



# REKAYASA BENEFISIASI

PEMROSESAN MINERAL UNTUK MENINGKATKAN  
NILAI TAMBAH SUMBER DAYA MINERAL MARGINAL

Eko Tri Sumarnadi Agustinus

# REKAYASA BENEFISIASI

PEMROSESAN MINERAL UNTUK MENINGKATAN  
NILAI TAMBAH SUMBER DAYA MINERAL MARGINAL

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

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

*All Rights Reserved*

# REKAYASA BENEFISIASI

PEMROSESAN MINERAL UNTUK MENINGKATAN  
NILAI TAMBAH SUMBER DAYA MINERAL MARGINAL

**Eko Tri Sumarnadi Agustinus**

LIPI Press

© 2019 Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)  
Pusat Penelitian Geoteknologi

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Rekayasa Benefisiensi, Pemrosesan Mineral untuk Meningkatkan Nilai Tambah Sumber Daya Mineral Marginal/Eko Tri Sumarnadi Agustinus–Jakarta: LIPI Press, 2019.

xvi hlm. + 148 hlm.; 14,8 × 21 cm

ISBN: 978-602-496-054-4 (cetak)

978-602-496-055-1 (*e-book*)

1. Rekayasa benefisiensi
2. Mineral
3. Nilai tambah

666.8

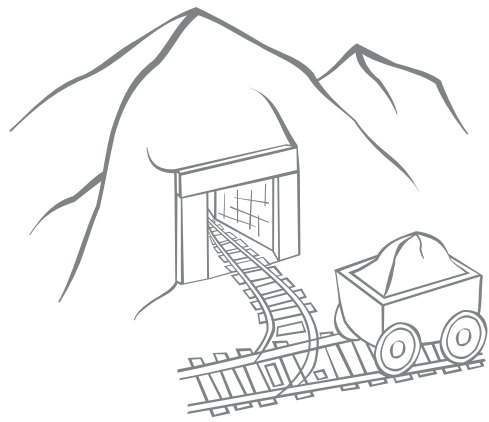
*Copy editor* : Tantrina Dwi Aprianita  
*Proofreader* : Noviasututi Putri Indrasari dan Sonny Heru Kusuma  
*Penata isi* : Astuti Krisnawati dan Meita Safitri  
*Desainer sampul* : D.E.I.R. Mahelingga

Cetakan Pertama : Juli 2019



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

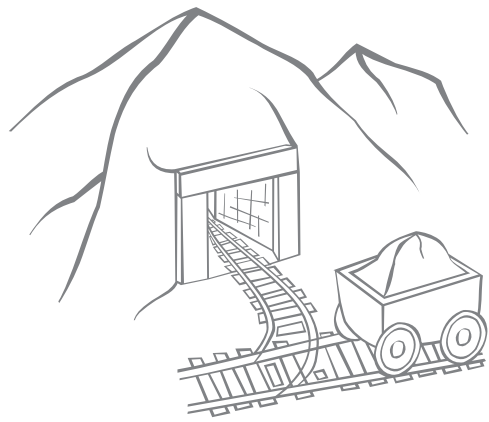
 LIPI Press  
 @lipi\_press



# DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR .....	vii
PENGANTAR PENERBIT .....	xi
KATA PENGANTAR .....	xiii
PRAKATA .....	xv
<b>BAB I Pemanfaatan Sumber Daya Mineral Indonesia .....</b>	<b>1</b>
A. Kerangka Tektonik Indonesia .....	4
B. Jalur Mineralisasi di Indonesia .....	7
C. Sebaran Mineral Logam .....	7
D. Sebaran Mineral Non-Logam dan Batuan .....	16
E. Komoditas Mineral Andalan Indonesia .....	19
F. Dampak Eksploitasi Sumber Daya Mineral yang Tak Terkendali .....	21
<b>BAB II Perubahan Paradigma, Konservasi, dan Nilai Tambah .....</b>	<b>25</b>
A. Perubahan Paradigma .....	25
B. Konservasi dan Nilai Tambah .....	29

C. Konsep Peningkatan Nilai Tambah Mineral .....	32
D. Strategi Peningkatan Nilai Tambah Mineral .....	42
<b>BAB III Benefisiasi untuk Meningkatkan Nilai Tambah Mineral...</b>	<b>47</b>
A. Teknologi Benefisiasi .....	47
B. Kajian Pemrosesan Mineral di Indonesia .....	50
C. Kajian Benefisiasi Mineral Logam (Bijih).....	58
D. Kajian Pemrosesan Mineral Bukan Logam dan Batuan .....	71
E. Kajian Pemrosesan Mineral di Luar Negeri .....	73
F. Pemrosesan Bijih Metode <i>Bioleaching</i> .....	80
G. Kritik terhadap Benefisiasi Mineral.....	82
<b>BAB IV Rekayasa Benefisiasi Inovasi Transformasi Teknologi.....</b>	<b>83</b>
A. Alur Pikir.....	83
B. Konsep Rekayasa Benefisiasi.....	85
C. Model Rekayasa Benefisiasi.....	86
D. Strategi Rekayasa Benefisiasi .....	90
E. Penerapan Rekayasa Benefisiasi .....	92
<b>BAB V Pohon Industri Tumbuh Optimal .....</b>	<b>131</b>
DAFTAR PUSTAKA.....	137
DAFTAR SINGKATAN .....	143
INDEKS .....	145
BIOGRAFI PENULIS.....	147



# DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Plate Boundaries ( <i>Pacific ring of fire</i> ) .....	3
Gambar 2.	Peta Panas Bumi Vulkanik dan Vulkanologi-Tektonik.....	3
Gambar 3.	Peta Tataan Fisiografi Kepulauan Indonesia.....	4
Gambar 4.	Peta Busur Luar Non-vulkanik.....	5
Gambar 5.	Peta Jalur Mineralisasi di Indonesia.....	8
Gambar 6.	Penambangan mineral logam di laut dan di darat yang diekspor masih dalam kondisi mentah.....	21
Gambar 7.	Diagram perubahan paradigma eksplorasi (dari paradigma eksplorasi ekstraktif ke paradigma eksplorasi konservatif) .....	27
Gambar 8.	Diagram Perubahan Paradigma Benefisiensi Menuju Rekayasa Benefisiensi .....	28
Gambar 9.	Diagram Konsep Peningkatan Nilai Tambah Mineral...	32
Gambar 10.	Diagram Alir Korelasi antara Aspek Kelembagaan dan PNT .....	35
Gambar 11.	Diagram Strategi Peningkatan Nilai Tambah Mineral...	41

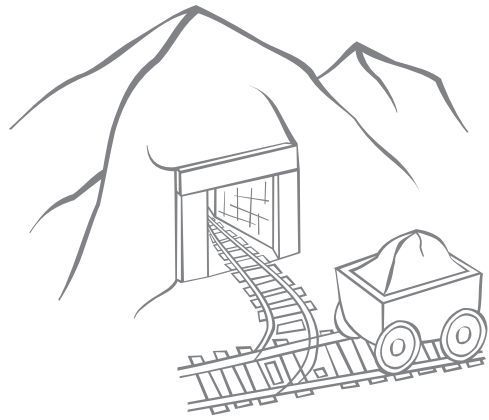


Gambar 12.	Diagram Korelasi antara Bahan Baku, Teknologi Proses, dan Produk .....	48
Gambar 13.	Kapal Isap Produksi di Sekitar Perairan Pantai Pulau Bangka .....	59
Gambar 14.	Modifikasi Perahu Nelayan dan Rakit di Perairan Pulau Bangka .....	60
Gambar 15.	Pengolahan Mineral Logam Emas dengan Metode Konsentrasi Gravimetri (a) pendulangan dan (b) <i>Sluice Box</i> di Bombana, Sulawesi Tenggara.....	64
Gambar 16.	Amalgamator dengan Penggerak Tenaga Diesel (Listrik) dan Tenaga Air.....	65
Gambar 17.	Difragtogram Hasil X-RD Mineral dari <i>Oil Shale</i> .....	75
Gambar 18.	Foto microorgaf SEM dari sample <i>oil shale</i> pada berbagai fase mineral memperlihatkan (1) Calcite, (2) <i>Clays</i> , (3) <i>Silica</i> , (4) <i>Calcium</i> , (5) <i>Iron oxide</i> .....	76
Gambar 19.	Alur Pikir Deduktif Inovasi Metode Pemrosesan Mineral .....	84
Gambar 20.	Diagram Konsep Rekayasa Benefisiasi Berdasarkan Alur Pikir Deduktif .....	86
Gambar 21.	Bagan Alir Eksperimen Model Rekayasa Benefisiasi sebagai Konfirmasi terhadap Hipotesis.....	87
Gambar 22.	Pola Jalur Analisis Desain Faktorial $2^3$ (dua level dari tiga faktor) .....	89
Gambar 23.	Pola jalur analisis rancang acak lengkap satu variabel bebas terdiri atas enam level dan dua variabel respons dengan tiga replikasi .....	90
Gambar 24.	Diagram Sistem $MgO-SiO_2-H_2O$ .....	93
Gambar 25.	Batuan perlit (a) dan foto mikrograft sayatan tipis dilihat dari mikroskop polarisasi (b) memperlihatkan struktur mengulit bawang.....	94
Gambar 26.	Foto dan Bagan Penampang <i>Autoclave</i> .....	96
Gambar 27.	Foto Mikrograf SEM Hasil Eksperimen Model Statis....	98

