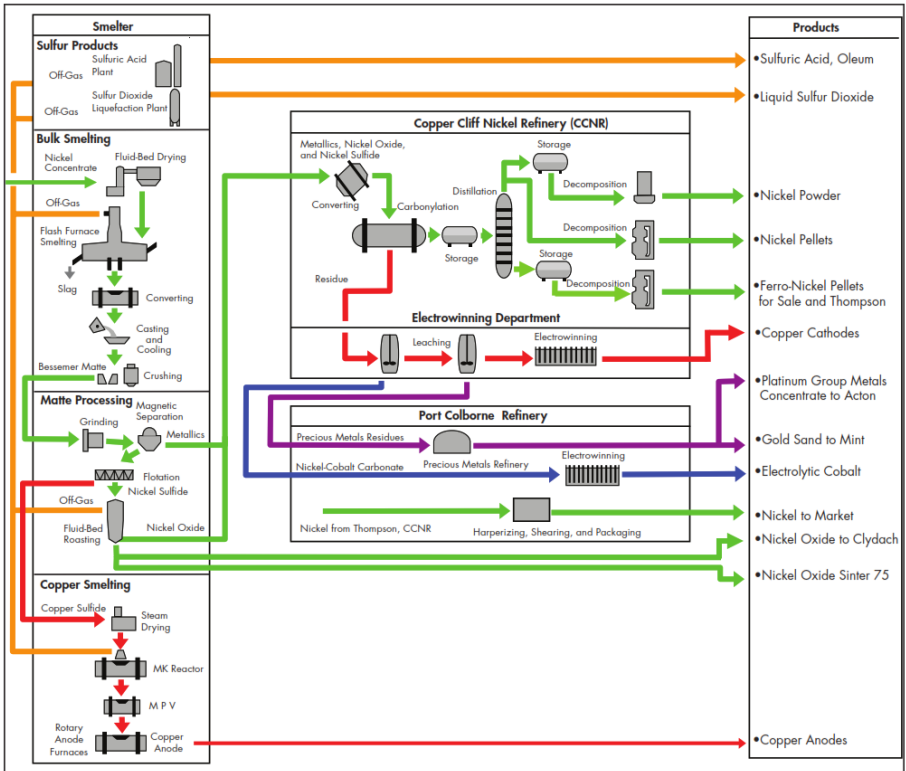


- Elektrorefining

Setelah nikel dalam bentuk logam dihasilkan, proses selanjutnya adalah tahap elektrolisis. Ini biasanya melibatkan proses pemurnian lebih lanjut untuk menghasilkan nikel berkualitas tinggi. Proses ini menggunakan elektrolit dan elektroda untuk memisahkan nikel dari kotoran-kotoran lainnya.

- Casting

Setelah tahap pemurnian, nikel dapat dicetak menjadi berbagai bentuk yang diinginkan, mulai dari logam cair hingga bahan padat yang siap digunakan dalam berbagai aplikasi.

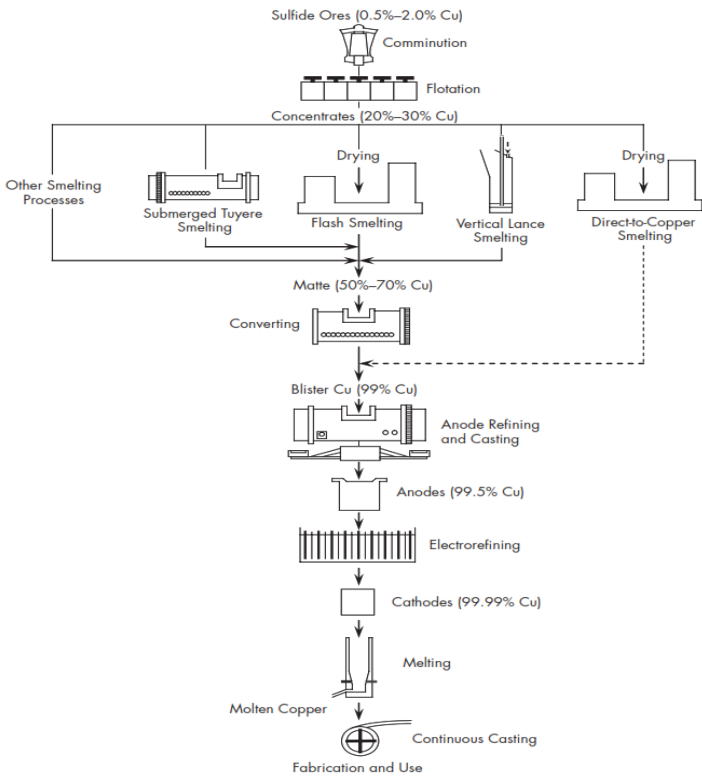


Gambar 5.6 Flowsheet pengolahan Ni sulfida untuk menjadi berbagai produk (Dunne et al., 2019)