Gambar 28.	Foto Mikrograf SEM Hasil Eksperimen Model Dinamis (a), dan Contoh Atapulgit Impor (b) .....	99
Gambar 29.	Prototipe <i>Paving Block</i> dan Karakteristiknya.....	102
Gambar 30.	Bagan Alir Pembentukan Prototipe GEM.....	103
Gambar 31.	Soil <i>Resistivity Meter</i> dan Benda Uji GEM .....	104
Gambar 32.	Ilustrasi mikrostruktur layer bentonit dilihat dari mikroskop polarisasi .....	106
Gambar 33.	Mekanisme Pembesaran Pori melalui Interkalasi .....	107
Gambar 34.	Bagan Alir Pembentukan Prototipe Tablet MPMO.....	108
Gambar 35.	Prototipe Produk MPMO Kultur Tablet.....	109
Gambar 36.	Bagan Alir Implementasi MPMO dalam Unit IPAL PG Sindanglaut.....	110
Gambar 37.	Pemberian Nutrisi dan Penanaman Mikroorganisme di Unit IPAL PG. Sindanglaut, Cirebon .....	111
Gambar 38.	Pengukuran SV-30 dan Kurva Pertumbuhan Bakteri Selama Tujuh Hari .....	113
Gambar 39.	Kurva Hasil Pemantauan Nilai COD, pH dan SV-30, Juni–Juli 2012 .....	114
Gambar 40.	Kurva Hasil Pemantauan IPAL, Juni–Oktober 2012 .....	116
Gambar 41.	Perbedaan Warna Contoh Air Limbah Sebelum dan Sesudah Pemrosesan .....	117
Gambar 42.	<i>Sludge</i> di Saluran Terbuka dan TPA.....	118
Gambar 43.	Diagram Alir Aplikasi <i>Geopolymer</i> .....	120
Gambar 44.	Bagan Alir Pembuatan Benda Uji dan Prototipe Produk Geomaterial .....	121
Gambar 45.	Benda Uji dan Prototipe Produk Geomaterial.....	122
Gambar 46.	<i>Amphibolic molecule</i> (1a) dalam kondisi normal, (b) dalam air, dan (c) dalam larutan bersurfaktan pada konsentrasi rendah.....	124
Gambar 47.	Ilustrasi Perubahan Tegangan Permukaan vs Konsentrasi Surfaktan.....	125

Gambar 48.	Difragtogram X-RD Karbon Aktif dari Batu bara Sebelum dan Sesudah Proses Demineralisasi.....	126
Gambar 49.	Fotomikrograf SEM Contoh Karbon Aktif dari Batu Bara (Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batu bara Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral) .....	127
Gambar 50.	Spektrum FTIR Karbon Aktif Sebelum dan Sesudah Penyiapan SMAC .....	127
Gambar 51.	Diagram Perbandingan Daya Serap (1) Karbon Aktif Biasa, (2) Demineralisasi Karbon Aktif, dan (3) Modifikasi Karbon Aktif menjadi SMAC. ....	129
Gambar 52.	Ilustrasi Pohon Industri Berbasis Mineral Kaolinit.....	134

# PENGANTAR PENERBIT



Sebagai penerbit ilmiah, LIPI Press mempunyai tanggung jawab untuk menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Upaya tersebut merupakan salah satu perwujudan tugas LIPI Press untuk ikut serta dalam mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

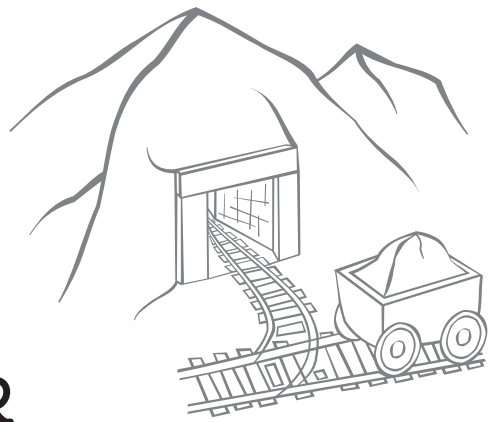
Buku *Rekayasa Benefisiasi, Pemrosesan Mineral untuk Meningkatkan Nilai Tambah Sumber Daya Mineral Marginal* ini disusun berdasarkan hasil kajian penulis selama bekerja di Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI tentang inovasi transformasi teknologi pemrosesan mineral dalam rangka peningkatan nilai tambah sumber daya marginal.

Semoga buku ini dapat digunakan sebagai bahan acuan bagi para generasi penerus dalam upaya pemanfaatan dan pengelolaan sumber daya mineral, batuan, dan batu bara pada masa mendatang.

Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

LIPI Press





# KATA PENGANTAR

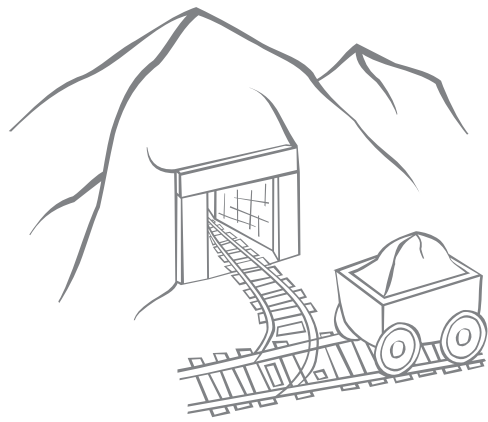
Puji dan syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, buku yang berjudul *Rekayasa Benefisiensi, Pemrosesan Mineral untuk Meningkatkan Nilai Tambah Sumber Daya Mineral Marginal* telah dapat diselesaikan. Buku ini memuat inovasi dalam hal transformasi teknologi pemrosesan mineral untuk meningkatkan nilai tambah sumber daya marginal. Materi buku ini diperoleh dari hasil kajian pemrosesan mineral di dalam negeri maupun di luar negeri dan hasil penelitian penulis selama bekerja di Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.

Meskipun telah diupayakan kelengkapan dan penyempurnaan materi yang disajikan, buku ini masih belum sepenuhnya dapat memenuhi kebutuhan pengguna. Oleh karena itu, kami mengharapkan saran dan kritik yang konstruktif dari berbagai pihak untuk perbaikan pada publikasi yang akan datang. Semoga buku ini dapat bermanfaat, khususnya bagi para mahasiswa, peneliti, dan perekayasa dalam menyusun perencanaan pemanfaatan sumber daya mineral.

Bandung, Februari 2018  
Kepala Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI

Dr. Eko Yulianto





# PRAKATA

Buku ini merupakan bagian dari rangkaian hasil penelitian yang pendanaannya berasal dari Program Tematik Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI, Program Kompetitif Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), dan Program Insentif Riset Terapan Kementerian Riset dan Teknologi (KRT). Buku karya tulis ilmiah (KTI) ini berisi informasi tentang penelitian penulis dalam bidang kompetensi inti teknik sumber daya geologi, khususnya dalam hal pemrosesan mineral. Penulisan buku karya tulis ilmiah (KTI) ini bertujuan memperoleh informasi tentang inovasi transformasi teknologi pemrosesan mineral untuk meningkatkan nilai tambah sumber daya mineral marginal.

Materi penulisan buku ini disusun berdasarkan hasil kajian penulis selama bekerja di Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI dan tergabung dalam Kelompok Penelitian Mineral dan Energi. Buku ini diharapkan dapat digunakan sebagai bahan acuan generasi penerus dalam upaya pemanfaatan dan pengelolaan sumber daya mineral, batuan, dan batu bara pada masa mendatang.



Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih dan apresiasi yang tinggi kepada semua pihak yang telah membantu penulis, baik dalam memperkaya data hasil penelitian maupun yang secara terbuka memberikan masukan dan kritik dalam proses penyusunan buku ini. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya bagi semua pihak, terutama bagi pemangku kepentingan (*stakeholder*), pemerintah, masyarakat, dan industri.

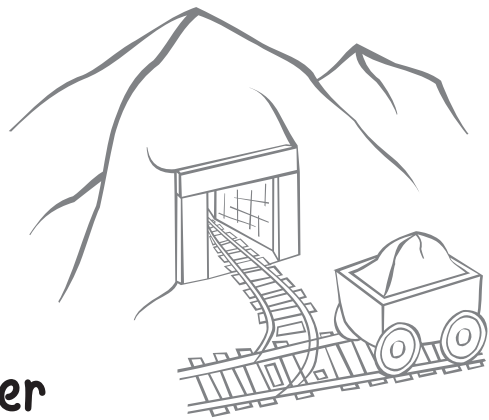
Bandung, Februari 2018

Penulis

Eko Tri Sumarnadi Agustinus

# BAB I

## Pemanfaatan Sumber Daya Mineral Indonesia

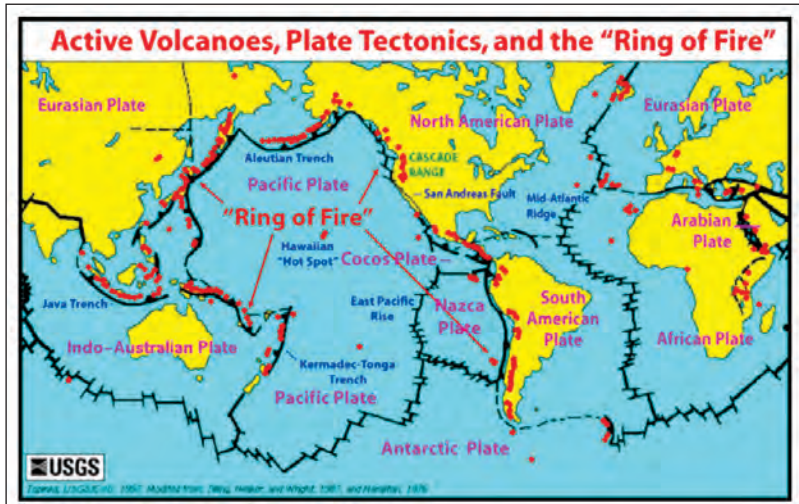


Sumber daya (*resources*) didefinisikan sebagai segala sesuatu yang dapat dimanfaatkan bagi kehidupan manusia. Sumber daya terdiri atas sumber daya alam dan sumber daya buatan; salah satu contoh sumber daya alam adalah sumber daya mineral (*mineral resources*) (Ardha dkk., 2011; Suprpto, Handayani, & Wahyudi, 2007). Mineral secara umum diartikan sebagai senyawa anorganik yang terbentuk di alam, memiliki sifat fisik dan kimia tertentu, dan mempunyai susunan kristal yang teratur. Gabungan dari satu atau lebih jenis mineral, baik dalam bentuk lepas maupun padu, disebut batuan. Dengan demikian, sumber daya mineral diartikan sebagai endapan atau cebakan mineral berharga yang terdapat di suatu wilayah, baik yang sudah diketahui jumlah cadangannya maupun yang masih bersifat potensi (Ardha dkk., 2011; Simatupang & Sigit, 1991).

Sumber daya mineral terdiri atas mineral logam dan mineral bukan logam serta mineral ikutan dan mineral pengganggu. Logam adalah unsur kimia yang bersifat penghantar listrik dan panas yang baik. Mineral logam adalah komoditas mineral yang komponen

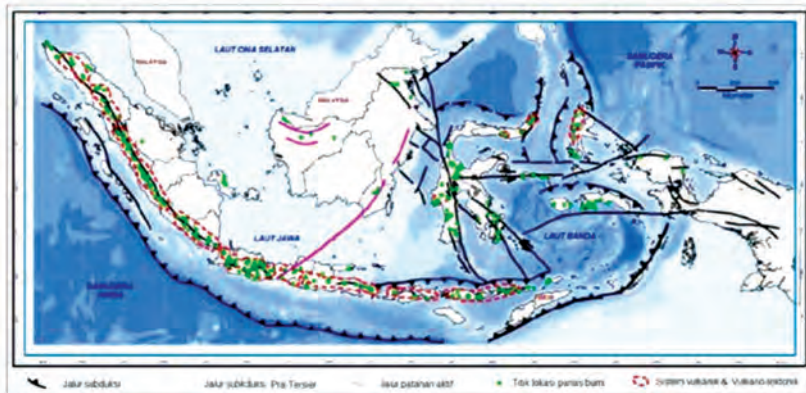
utamanya terdiri atas unsur logam, misalnya emas, platina, tembaga, dan lain-lainnya. Mineral bukan logam adalah komoditas mineral yang komponen utamanya terdiri atas unsur bukan logam seperti pasir kuarsa, bentonit, dan lain-lain. Mineral ikutan (*accessory minerals*) adalah mineral pembentuk batuan hasil kristalisasi magma. Mineral jenis ini terdapat dalam jumlah yang relatif sedikit ( $< 5\%$ ). Ada atau tidak adanya mineral tersebut dalam batuan tidak berpengaruh dalam penentuan nama batuan, misalnya apatite, zircon, dan rutil. Mineral pengganggu adalah mineral yang tidak berharga yang terdapat di dalam bijih (Ardha dkk., 2011; Simatupang & Sigit, 1991). Sumber daya marginal adalah sumber daya mineral, batuan, dan batu bara serta mineral ikutan produk pertambangan yang ketika itu masih belum mendapat perhatian untuk dimanfaatkan bagi kehidupan manusia. Belum diperhatikannya sumber daya tersebut karena memang potensinya, baik dari segi kualitas maupun kuantitas, relatif rendah. Selain itu, belum ada kajian teknologi proses yang ekonomis sehingga dianggap sebagai mineral yang tidak berharga (Rosana, 2017).

Seperti diketahui, Indonesia terletak pada jalur vulkanisme yang menyerupai sebuah cincin api (*ring of fire*) Pasifik sebagai akibat penunjaman lempeng kerak Samudra Hindia-Australia yang bergerak ke arah utara menunjam ke bawah bagian selatan lempeng Benua Eurasia dan membentuk rangkaian gunung api, mulai dari Pulau Andaman, Sumatra, Jawa, Bali, hingga Pulau Flores (Setijadji, 2010). Keberadaan jalur gunung api tersebut mencirikan kerangka tektonik wilayah bagian barat Indonesia yang berpotensi membentuk sumber daya mineral, sistem panas bumi serta sebagai sumber panas bagi pematangan sumber minyak dan batu bara (Gambar 1 dan 2).



Sumber: NOAA (1997)

Gambar 1. Plate Boundaries (Pacific Ring of Fire)



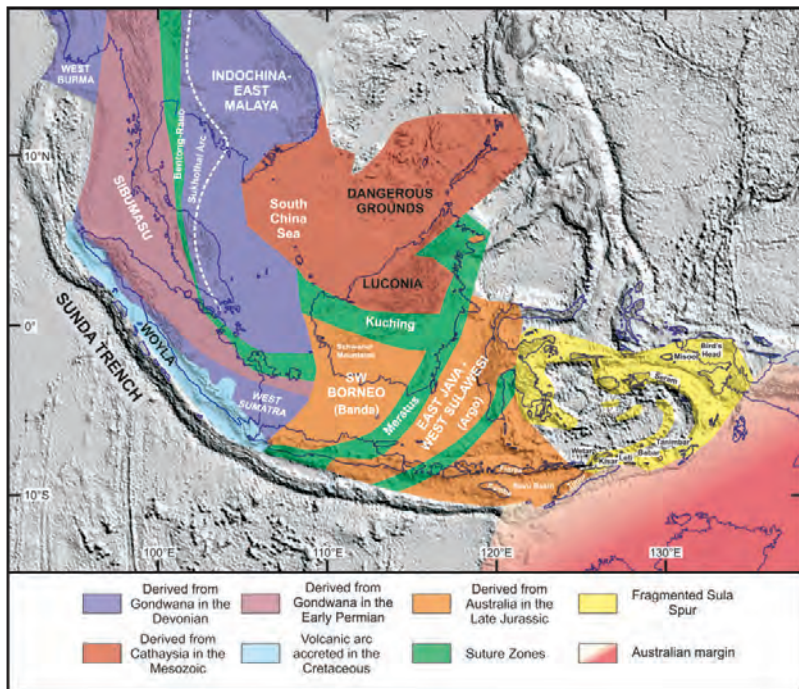
Sumber: Badan Geologi (2012)

Gambar 2. Peta Panas Bumi Vulkanik dan Vulkanotektonik

## A. KERANGKA TEKTONIK INDONESIA

Kerangka tektonik Indonesia dipengaruhi oleh evolusi dan konvergensi tiga lempeng, yaitu lempeng Eurasia, lempeng Samudra India-Australia, dan lempeng Samudra Pasifik. Tataan fisiografi Kepulauan Indonesia terdiri atas dua daerah paparan dengan inti kerak yang mantap, yakni Paparan Sunda dan Paparan Sahul-Arafura (Gambar 3).