5.3. Kalkopirit menjadi Cu (Pirometalurgi)

Terdapat beberapa input pada proses peleburan dan pemurnian tembaga. Yang paling penting adalah konsentrat tembaga yang dihasilkan oleh proses pemurnian. Input lainnya termasuk udara yang diperkaya oksigen, bahan bakar berkarbon, fluks, slag dan revert, serta skrap tembaga. Konsentrat tembaga terutama terdiri dari mineral tembaga dan besi sulfida, serta mineral gangue dari bijih asli. Kadarnya (% berat tembaga) berkisar antara 22 dan 35, tergantung pada strategi dan praktik pengolahan mineral. Selain tembaga, konsentrat mengandung berbagai tingkat pengotor, biasanya dalam bentuk larutan padat dalam mineral sulfida; ini termasuk

pengotor yang berharga seperti emas, perak, selenium, dan telurium, serta pengotor yang tidak diinginkan, khususnya antimon, arsenik, dan bismut. Konsentrat juga mengandung 8%-10% kelembapan, sebagian untuk mengurangi risiko kebakaran. Persentase pengotor ini sangat bervariasi dari satu bijih ke bijih lainnya, dan juga dari satu konsentrat ke konsentrat lainnya. Sebagian besar pabrik peleburan mencampurkan konsentrat yang diperoleh dari berbagai tambang; beberapa pabrik peleburan khusus membeli seluruh konsentratnya dari operasi penambangan dan penggilingan independen. Gambar 5.7 menunjukkan pengolahan kalkopirit menjadi logam Cu menggunakan proses pirometalurgi.



Gambar 5.7 Pengolahan kalkopirit menjadi logam Cu melalui rute pirometalurgi (Dunne et al., 2019).

Kalkopirit adalah mineral sulfida yang mengandung tembaga (CuFeS_2) dan merupakan salah satu sumber utama logam tembaga di seluruh dunia. Mineral ini memiliki struktur kristal yang kompleks dan sifat-sifat kimia yang penting dalam industri pertambangan dan pengolahan logam.

- **Komposisi Kimia:** Kalkopirit terdiri dari unsur-unsur utama seperti tembaga (Cu), besi (Fe), dan belerang (S). Komposisi kimiawi yang khas dari kalkopirit adalah apa yang membuatnya menjadi sumber utama tembaga.
- **Struktur Kristal:** Kalkopirit memiliki struktur kristal dengan atom-atom tembaga dan besi yang terikat dengan atom belerang. Struktur kristalnya memperlihatkan hubungan antara atom-atom tersebut dalam tatanan kristal yang teratur.
- **Penampilan Fisik:** Secara fisik, kalkopirit dapat ditemukan dalam bentuk kristal kecil berwarna kuning keemasan hingga kekuningan kecoklatan. Kristalnya bisa berbentuk tetrahedron (bentuk segiempat sama sisi) atau ditemukan dalam bentuk butiran kecil hingga besar dalam matriks batuan.
- **Sifat-Sifat Khusus:** Kalkopirit memiliki sifat konduktivitas listrik yang cukup baik, yang membuatnya memiliki nilai penting dalam aplikasi teknologi listrik dan elektronik. Selain itu, kalkopirit juga memiliki sifat yang memungkinkannya bereaksi dengan zat-zat kimia tertentu, memungkinkan proses pemisahan tembaga dari mineral-mineral lainnya dalam proses penambangan dan pengolahan.

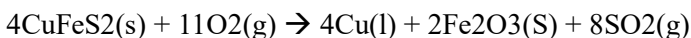


Gambar 5.8 Mineral kalkopirit

Proses pengolahan kalkopirit menjadi Cu dijelaskan sebagai berikut:

- Komunisi: ini merupakan proses mekanis untuk memecah material kalkopirit menjadi ukuran yang lebih kecil tanpa perubahan komposisi kimia.
- Flotasi: Reaksi kimia yang terjadi dalam proses flotasi diinduksi oleh penggunaan bahan kimia tertentu. Misalnya, penambahan zat kimia pengapung seperti xanthate yang berinteraksi dengan permukaan butiran kalkopirit, membentuk lapisan yang mendorong kalkopirit menempel pada gelembung udara. Ini memungkinkan pemisahan kalkopirit dari mineral-mineral lain dalam larutan.
- Smelting: Proses smelting memanfaatkan reaksi reduksi, di mana kalkopirit dipanaskan dalam tungku peleburan pada suhu tinggi. Reaksi kimia utama terjadi antara kalkopirit dan oksigen di udara.

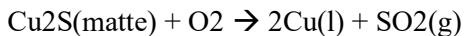
Contoh reaksi:



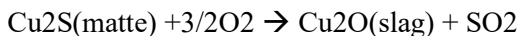
- Konversi: Reaksi konversi biasanya melibatkan penambahan bahan kimia tertentu untuk mengubah oksida atau senyawa lain yang

terkandung dalam logam tembaga menjadi senyawa yang mudah dihilangkan dalam proses selanjutnya, seperti proses pengurangan belerang. Matte cair yang dihasilkan dari peleburan tembaga dan pengendapan matte sebagian besar terdiri dari CuS dan FeS, serta sejumlah kecil unsur pengotor. Tembaga metalik dapat diproduksi dengan mereaksikan matte dengan oksigen, sebuah proses yang dikenal sebagai konversi:

Contoh reaksi:

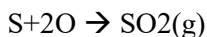


FeS di dalam matte teroksidasi menjadi FeO, yang larut di dalam slag. Sebagian Cu juga teroksidasi menjadi CuO untuk membentuk larutan Cu₂O pada slag:



Hal ini memproduksi slag dengan Cu terlarut yang tinggi, sekitar 4-8%. Bagaimanapun, dikarenakan besi dalam konsentrasi teroksidasi selama smelting, jumlah slag yang diproduksi pada proses konversi relative sedikit, begitu pula dengan Cu loss.