Paparan Sunda merupakan bagian dari lempeng Eurasia yang meliputi Semenanjung Malaya, bagian terbesar Pulau Sumatra, Pulau Jawa, Pulau Kalimantan, sebagian besar Laut Jawa, dan bagian selatan Laut Cina Selatan. Paparan Sahul-Arafura merupakan bagian dari lempeng benua Samudra India-Australia, yang terbentang dari



Sumber: Simatupang dan Sigit (1991)

**Gambar 3.** Peta Tataan Fisiografi Kepulauan Indonesia

bagian barat Papua, melewati Laut Arafura, bagian selatan Laut Timor, berlanjut ke arah selatan hingga mendekati daratan Australia yang sekarang ini. Bagian lain wilayah ini berupa jalur *mobile*, tergambar dari kehadiran busur-dalam bergunung api dan sederet pulau-luar non-vulkanik. Busur gunung api tersebut meliputi Sumatra dan Jawa, selanjutnya terentang ke arah timur menuju ke Nusa Tenggara (Bali, Lombok, Sumbawa, Flores dan pulau-pulau kecil di seputar Laut Banda di timur dan timur laut). Busur-luar non-vulkanik meliputi deretan pulau di barat Sumatra, berlanjut ke punggung bawah-laut di selatan Jawa, terus ke timur melewati deretan pulau tak bergunung api Timor, Tanimbar, Kei, kemudian Seram (Gambar 4).

Model tektonik lempeng Indonesia bagian barat memperlihatkan sejumlah unsur struktur, misalnya tunjaman, busur vulkanik-tektonik, cekungan busur-belakang, dan kraton. Model tersebut selanjutnya disempurnakan dengan memanfaatkan model pengendapan pada lereng palung-busur yang mengacu pada lajur Nias di lepas pantai



Sumber: Setijadji (2010)

**Gambar 4.** Peta Busur Luar Non-vulkanik

barat Sumatra. Model dasar yang melibatkan dua jalur penunjaman merupakan dasar dari pembentukan sistem gunung api yang berupa busur terentang di seputar tepi benua. Pembentukannya terjadi karena ada dua pusat pemekaran (busur Sunda dan busur Kalimantan Barat) yang terkait dengan sesar *transform* yang mengarah ke kiri dari busur ke busur. Kemungkinan besar sesar Paternoster merupakan sesar *transform* yang semula menghubungkan busur Sunda dengan busur Kalimantan Barat di Lupal, Serawak (Simatupang & Sigit, 1991).

Model tektonik lempeng bagian timur Indonesia relatif lebih rumit daripada model tektonik lempeng bagian barat Indonesia. Proses tektonik di bagian timur Indonesia relatif lebih rumit jika dibandingkan bagian barat Indonesia. Kerangka tektonik bagian timur Indonesia dipengaruhi oleh tiga unsur benturan lempeng yang satu dengan lempeng yang lain. Bagian timur Palung Busur Sunda yang merupakan bagian besar dari lempeng Eurasia terdesak karena terapungnya Benua Australia ke arah utara, sedangkan lempeng Pasifik mendorong ke arah barat. Peristiwa tersebut menjadikan Indonesia kaya akan sumber daya mineral dan energi (Simatupang & Sigit, 1991). Salah satu cirinya adalah palung dari Timor ke arah timur yang menuju Seram berbeda dengan Jawa-Sumatra. Pembentukan Banda terdiri atas dua tahap. Pada tahap pertama hanya terdapat kerak samudra yang menunjam ke bawah lempeng Samudra Banda. Australia mulai mengapung ke arah utara dan pada tahap kedua kerak benua menyusul masuk ke dalam palung. Sejak Miosen Senja, terjadi pertemuan lempeng di sepanjang tepi Laut Arafura. Bagian alas runtunan sedimen *platform* yang berumur Pasca Miosin Senja terdiri atas endapan lepas, misalnya lumpur, lempung, dan lanau. Batuan itu berubah menjadi sedimen tersirap yang rancu yang bagian depannya terhimpit Teluk Aru dan Palung Tanimbar, yang menunjam sedalam 10–12 km pada dasar baji yang sedang bergerak maju. Akibatnya, hanya sedikit dari runtunan ini yang rusak atau tersuruk dan menyatu dengan baji

yang rancu. Selanjutnya, deformasi baji yang rancu itu bergantung pada tingkat kepadatan serta jenis sedimen yang terlibat. Ketahanan terhadap tegangan tektonik pada runtunan Pra-miosen Senja yang lebih padu demikian besar sehingga tersesar sungkupan oleh baji rancu sejauh 35 km.

## **B. JALUR MINERALISASI DI INDONESIA**

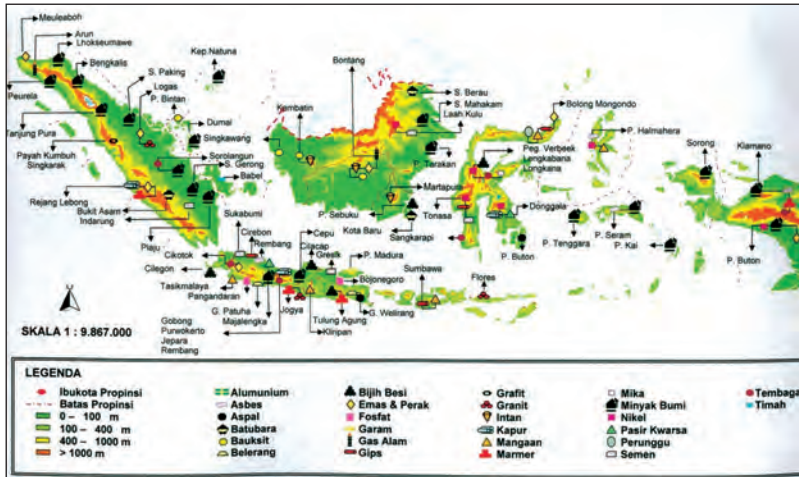
Teori tektonik lempeng telah mengubah pandangan mengenai keberadaan mineral dan sebarannya di dalam ruang dan waktu. Penyebaran sumber daya mineral di Indonesia tecermin dari jalur mineralisasi (batuan). Paling tidak, terdapat tujuh jalur mineralisasi di Indonesia, yaitu Aceh Arc, Sumatra-Meratus Arc, Sunda Arc, Central Kalimantan Arc, Sulawesi East Mindanau Arc, Halmahera Arc, dan Medial Papua Arc, seperti pada Gambar 5. Di wilayah bagian barat Indonesia terdapat mineral logam, misalnya timah dan bauksit. Di Indonesia bagian timur, terdapat nikel, besi, dan tembaga. Sementara itu, keterdapatan logam emas dan perak hampir merata di Indonesia.

Proses tektonik di bagian timur Indonesia relatif lebih rumit jika dibandingkan bagian barat Indonesia. Kerangka tektonik bagian timur Indonesia dipengaruhi oleh tiga unsur benturan lempeng yang satu dengan lempeng yang lain. Bagian timur Palung Busur Sunda yang merupakan bagian besar dari lempeng Eurasia terdesak karena terापungnya Benua Australia ke arah utara, sedangkan lempeng Pasifik mendorong ke arah barat. Peristiwa tersebut menjadikan Indonesia kaya akan sumber daya mineral dan energi (Simatupang & Sigit, 1991).

## **C. SEBARAN MINERAL LOGAM**

Logam merupakan unsur kimia sebagai penghantar listrik dan panas yang baik.





Sumber: Hertanto (2013)

**Gambar 5.** Peta Jalur Mineralisasi di Indonesia

Mineral logam adalah komoditas mineral yang komponen utamanya terdiri atas unsur logam, misalnya emas, platina, tembaga, dan lain-lainnya. Gambar 5 merupakan gambaran sebaran mineral logam di Indonesia.

## 1. Mineral Logam Timah

Secara geologi, sumber timah di Indonesia merupakan bagian dari jalur timah Asia Tenggara (*The South East Asia Tin Belt*). Jalur ini merupakan jalur timah terkaya di dunia dan membentang dari selatan China-Thailand-Myanmar-Malaysia hingga Indonesia. Di Indonesia, jalur timah ini melewati 2/3 bagian yang tertutup oleh laut, juga melewati daratan berupa deretan pulau-pulau yang bertebaran dari arah barat laut Pulau Karimun, Kundur, Singkep, Bangka, hingga Belitung (Simatupang & Sigit, 1991).

Mineral logam timah lebih dikenal dengan nama mineral kasiterit ( $\text{SnO}_2$ ). Mineral ini merupakan senyawa oksida Sn dan termasuk

mineral utama yang ekonomi. Bentuk senyawa lain adalah dengan silika, karbonat, wolframit, sulfida, tetapi kurang bernilai ekonomi. Timah terbentuk dari adanya intrusi *granite biotite* pada masa Trias Atas. Batuan dinamo metamorf yang berumur Permokarbon dan Trias Bawah berkomposisi batu pasir, kwarsit, *shales, fossiliferous lime stone, chert*, konglomerat, dan diabas bertindak sebagai *host-rock*. Mineralisasi magma yang bersifat asam (mengandung gas SnF<sub>4</sub>) terjadi melalui proses *pneumatolitic hidrothermal* yang menerobos dan mengisi celah retakan. Selanjutnya, terjadi proses pelapukan, baik secara kimiawi maupun mekanis, kemudian tererosi, elutriasi, dan transportasi melalui sungai dan terendapkan bersama-sama produk rombakan pasir kuarsa dan mineral ikutan, seperti zirkon, monazit, rutil, dan ilmenit. Sementara itu, deposit timah primer yang tersisa ditemukan di Singkep, Karimun, dan Kundur dalam kuantitas dan kualitas kecil.

## 2. Mineral Logam Aluminium

Bauksit adalah mineral yang mempunyai kandungan aluminium oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) tinggi, dapat berupa mineral *gibbsite* (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 3H<sub>2</sub>O), mineral *boehmit* (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · H<sub>2</sub>O), dan mineral *diaspore* (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · H<sub>2</sub>O). Bauksit terbentuk dari batuan yang mengandung Al relatif tinggi dan Fe yang rendah dan sedikit kuarsa, di antaranya batuan syenit, nefelin yang berasal dari batuan beku, batuan lempeng, atau serpih. Pada umumnya, pembentukan bauksit terjadi di daerah tropis dan subtropis dengan morfologi perbukitan landai sehingga memungkinkan terjadinya pelapukan yang kuat. Batuan tersebut mengalami proses lateritisasi, yakni proses yang terjadi karena pertukaran suhu secara terus-menerus sehingga batuan mengalami pelapukan. Ketika musim hujan, air memasuki rekahan-rekahan dan mentranspor unsur-unsur yang mudah larut, sementara unsur-unsur yang tidak larut tertinggal dalam batuan induk (Simatupang & Sigit, 1991).

### 3. Mineral Logam Nikel

Cebakan nikel di Pulau Sulawesi berkaitan dengan mandala Sulawesi Timur dan Endapan sejenis yang terdapat di Pulau Gebe Pulau Gak, Pulau Waigeo, dan mandala Halmahera Timur-Waigeo. Cebakan nikel ini termasuk yang terdapat di sebelah utara Danau Sentani, dan yang merupakan kumpulan batuan ultrabasa yang berasal dari kerak Samudra Pasifik (Simatupang & Sigit, 1991).

Mandala Sulawesi Timur merupakan terobosan batuan ultramafik yang berada di bagian timur. Mandala Sulawesi Timur berbentuk seperti tubuh memanjang dan sedikit membelok dengan sisi cembung-nya ke arah barat, kemudian membelok ke arah barat daya sebelum mencapai leher Sulawesi mengikuti lengan tenggara. Sementara itu, bagian barat daya mandala ini meliputi deret pluton yang berarah tenggara. Arah deret pluton berawal dari Soa-soa di pantai timur Teluk Bone dan berlanjut ke sepanjang pantai di Pomalaa. Di Pomalaa, arah deret pluton bercabang. Cabang yang satu berlanjut ke timur melewati semenanjung menuju Kendari dan meliputi batuan ultramafik di dekat Andowengga, Makalele, dan Benua. Sementara itu, cabang lainnya berlanjut ke tenggara melewati Gunung Watumohai dan Bombakau hingga di dekat Selat Tiworo. Kedua cabang ini bergabung kembali di ujung tenggara semenanjung di sekitar Selat Wawoni. Hal tersebut ditunjukkan oleh sejumlah tubuh ultramafik kecil-kecil yang terdapat di Pulau Wawoni dan di daratan Sulawesi. Singkapan kecil batuan yang sama juga tersebar di sepanjang barat Pulau Buton.

### 4. Mineral Logam Tembaga

Mineralisasi tembaga ditemukan tersebar dari Pulau Sumatra, Jawa, Sulawesi, Kepulauan Nusa Tenggara, Kepulauan Maluku, hingga Papua. Genesa cebakan mineral tembaga terjadi karena proses magmatik, baik secara hidrotermal maupun metasomatik. Cebakan mineral tembaga di Indonesia belum memiliki nilai ekonomi untuk diusahakan, kecuali

yang ditemukan di daerah Papua. Di Papua, cebakan mineral tembaga ditemukan di daerah Ertsberg (Gunung Bijih), Ertsberg Timur, Dom, dan Grasberg (Simatupang & Sigit, 1991).

Secara geologis, mineralisasi tembaga di daerah Ertsberg terjadi di lereng selatan Pegunungan Jaya Wijaya (Cartenz), yakni daerah yang terangkat paling tinggi (5.200 m) dari rangkaian Pegunungan Tengah Papua. Batuan sedimen tertua di daerah ini adalah anggota teratas kelompok Kembelengan, terdiri atas selang-seling kuarsit dan batupasir dan setempat berubah menjadi hornfels karena metamorf oleh intrusi. Anggota kelompok Kembelengan ini tertutup secara selaras oleh formasi Faumai, yaitu basal dan batugamping Papua. Formasi ini terdiri atas berbagai jenis batugamping bioklastik yang mengandung fosil *milidae* dan algae yang dicirikan oleh foraminifera besar. Batuan ini peka untuk metasomatisma terhadap intrusi dioritik yang kemudian dapat termineralisasi. Formasi basal tertutup secara selaras oleh formasi Ainod dari batugamping yang sama. Batuannya berupa *sikwens* tebal dari batugamping masif.

Di Erstberg, kontak dengan formasi Faumai ditandai oleh batu pasir dengan ketebalan sampai 1 meter. Lapisan sedimen di daerah Ertsberg berjurus barat laut-tenggara dengan kemiringan sedang ke arah timur laut. Ke arah yang sama, kemiringan semakin curam dan terdapat suatu zona dengan sepasang sinklin berjarak rapat dan menghunjam akibat kompresi yang kuat. Di sebelah timur laut, tersingkap dengan jelas sesar naik yang di sisi selatannya menyebabkan patahan normal dan patahan-patahan undak. Susunan patahan tersebut mendasari bagian hubungan dengan Pegunungan Tengah Papua, sedangkan di permukaan membentuk lembah yang berbentuk huruf U. Mulai dari sesar naik, di bagian timur laut daerah Ertsberg, perlipatan langsung menjadi landai. Beberapa patahan *strike-slip* tegak memotong perlapisan tersebut dengan arah tenggara-barat laut. Intrusi berukuran relatif kecil terdapat sebagai *stock*, retas, dan *silt* yang

terhampar sepanjang patahan-patahan utama atau pada perpotongannya. Batuan intrusif tersebut berkomposisi diorit sampai monzoit, berbutir sedang seragam sampai porforitik dengan *hornblende*, biotit, dan piroksin sebagai mineral mafik. Bijih tembaga berkadar tinggi terdapat dalam *skarn-xenofilik*, *skarn-contact*, dan *stockwork*. Mineral bijih tembaga yang utama adalah kalkopirit dan bornit, sedangkan emas terdapat sebagai inklusi di dalamnya.