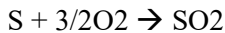
- Refining: Proses refining dapat melibatkan berbagai reaksi kimia, bergantung pada metode pemurnian yang digunakan. Misalnya, pada tahap ini, penggunaan elektrolisis dalam elektrorefining akan memicu reaksi kimia di mana ion-ion logam tembaga dipindahkan melalui larutan elektrolit dengan elektroda positif menarik ion-ion ini untuk meningkatkan kemurnian logam. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, tembaga tidak murni yang dihasilkan dari peleburan dan konversi mengandung 0,01-0,05% sulfur terlarut dan 0,1-0,8% oksigen terlarut. Jika tembaga ini dilebur secara langsung, sulfur dan oksigen terlarut akan bereaksi saat logam mendingin:



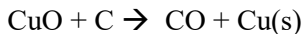
Gelembung SO₂ yang terbentuk dari reaksi ini meninggalkan gelembung-gelembung kecil yang disebut blister saat naik ke

permukaan tembaga yang mengeras, oleh karena itu dinamakan tembaga blister. Tembaga blister juga mengandung banyak pengotor tambahan yang dapat merusak standar kualitas produk. Akibatnya, tembaga harus dimurnikan sebelum dapat dijual. Untuk tembaga yang diproduksi melalui peleburan dan konversi, terdapat dua langkah pemurnian: fire refining dan electrorefining. Tujuan utama fire refining adalah untuk menghilangkan sulfur dan oksigen yang terlarut; sedangkan elektrorefining terutama untuk menghilangkan/memulihkan pengotor lainnya.

Oksidasi sulfur



Reduksi oksida tembaga



Dalam tahap ini, jika terdapat oksida tembaga yang mungkin terbentuk atau terdapat dalam logam tembaga hasil smelting, logam tembaga tersebut akan direduksi kembali ke bentuk logam yang lebih murni menggunakan reduktan yang ditambahkan, seperti gas hidrogen atau karbon. Reaksi ini membantu mengurangi oksida logam tembaga yang masih terkandung dalam logam hasil smelting.

- Elektrorefining: Ini melibatkan reaksi elektrokimia di mana logam tembaga diperoleh dari larutan elektrolit dengan bantuan arus listrik. Proses ini memungkinkan logam tembaga yang lebih murni diperoleh di katoda.
- Melting: Proses peleburan kembali adalah proses fisik di mana logam tembaga dilelehkan tanpa terjadinya reaksi kimia tambahan.
- Casting: Tahap ini melibatkan proses pendinginan logam cair tanpa reaksi kimia tambahan untuk membentuk logam tembaga dalam bentuk yang diinginkan seperti billet atau bentuk lainnya.

5.4. Bastnasite, monasit dan senotim menjadi Logam Tanah Jarang

International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) mendefinisikan lantanoid sebagai 15 elemen dengan nomor atom 57-71 secara inklusif: lantanum (La), serium (Ce), praseodimium (Pr), neodimium (Nd), prometium (Pm), samarium (Sm), europium (Eu), gadolinium (Gd), terbium (Tb), disprosium (Dy), holmium (Ho), erbium (Er), talium (Tm), ytterbium (Yb), dan lutetium (Lu). Unsur tanah jarang (REE) didefinisikan sebagai lantanoid ditambah yttrium (Y) dan skandium (Sc). Pm adalah elemen yang tidak stabil dan tidak ditemukan di alam, sehingga secara praktis ada 16 REE. Singkatan Ln terkadang digunakan untuk menandakan lantanoid atau seluruh kelompok REE. Didymium, kadang-kadang disingkat Dd atau NdPr, adalah campuran Pr dan Nd yang tidak terpisah, dan karena itu harganya lebih murah, biasanya dengan rasio Pr: Nd alami sekitar 1: 3,4 dan sering digunakan dalam magnet NdFeB. Industri REE menggunakan singkatan lain sebagai berikut:

LREE = light REE

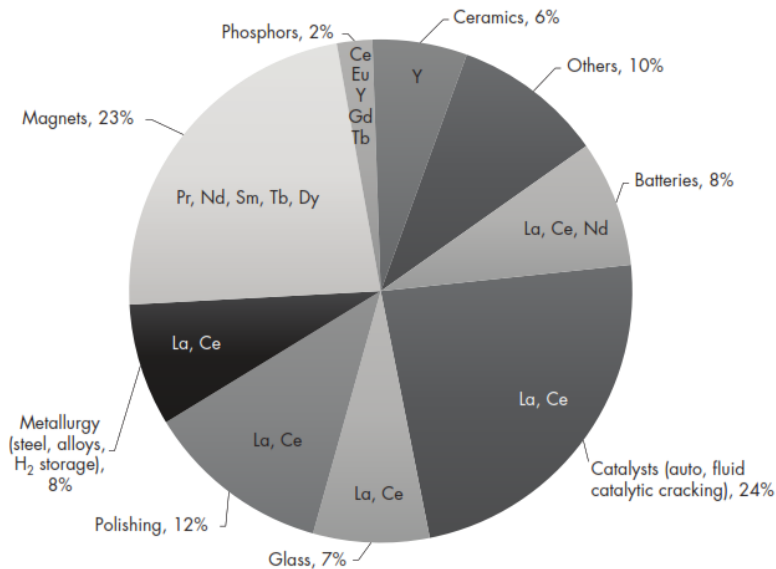
MREE = medium REE

HREE = heavy REE

TREE = total REE

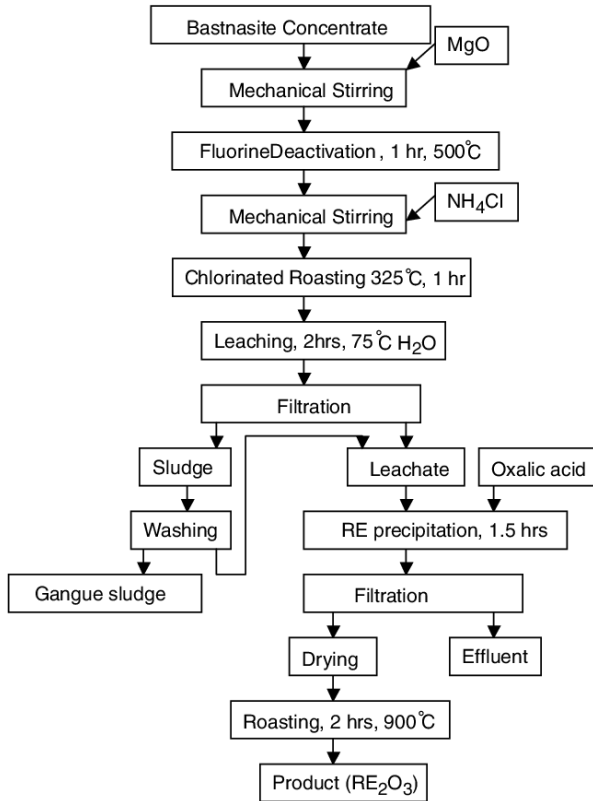
CREE = critical REE

SEG = Sm, Eu, dan Gd



Gambar 5.9 Kegunaan masing-masing REE pada industri (Dunne et al., 2019).

Gambar 5.10 menunjukkan flowsheet pengolahan logam tanah jarang dari berbagai sumber, pada umumnya logam tanah jarang diolah melalui rute hidrometalurgi dikarenakan keberadaannya yang sedikit di alam.



Gambar 5.10 Flowsheet pengolahan logam tanah jarang dari bastnaesite (Chi et al., 2004).

Bastnasite ($CeFCO_3$) memiliki cadangan terbukti terbesar di antara semua mineral tanah jarang di dunia. Sekitar 70% produk tanah jarang berasal dari produksi bastnasite. Metode konvensional untuk mengekstraksi tanah jarang dari konsentrat bastnasit menggunakan roasting asam sulfat dan perlakuan natrium hidroksida. Di Cina, proses ekstraksi melibatkan langkah-langkah berikut. Pertama, bastnasit dipekatkan dari bijih dengan menggunakan pengapungan hingga mencapai kadar sekitar 66% tanah jarang. Konsentrat bastnasit kemudian diuraikan menggunakan roasting asam sulfat, diikuti dengan mengekstraksi unsur tanah jarang dengan

leaching menggunakan asam klorida. Produk tanah jarang kemudian direcovery dari leachate yang diperoleh dari klorida tanah jarang dengan pengendapan menggunakan asam oksalat. Namun, kelemahan utama dari proses ini adalah masalah lingkungan yang serius.

Namun, dengan adanya magnesium oksida, reaksi bastnasit dengan magnesium oksida dapat meminimalkan atau menghindari pembentukan fluorida tanah jarang, seperti yang ditunjukkan di bawah ini:

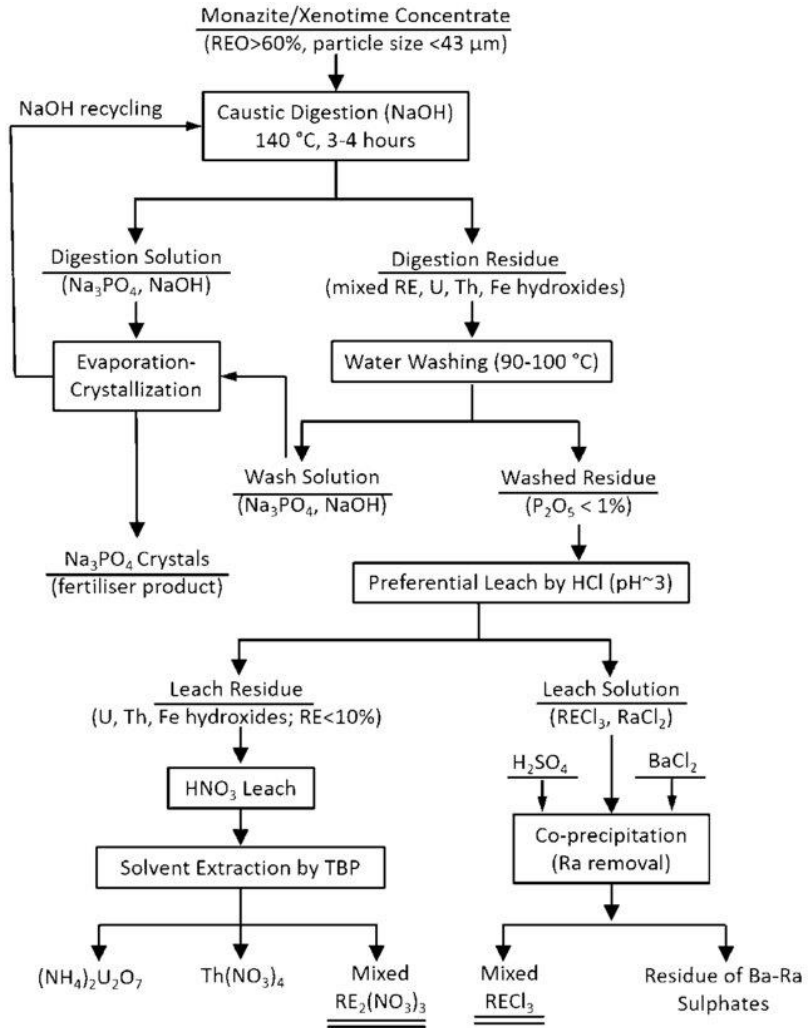


Pada reaksi ini, fluorin di dalam bastnasit bereaksi dengan MgO untuk membentuk magnesium fluoride yang larut dalam air. Oleh karena itu, lebih banyak REE yang dapat dikonversi menjadi RE-oksida, yang mana dapat mempermudah reaksi roasting klorida.

Untuk proses roasting klorida, ammonium klorida digunakan pada suhu 325 °C, bertujuan untuk mendekomposisi ammonia dan HCl:



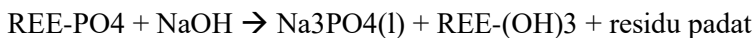
RE klorida yang terbentuk dapat larut dalam air. Oleh karena itu, unsur-unsur RE dapat direcovery dengan proses pelindian air panas. Berdasarkan analisis termodinamika, Al_2O_3 , Fe_2O_3 dan SiO_2 dalam konsentrat bastnasit tidak dapat diklorinasi, dan hampir tidak berubah dalam lingkungan pemanggangan yang diterapkan. Hal ini menunjukkan bahwa proses roasting di atas memiliki tingkat selektivitas yang tinggi, dan secara efektif dapat memfasilitasi pemisahan produk tanah jarang dari unsur Al, Si dan Fe pada proses leaching downstream.



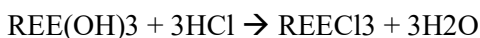
Gambar 5.11 Proses pengolahan LTJ dari monasit/senotim (Vaughan et al., 2021).

Pada Gambar 5.11, terlihat pengolahan logam tanah jarang yang berasal dari monasit / senotim yang mana mineral yang berikatan dengan fosfat.

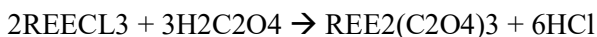
REE-PO₄. Proses pengolahan dimulai dengan pemecahan ikatan fosfat dari mineral menggunakan NaOH:



Natrium fosfat dapat di rekoverti kembali untuk digunakan sebagai pupuk (Na₂(PO₄)₃) dan NaOH digunakan pada proses digesti kembali setelah melalui proses evaporasi dan kristalisasi. Filtrat REE-(OH)₃ dan residu padat kemudian dipisahkan menggunakan filtrasi (umumnya filtrasi vakum). Leach residu yang masih mengandung U, Th dan Fe hidroksida kemudian di leaching menggunakan asam nitrat kemudian filtrat leaching diekstraksi pelarut menggunakan TBP untuk memisahkan NH₄U₂O₇, Th(NO₃)₄, dan REE₂(NO₃)₄, sedangkan REE-klorida dihasilkan dengan leaching residu menggunakan HCl.



Produk leaching pertama akan dipresipitasi menggunakan asam sulfat dengan tambahan barium klorida. REE klorida yang berada pada keadaan liquid kemudian di presipitasi kembali menggunakan asam oksalat untuk menghasilkan REE oksalat yang kemudian dapat dikalsinasi menjadi REE-oksida.