Cebakan bijih Ertsberg terdiri atas skarn magnetik dengan bentuk menyerupai gigi yang arah luarnya dikelilingi secara berturut-turut oleh silikat gamping dan diorit. Seluruh skarn magnetik terbreksi dengan inklusi berbentuk menyudut dan berukuran halus sampai beberapa meter yang terdiri atas skarn silikat gamping, batuan beku, dan kalkopirit masif. Selain itu, terdapat banyak rongga dan gua yang dilapisi oleh kalsit, silika amorf, dan kalkopirit. Mineral bijih utama adalah kalkopirit dan bornit yang berasosiasi dengan galena, bismutit, kovelit, digenit, sfalerit, tembaga alami, perak alami, linnacit, dan tetrahedrit. Pada umumnya, sulfida-sulfida tersebut terdapat sebagai hamburan (*replacement*) foraminifera besar dan bidang perlapisan, blok sampai berdiameter 3 m, dan pengisian rongga. Emas berbutir halus terdapat di sepanjang batas bornit dengan kuarsa atau kalsit. Karakteristik Ertsberg adalah adanya skarn magnetik—sebagai pengganti skarn silikat-gamping yang terbentuk sebelumnya—dan batuan intrusif. Keseluruhan bentuk dan ukuran skarn silikat-gamping dan skarn foraminifera besar dolomitan ini tertelan (*stope*) oleh intrusi dioritik.

Cebakan bijih Ertsberg Timur terdapat di sekitar 1,5 km sebelah timur endapan skarn senolitik Ertsberg. Cebakan ini berupa endapan yang terbentuk di antara batugamping kelompok Papua, terutama dari formasi Faumai dan intrusi dioritik Ertsberg Timur. Berdasarkan kepentingan penambangan, kompleks Ertsberg Timur dibagi menjadi tiga zona, yaitu zona bijih atas (Gunung Bijih Timur, GBT), tengah

(*Intermediate Ore Zone*, IOZ) dan dalam (*Deep Ore Zone*, DOZ). Mineral tembaga utama adalah bornit dan sedikit kalkopirit dengan mineral ikutan idaite, kalkosit, kovelit, galena, pirit, sfalerit, pirargit, dan malkasit. Emas terdapat sebagai inklusi dalam sulfida tembaga, kalsit, dan serpentin. Dalam zona GBT, sulfida tembaga terdapat sebagai sebaran dalam antar-ruang mineral silikat-gamping, isian dalam retakan dan rongga, dan urat. Bentuk mineralisasi tembaga lebih intensif lagi di sepanjang breksi patahan sentuh dengan batu gamping yang termarmirkan. Di zona DOZ dan sebagian zona IOZ, zona bijih utamanya ialah di sepanjang breksi patahan sentuh yang telah digantikan oleh skarn magnetik. Mineral tembaga terdapat sebagai sebaran dalam antar-ruang mineral magnetit, dan urat yang sering kali hampir murni/masif.

Cebakan bijih Dom sama seperti endapan skarn bentuk lainnya, tetapi mineralogi bijihnya mempunyai banyak persamaan dengan endapan Ertsberg. Pada bidang datar, bentuk tubuh bijih seperti segi-tiga yang di bagian tengahnya diterobos oleh diorit tanpa adanya mineralisasi. Kompleks Dom juga mengalami breksiasi, mineral tembaga utamanya adalah kalkopirit, dengan digenit dan kovelit sebagai ubahan tepi (*alteration rim*). Mineral tembaga oksida terdiri atas malakhit, limonit pitch, dan delafosit (fenorit). Dalam skarn garnet, mineral tembaga terdapat sebagai sebaran, isian retakan dan rongga serta bagian tepi garnet yang terbentuk kemudian. Dalam skarn magnetik yang menggantikan breksi patahan sentuh dan skarn silikat-gamping, terdapat sebagai isian retakan dan rongga sebaran, dan penggantian foraminifera besar serta bidang perlapisan. Elektrum dan jejak (*trace*) emas murni hanya terdapat dalam jumlah kecil sebagai inklusi dalam sulfida tembaga. Zona yang teroksidasi supergen terdapat di bagian atas dan terbentuk lapisan tipis ke bawah yang mengikuti struktur.

Cebakan bijih Cu-Au porfiri Grasberg terbatas dalam zona silifikasi berbentuk *stockwork* di dalam diorit Grasberg yang telah

mengalami ubahan potasik. Tubuh bijih hanya 10% dari keseluruhan luas permukaan diorit Grasberg dan terletak sedikit di luar pusatnya. Tubuh bijih yang berbentuk silinder mencapai kedalaman sekitar 800 m dari permukaan, sedangkan bentuk datarnya menyerupai tapal kuda. Diorit Grasberg menerobos batugamping formasi Ainot dan Faumai yang terlipat kuat. Beberapa intrusi kecil kemudian terbentuk, seperti penyumbat (*plug*) yang tampak serupa diorit Grasberg, tetapi komposisi mineral dan ubahannya tidak sama. Sikwens ubahan hidrotermal pada kompleks diorit Grasberg merupakan ciri khas endapan tembaga yang kaya dengan emas, yakni adanya silifikasi potasik, propolitik, dan deuterik. Mineral sulfida terdiri atas pirit, kalkopirit, bornit, digerit dan kovelit. Kalkopirit terdapat di sebagai isian retakan dan urat yang kadang-kadang hampir murni dalam *stockwork* kwarsit. Di tempat yang lebih dalam, digenit dan kovelit terdapat sebagai ubahan tepi di sekeliling kalkopirit.

## 5. Mineral Logam Emas dan Perak

Berdasarkan konsep endapan emas *epitermal*, keterdapatannya cebakan emas primer berkaitan erat dengan jalur gunung api, terutama sepanjang jalur gunung tua. Cebakan emas *epitermal* pada umumnya berkadar emas tidak tinggi (kurang dari 6 gram/ton), tetapi mencakup daerah yang luas. Jika ditelusuri lebih lanjut, jalur endapan emas *epitermal* di Indonesia yang dikenal dengan sebutan *volcanic hosted epitermal gold deposit*, mulai dari Sumatra, Jawa, Nusa Tenggara, Maluku, hingga Sulawesi Utara. Emas di Indonesia juga terdapat di gunung api tua Kalimantan, sementara emas di Papua merupakan kelanjutan jalur emas *epitermal* Papua Nugini (Simatupang & Sigit, 1991).

Para ahli menemukan indikasi adanya emas *epitermal* pada batuan sedimen yang kaya akan karbon (*carbon rich sediment*). Kondisi tersebut terjadi karena larutan hidrotermal yang dibawa batuan gunung

api akan melepaskan emas, lalu tertangkap oleh karbon yang telah membentuk lingkungan yang memungkinkan terbentuknya endapan emas sekunder. Contohnya, di Kalimantan terdapat tiga jalur gunung api tua yang disebut *volcanic corridor*, membentang dari Singkawang, Matau (Ketapang), dan pegunungan Meratus. Umur batuan vulkanik pembawa emas di Kalimantan relatif tua (kala Miosen). Emas semula berada di kedalaman kurang lebih 200 meter, tetapi kemudian tersingkap ke permukaan akibat erosi. Bekas-bekas gunung api tua, terutama berbentuk kaldera, merupakan indikasi pertama terdapatnya bijih emas.

Cebakan emas primer di Indonesia yang telah ditambang ada di Sumatra Utara (Muara Sipongi), Sumatra Barat (Mangani), Bengkulu (Lebong Donok, Rejang Lebong), Jawa Barat (Cikotok, Pongkor), Jawa Timur (Pacitan), Nusa Tenggara, Sulawesi, dan Papua. Sementara itu, endapan emas sekunder di Indonesia terdapat di Aceh, Lampung, Sulawesi (Bombana, Logas, Woyla, Monterado), dan Kalimantan (Kahayan, Mahakam, Kutai, Martapura, dan Kandilo).