Bab 6

Pengolahan Limbah Pengolahan Mineral

6.1. *Pengolahan Tailing dan Manajemen*

Tailing adalah produk sampingan yang dihasilkan dari proses mekanis dan kimiawi yang digunakan untuk mengekstraksi produk yang diinginkan (seperti emas dan tembaga) dari bijih. Setelah bijih diproses, logam, mineral, bahan kimia, bahan organik, dan air proses yang tidak dapat dipulihkan dan tidak ekonomis dibuang, biasanya dalam bentuk lumpur (slurry), ke tempat penyimpanan yang biasa disebut sebagai fasilitas pengelolaan tailing, fasilitas penyimpanan tailing (tailing storage facility/TSF), atau area pembuangan residu. Topik-topik yang dibahas dalam bab ini merupakan elemen-elemen dasar dari kerangka kerja pengelolaan tailing. Kerangka kerja pengelolaan tailing menggambarkan perawatan dan pengelolaan fasilitas melalui seluruh siklus hidupnya (konsep, desain, konstruksi, operasi, dan penutupan).

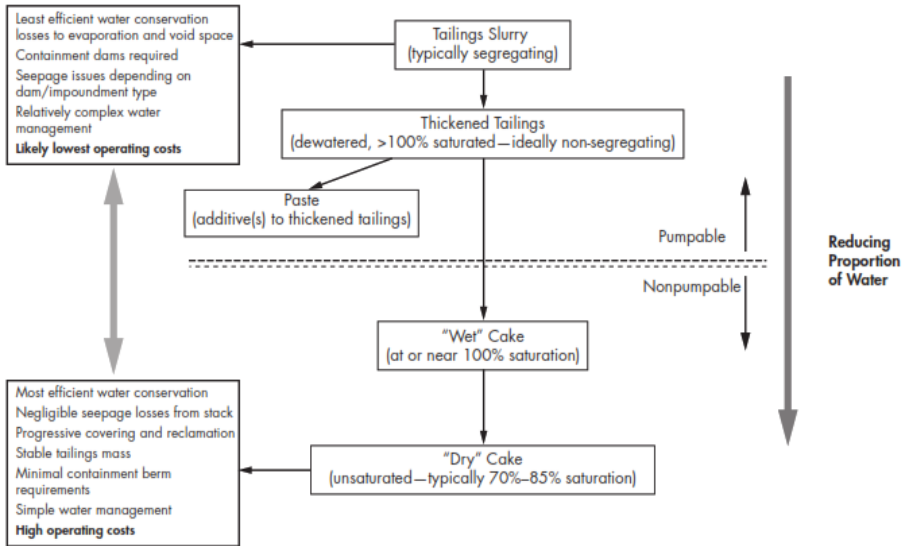
- Perkembangan terkini terkait pengolahan tailing dan limbah pengolahan. Tren saat ini dalam industri pertambangan berfokus pada upaya meminimalkan konsumsi air, mengurangi risiko yang terkait dengan pengelolaan dan penyimpanan tailing, serta mengurangi jejak penyimpanan tailing. Tren tersebut meliputi hal-hal berikut ini:
 1. Peningkatan pertimbangan penggunaan tailing yang dikentalkan, dipadatkan, dan disaring untuk mengurangi konsumsi air dan jejak permukaan
 2. Pembuangan tailing pekat ke dalam tambang bawah tanah untuk menyediakan penyangga tanah dan mengurangi jejak di permukaan
 3. Pembuangan tailing bersama dengan fasilitas batuan buangan untuk mengurangi jejak di permukaan dan mengurangi potensi masalah geokimia/drainase
 4. Pembuangan tailing di dalam lubang tambang untuk mengurangi jejak di permukaan
 5. Penginderaan jarak jauh dan pemantauan menggunakan radar bukaan sintetik interferometrik berbasis satelit (InSar) dan

teknologi pesawat nirawak (drone). (InSar) dan teknologi drone (pesawat tanpa awak). Alat-alat ini digunakan untuk memantau fasilitas tailing. Alat-alat tersebut digunakan untuk memeriksa dan mengukur deformasi dan rembesan [melalui inframerah] dari waktu ke waktu).

- Tailing storage facility (TSF)

TSF adalah fasilitas yang dirancang dan dibangun untuk menampung tailing. Tujuan utama dari TSF adalah untuk menyediakan fasilitas khusus yang akan mengurung padatan tailing dan air proses secara aman di suatu area yang ditentukan, di mana mereka dapat dikelola selama masa tambang, penutupan tambang, dan pascapenutupan tambang. TSF dapat memiliki berbagai bentuk dan rupa, tergantung pada banyak faktor, seperti berikut ini:

1. Topografi lokasi Kondisi geoteknik dan hidrologi lokal dan regional
2. Kondisi geoteknik dan hidrologi setempat
3. Jenis tailing yang akan ditampung Kendala pengolahan
4. Kendala lingkungan
5. Kegempaan
6. Iklim Kendala konstruksi fasilitas
7. Peraturan pertambangan negara



Gambar 6.1 Tailing continuum (Dunne et al., 2019).