## 6. Mineral Logam Kromit dan Pasir Besi

Potensi endapan kromit ditemukan di bagian timur Indonesia, yaitu di Sulawesi Selatan dan Sulawesi Tenggara. Pada umumnya, endapan kromit yang ditemukan berupa lensa-lensa kecil atau lapisan-lapisan yang tersebar dalam batuan peridotit, *piroxene dunite*, dan *harsburgit*. Di daerah Timor (Atapupu), kromit ditemukan sebagai blok-blok lepas di permukaan (Simatupang & Sigit, 1991). Indikasi endapan sejenis juga terdapat di Sungai Tami dan Pegunungan Siklop, Papua. Potensi lainnya ditemukan di daerah Halmahera, Kepala Burung sebelah barat, dan Pulau Gebe. Potensi ini berkaitan dengan batuan ultramafik terisolasi sebagai bagian dari rangkaian *ophiolite belt*. Potensi cadangannya relatif kecil-kecil—yang paling besar sekitar 700.000 ton—sehingga cocok untuk tambang skala kecil.



Potensi endapan pasir besi umumnya terdapat di sepanjang pantai barat Sumatra (Bengkulu, Sumatra Barat, dan Aceh). Sementara itu, potensi endapan pasir besi di Jawa tersebar di pantai selatan Jawa (Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur). Endapan pasir besi merupakan endapan aluvial pantai (*branding deposit*) yang terdiri atas ilmenite dan magnetit yang berasosiasi dengan titanium yang merupakan mineral pengganggu.

#### **D. SEBARAN MINERAL NONLOGAM DAN BATUAN**

Mineral nonlogam dan batuan tersebar luas di seluruh wilayah Indonesia. Secara geologi, mineral bukan logam dan batuan ini terdapat dalam semua formasi batuan, mulai dari yang berumur Pra-Tersier sampai dengan Kuartar, terutama pada batuan beku dan batuan sedimen. Berdasarkan cara terbentuknya, mineral bukan logam dan batuan dapat dibedakan menjadi tujuh kelompok, yaitu batuan sedimen, batuan gunung api, batuan ultrabasa, batuan plutonik, batuan metamorf, batuan yang terkena proses hidrotermal, dan batuan yang terbentuk karena residu.

Kelompok batuan sedimen dibagi menjadi dua bagian, yakni batu gamping dan batuan sedimen lainnya. Kelompok batu gamping mencakup marmer, dolomit, kalsit, batu keprus, fosfat, onik, rijang, dan gipsum. Endapan batu gamping di Indonesia terdapat di Gresik, Tuban, Lamongan, Bojonegoro (Jawa Timur), Pati, Cilacap, Indarung (Sumatra Barat), Pangkajene (Sulawesi Selatan), Kupang (Nusa Tenggara Timur), dan tempat-tempat lainnya (Simatupang & Sigit, 1991). Kelompok batuan sedimen lainnya adalah bentonit, *ball clay*, *fire clay*, zeolit, feldspar, yodium, dan diatomea. Kelompok ini erat kaitannya dengan pengendapan batuan sedimen tersier dan piroklastik berbutir halus bersifat riolitik yang terdapat di lingkungan lekustrin sampai neritik. Di Indonesia, kondisi tersebut terdapat di wilayah cekungan batu bara, minyak dan gas bumi serta cekungan tersier lainnya di

Sumatra, Jawa, Kalimantan, dan Papua. Selain terdapat di daerah cekungan minyak dan gas bumi di Palembang (Sumatra Selatan), bentonit juga dijumpai di daerah pengendapan sedimen tersier, misalnya di Nanggung Bogor (Jawa Barat), Boyolali (Jawa Tengah), Pacitan (Jawa Timur), dan Tasikmalaya (Jawa Barat). *Ball clay* dan *bond clay* di Indonesia terdapat di daerah cekungan batu bara bagian bawah, yaitu di Ombilin (Sumatra Barat); Cisaat, Sukabumi (Jawa Barat); Sambiroto, Rembang (Jawa Tengah); dan Monterado (Kalimantan Barat). *Fire clay* terbentuk karena tanah (*soil*) tertimbun sedimen lain di daratan atau cekungan lakustrin atau delta yang mengandung batu bara. Di Indonesia, *fire clay* terdapat di Cicarucug (Jawa Barat) dan Binuang (Kalimantan Selatan) (Simatupang & Sigit, 1991).

Kelompok batuan gunung api erat kaitannya dengan aktivitas gunung api. Seperti diketahui, kegiatan gunung api menghasilkan material lepas bersifat asam sampai basa, berukuran halus (debu) sampai berukuran bongkah, yang berasal dari magma. Bahan-bahan ini setelah melalui proses geologi tertentu akan menghasilkan berbagai jenis bahan, seperti perlit, obsidian, batu apung, belerang, trakit, opal, kalsedon, tufa, tras, kayu terkarsikkan, pasir gunung api, andesit, dan basal. Perlit dan obsidian berkaitan dengan rangkaian gunung api berumur tersier hingga kuartar, seperti di Lampung dan Ciamis (Jawa Barat). Batu apung di Indonesia berkaitan dengan rangkaian gunung api kuartar muda, seperti di Serang dan Sukabumi (Jawa Barat) serta Lombok (Nusa Tenggara barat). Belerang terbentuk berkaitan dengan kegiatan gunung api seperti sulfatara dan fumarola, atau gas-gas dan larutan yang mengandung belerang yang keluar dari dalam bumi. Batuan trakit di Indonesia terdapat di Gunung Muria (Jawa Tengah) dan daerah Danau Toba (Sumatra Utara) dalam bentuk tufa yang berkomposisi riolit-dasitik. Kayu terkarsikkan di Indonesia terdapat di daerah Muara Enim (Sumatra Selatan) serta Jampang dan Garut Selatan (Jawa Barat). Opal terdapat di larutan silika koloid yang berasal

dari batuan piroklastik. Di Indonesia, opal dijumpai di daerah Rangkasbitung (Jawa Barat). Kalsedon adalah variasi silika yang terbentuk dari pengendapan berlapis larutan silika koloid tidak jenuh dalam rongga dan celah-celah batuan perangkap. Lokasi potensial kalsedon terdapat di daerah Sukabumi, Tasikmalaya, Garut (Jawa Barat), dan Pacitan (Jawa Timur). Tras terjadi jika rempah gunung api, khususnya yang berkomposisi andesitik, mengalami pelapukan tertentu. Lokasi yang cukup potensial di Indonesia adalah di Lembang, Nagrek, dan Cicurug (Jawa Barat), serta Situbondo (Jawa Timur). Andesit dan basal adalah batuan beku luar yang terjadi akibat pembekuan magma *intermediate* sampai basa. Sebaran batuan ini di Indonesia cukup luas dan mengikuti rangkaian pegunungan dari Sumatra, Jawa, Bali, Nusa Tenggara Barat, Nusa Tenggara Timur, Sulawesi, Maluku, hingga Papua. Pasir gunung api merupakan bahan-bahan lepas berukuran pasir yang dimuntahkan pada waktu letusan gunung api. Sebaran pasir gunung api di Indonesia berkaitan dengan rangkaian gunung api dari Sumatra, Jawa, Bali, NTB, NTT, Sulawesi, hingga Maluku (Simatupang & Sigit, 1991).

Kelompok batuan plutonik (misalnya asam granit dan grano-diorit) terjadi dari proses pembekuan magma yang bersifat asam. Bentuk intrusinya dapat berupa siil, korok, ataupun batolit. Warna batumannya beraneka ragam tergantung komposisi mineral pembentuk batumannya, misalnya merah hati, merah bata, merah muda, abu-abu muda, atau putih ke abu-abuan. Kelompok ini ditemukan di daerah Pulau Karimun dan Pulau Bulan (Riau Kepulauan), Pulau Bangka dan Belitung (Sumatra Selatan), Singkawang dan Ketapang (Kalimantan Barat). Feldspar berkaitan erat dengan daerah sebaran batuan granit pegmatit. Di Indonesia, feldspar ditemukan di Gunung Buduk, Sanggau (Kalimantan Barat), Rikit Gabib dan Kendawai (Aceh), Lampung, dan Sumatra Selatan. Kelompok mika (muskovit dan flogopit) terbentuk pada tahap akhir proses pembekuan magma yang kekentalannya

rendah dan bersifat asam. Di Indonesia, kelompok ini ditemukan di Sulawesi Tengah dan Pangaribuan, Tapanuli Utara.