Ilustrasi kontinum tailing ditunjukkan pada Gambar 6.1. Di salah satu ujung kontinum terdapat lumpur tailing, yang berperilaku sebagai semicair. Di ujung kontinum yang lain terdapat tailing cake atau tailing yang telah disaring, yang berperilaku sebagai tanah basah. Di antara kedua titik akhir tersebut terdapat tailing yang mengental dan tailing pekat. Pengurangan proporsi air dalam tailing mempengaruhi bagaimana tailing tersebut dapat diendapkan (dapat dipompa atau tidak dapat dipompa), yang dapat berdampak pada modal dan biaya operasi untuk pembuangan tailing. Manfaat dari pengurangan kandungan air dalam tailing termasuk penggunaan sumber daya air yang lebih efektif, biaya pengelolaan air yang lebih rendah (lebih sedikit air yang harus ditangani), pengurangan jejak TSF (dari pengurangan penyimpanan air di TSF), dan persyaratan penutupan yang lebih mudah.

Pemilihan tipe tailing untuk diproduksi pada saat operasi pengolahan mineral dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu:

1. Modal dan biaya operasi

2. Mineralogi bijih dan proses yang dibutuhkan
 3. Ketersediaan air untuk pengolahan
 4. Larangan-larangan keberlanjutan lingkungan
 5. Penerimaan social
 6. Ketersediaan lahan
 7. Risiko dan toleransi
 8. Keadaan seismik, iklim, geoteknikal dan hidrologikal dari lokasi TSF.
- Konfigurasi fasilitas penyimpanan tailing

Untuk pembuangan tailing ke permukaan (slurry, thickened, pasta, atau filtered), ada empat konfigurasi penyimpanan TSF utama yang dapat dipertimbangkan.

1. Cross-valley. TSF lintas lembah dibentuk dengan membangun tanggul penampungan di lembah atau drainase alami. Topografi alami yang dikombinasikan dengan tanggul penahan membentuk cekungan penyimpanan tailing utama. Contoh TSF lintas lembah ditunjukkan pada Gambar 6.2.
2. Paddock. Paddock TSF (sering disebut juga sebagai sel TSF, tanggul cincin TSF, atau sarang kalkun TSF) adalah TSF di mana tanggul penahanan dibangun di sekeliling seluruh fasilitas, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.3. TSF paddock umumnya digunakan di daerah yang sangat datar dan memiliki sedikit relief topografi.
3. Pembuangan di dalam lubang. Sesuai dengan namanya, TSF dalam pit adalah TSF di mana tailing diendapkan ke dalam lubang terbuka yang tidak aktif, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 6.4.
4. Penimbunan. Penimbunan atau pembuangan tailing secara bersama-sama terdiri dari pencampuran material lain, seperti batuan buangan, dalam satu tempat penyimpanan. Pendekatan ini memungkinkan tailing untuk "ditumpuk" dengan mengisi rongga-rongga di dalam batuan buangan atau media lainnya. Gambar 6.5 menunjukkan contoh tailing yang ditumpuk.



Gambar 6.2 Cross valey (Dunne et al., 2019).



Gambar 6.3Paddock (Dunne et al., 2019).



Gambar 6.4 In-pit disposal (Dunne et al., 2019).



Gambar 6.5 Commingle / co-disposal (Dunne et al., 2019).

6.2. Manajemen air

Pengelolaan air di dalam dan di sekitar TSF merupakan komponen penting dalam pengelolaan fasilitas secara keseluruhan. Seperti yang disebutkan sebelumnya dalam bab ini, pengelolaan air yang buruk telah

memainkan peran penting dalam kegagalan TSF di masa lalu. Pengelolaan air di dalam TSF tidak hanya mengatur ukuran kolam reklamasi, tetapi juga lokasinya. Ukuran dan lokasi kolam dapat mempengaruhi stabilitas tanggul/bendungan TSF serta tingkat rembesan, geometri pantai, kepadatan tailing, dan kinerja sistem penuangan. Ukuran dan lokasi kolam penirisan dapat dipengaruhi oleh metode dan arah pengendapan, geometri fasilitas penampungan tailing, iklim, tingkat perolehan kembali (recovery rate) penirisan, dan karakteristik pengendapan tailing. Oleh karena itu, rencana pengendapan tailings harus diintegrasikan dengan pengelolaan air. Ada dua alat utama yang digunakan untuk mengelola air secara efektif di TSF. Alat-alat tersebut adalah (1) neraca air dan (2) rekonsiliasi/pemantauan kinerja TSF.

6.2.1 Neraca air

Neraca air adalah sebuah metode yang digunakan untuk mendeskripsikan dan mengkuantifikasi aliran air ke dan keluar sistem. Untuk sebuah TSF, neraca air terdiri dari beberapa komponen utama yaitu

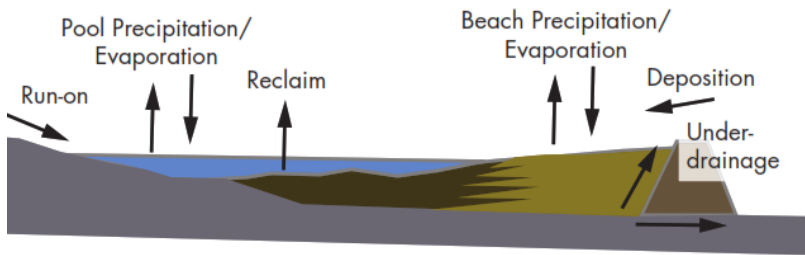
Inflow

- Laju hujan ke dalam jejak permukaan di fasilitas
- Penangkapan aliran limpasan curah hujan ke dalam fasilitas
- Air endapan yang dialirkan ke dalam tailing dari pabrik pengolahan
- Pembuangan air tanah ke dalam fasilitas (jika ada)

Outflow

- Mengembalikan/mengambil kembali air dari TSF ke pabrik pengolahan
- Penguapan dari kolam supernatan dan pantai
- Air yang terperangkap dalam tailing
- Penangkapan rembesan dari saluran air bawah tanah dan sistem pemulihan pengumpulan lindi

Skema umum neraca air untuk TSF disajikan pada Gambar 6.6.



Gambar 6.6 Neraca air pada fasilitas penyimpanan tailing

Daftar Pustaka

- Bizhanov, A., & Chizhikova, V. (2020). *Sinter Production* (pp. 1–170). https://doi.org/10.1007/978-3-030-26025-5_1
- Chi, R., Zhang, X., Zhu, G., Zhou, Z. A., Wu, Y., Wang, C., & Yu, F. (2004). Recovery of rare earth from bastnasite by ammonium chloride roasting with fluorine deactivation. *Minerals Engineering*, *17*(9–10), 1037–1043. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.04.010>
- Dunne, R. C., Kawarta, S. K., & Young, C. A. (2019). *SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook* (1st ed., Vol. 1). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Faris, N., Pownceby, M. I., Bruckard, W. J., & Chen, M. (2023). The Direct Leaching of Nickel Sulfide Flotation Concentrates – A Historic and State-of-the-Art Review Part I: Piloted Processes and Commercial Operations. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, *44*(6), 407–435. <https://doi.org/10.1080/08827508.2022.2070617>
- Flowers, P., Theopold, K., & Langley, R. (2023). *Metallurgy of Iron and Steel*. LibreTexts Libraries.
- Fuerstenau, M. C., & Han, K. N. (2009). Principles of Mineral Processing. In *Mineral Beneficiation* (1st ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Hidayat, T., Fitrianingrum, L., Suharto, & Sudiby. (2020). Ecology and sociology analysis for mineral resources management in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *483*(1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/483/1/012030>
- Lee, M., Cho, S., Choi, J.-S., Kim, H.-W., Hong, S., & Lee, T. H. (2012). Metamodel-Based Multidisciplinary Design Optimization of a Deep-Sea Manganese Nodules Test Miner. *Journal of Applied Mathematics*, *2012*, 1–18. <https://doi.org/10.1155/2012/326954>

- Michaud, D. (2018). *Open Cast Mining Advantages*. 911Metalurgist. <https://www.911metallurgist.com/blog/open-cast-mining>
- Mindat.org. (2023). *Mineral Data*. mindat.org
- The Editors of Encyclopaedia. (2010). *Placer Deposit*. Britannica. <https://www.britannica.com/science/placer-deposit>
- Vaughan, J., Tungpalan, K., Parbhakar-Fox, A., Fu, W., Gagen, E. J., Nkrumah, P. N., Southam, G., van der Ent, A., Erskine, P. D., Gow, P., & Valenta, R. (2021). Toward Closing a Loophole: Recovering Rare Earth Elements from Uranium Metallurgical Process Tailings. *JOM*, 73(1), 39–53. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04451-7>
- Wan, X., Shi, J., Taskinen, P., & Jokilaakso, A. (2020). Extraction of Copper from Copper-Bearing Materials by Sulfation Roasting with SO₂-O₂ Gas. *JOM*, 72(10), 3436–3446. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04300-7>

"Pengolahan Mineral II: Ekstraktif Metalurgi" adalah eksplorasi komprehensif mengenai metalurgi ekstraktif, dirancang dengan tujuan ganda untuk memberikan pemahaman yang mendalam bagi mahasiswa diploma dan membuat subjek ini dapat diakses oleh masyarakat umum. Meliputi hidrometalurgi, pirometalurgi, dan elektrometalurgi, buku ini memperkenalkan pembaca pada beragam proses yang terlibat dalam ekstraksi logam dari bijih. Dimulai dengan gambaran umum yang deskriptif, buku ini melanjutkan untuk membahas dasar dari setiap metode metalurgi, memberikan pengetahuan dasar.

Bagian terakhir yaitu menjelajahi aplikasi praktis di berbagai industri, menggambarkan signifikansi dunia nyata dari metalurgi ekstraktif. Dengan struktur yang terorganisir dengan baik dan bahasa yang mudah dipahami, buku ini berfungsi sebagai sumber daya berharga, menjembatani kesenjangan antara pembelajaran akademis dan wawasan praktis untuk khalayak yang luas yang tertarik pada dunia yang menarik dari metalurgi.

AL ARSY MEDIA

AL ARSY MEDIA

Penerbitan Buku dan HAKi

Jl. AMD, Perumahan Grand Sulawesi Antang

<https://alarsymedia.com>

ISBN 978-623-10-2499-2



9 786231 024992