Kelompok batuan plutonik ultra basa (misalnya Gabro dan Peridotit) terjadi karena proses pembekuan magma bersifat ultrabasa dan berwarna gelap dari kehijauan hingga hitam legam. Batuan ini di Indonesia tersebar di Sulawesi, Kalimantan, Halmahera, Timor, hingga Irian. Asbes adalah kelompok mineral berserabut yang terdiri atas mineral krisotil, krokidorit, amosit, antofilit, tremolit, dan aktinolit. Asbes terbentuk akibat proses metamorf (serpentinisasi) batuan yang berkomposisi basa hingga ultrabasa, seperti gabro, peridotit, dan dunit. Di Indonesia, penyebaran asbes berkaitan erat dengan sebaran batuan basa dan ultrabasa. Di Indonesia, asbes ditemukan di daerah Halmahera, Sulawesi, Timor, dan Papua.

Kelompok ubahan hidrotermal (toseki, pirofilit, kaolin, dan barit) terbentuk karena proses hidrotermal dari sumber yang sama. Kelompok ini merupakan hasil proses ubahan hidrotermal batuan vulkanik yang berkomposisi kalk-alkalin andesitik, dasitik, dan riodasitik. Proses tersebut dapat berlangsung dengan adanya berbagai faktor pendukung, misalnya komposisi larutan hidrotermal, temperatur, porositas dan permeabilitas batuan sampling serta salinitas. Kondisi yang berbeda dapat menyebabkan pembentukan kelompok mineral ubahan yang berbeda pula sehingga terbentuklah zonasi. Toseki, kaolin, dan pirofilit pada umumnya terbentuk pada zona ubahan filik dan argilit lanjut. Kelompok ini di Indonesia dijumpai di Pacitan, Trenggalek, Malang Selatan, dan Blitar (Suyartono, 2003).

## **E. KOMODITAS MINERAL ANDALAN INDONESIA**

Pertambangan mineral dan batu bara sebagaimana dimaksud Peraturan Menteri No. 08 Tahun 2012 merupakan pelaksanaan dari Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 24 Tahun 2010 tentang Pelaksanaan Kegiatan Usaha Pertambangan Mineral dan Batubara.

Usaha pertambangan mineral dan batu bara dapat dikelompokkan ke dalam lima golongan sebagai berikut.

- (1) Mineral radioaktif, yakni mineral yang mengandung radioaktif, misalnya radium, thorium, uranium, monasit, dan mineral radioaktif lainnya;
- (2) Mineral logam, yakni mineral yang mengandung unsur logam, seperti emas, tembaga, perak, timbal, seng, timah, nikel, platina, bauksit, dan mineral logam lainnya;
- (3) Mineral bukan logam, yaitu intan, korundum, grafit, pasir kuarsa, belerang, fosfat, asbes, talk, mika, magnesit, *ball clay*, *fire clay*, zeolit, kaolin, feldspar, bentonit, gipsum, dolomit, kalsit, kuarsit, zirkon, dan mineral bukan logam lainnya;
- (4) Batuan pumice, tras, toseki, obsidian, marmer, perlit, tanah diatome, tanah serap (*fullers earth*), granit, granodiorit, andesit, gabro, peridotit, basalt, batu apung, opal, kalsedon, kristal kuarsa, jasper, krisoprase, batu gamping, dan batuan lainnya;
- (5) Batu bara, misalnya bitumen padat, batuan aspal, batu bara, dan gambut.

Dari lima kelompok bahan tambang tersebut, komoditas tambang andalan Indonesia didominasi oleh mineral logam. Terdapat delapan jenis mineral logam, yaitu bijih timah, nikel, bauksit, tembaga, emas, perak, mangan, pasir besi serta komoditas minyak bumi dan batu bara. Hampir semua jenis komoditas tambang tersebut diekspor. Pada dekade 1980-an, produk timah (87,89%), tembaga berbentuk konsentrat (97–100%), nikel dalam kondisi mentah (72–89%) diekspor dan sisanya diolah menjadi ferro nikel (100%) yang juga diekspor. Nilai ekspor nikel sejak tahun 2006 hingga 2014 (dalam bentuk *ore* maupun *mate*) berfluktuasi, tetapi secara keseluruhan cenderung naik. Setelah UU No. 4 Tahun 2009 diberlakukan, pendapatan negara dari nilai ekspor nikel meningkat secara tajam (Pemerintah Republik Indonesia, 2009). Bauksit dan mangan hampir seluruhnya diekspor dalam bentuk

bijih. Bahan tambang bukan logam dan batuan pada umumnya lebih banyak dimanfaatkan di dalam negeri. Meskipun bahan tambang bukan logam dan batuan tidak menjadi komoditas andalan Indonesia, peranannya cukup berarti dalam kehidupan pertambangan, terutama mendukung kegiatan ekonomi di dalam negeri (Sudradjat, 1999).

## F. DAMPAK EKSPLOITASI SUMBER DAYA MINERAL YANG TAK TERKENDALI

Pada masa lalu, sumber daya mineral logam ditambang dan diekspor dalam kondisi mentah (Gambar 6). Kalaupun masih diperlukan pengolahan (benefisiasi), dilakukan secara sederhana, misalnya reduksi ukuran atau pencucian ala kadarnya untuk meningkatkan kualitas. Kegiatan ekspor dalam kondisi mentah ini merugikan dalam hal perolehan devisa negara.



Sumber: Tim Kajian Tambang LIPI (2011)

**Gambar 6.** Penambangan mineral logam di laut dan di darat diekspor masih dalam kondisi mentah.

Selain merugikan dalam hal perolehan devisa, terjadi pemborosan sumber daya mineral. Hal ini karena terbawanya mineral-mineral ikutan ketika dilakukan ekspor dan berpotensi menyebabkan degradasi lingkungan. Mineral bukan logam dan batuan pada umumnya lebih banyak dimanfaatkan di dalam negeri. Meskipun tidak sepenting mineral logam, mineral bukan logam dan batuan cukup berarti dalam mendukung kegiatan ekonomi dalam negeri. Namun, hal yang sangat memprihatinkan adalah impor bahan baku industri nasional masih berlangsung sehingga menurunkan daya saing produk dalam negeri.

Penurunan daya saing terjadi karena harga produk yang mahal akibat pajak impor dan kontinuitas produk yang sangat bergantung kepada pihak luar. Dampak turunannya adalah terkurasnya devisa negara untuk penguatan struktur ekonomi, peningkatan sumber daya manusia, dan pembiayaan impor bahan baku industri nasional yang seharusnya dapat dikelola di dalam negeri (Suyartono, 2003). Pengelolaan sumber daya hendaknya dapat dilakukan secara baik dan benar (*good mining practice*) dengan melakukan konservasi dan memberikan nilai tambah melalui benefisiasi mineral agar nilai sumber daya dapat berlipat ganda (Rosana, 2017; Suyartono, 2003).

Meskipun Indonesia kaya akan sumber daya mineral dan energi, pemanfaatan dan pengelolaannya masih belum dilakukan secara baik dan benar serta berkelanjutan (Rosana, 2017). Pembangunan berkelanjutan adalah proses pembangunan yang prinsipnya memenuhi kebutuhan saat ini tanpa mengorbankan kebutuhan generasi masa depan. Tantangannya adalah bagaimana memperbaiki kerusakan lingkungan tanpa mengorbankan kebutuhan pembangunan ekonomi dan keadilan sosial. Dalam arti geologi, pembangunan berkelanjutan berkaitan erat dengan cara untuk memajukan ekonomi jangka panjang tanpa menghabiskan sumber daya alam. Dalam konteks ini, yang menjadi permasalahan adalah sumber daya alam (non-hayati) yang terbatas dan pada umumnya tidak dapat diperbarui (*unrenewable*

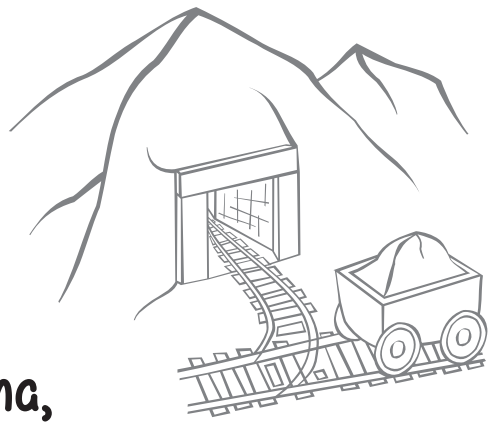
*resources*), misalnya batuan, mineral, batu bara, dan energi. Semuanya merupakan sumber daya alam yang berkontribusi besar terhadap pertumbuhan ekonomi dan pembangunan infrastruktur di Indonesia. Dengan demikian, pemanfaatan sumber daya hendaknya dilakukan secara efektif dan efisien.





# BAB II

## Perubahan Paradigma, Konservasi, dan Nilai Tambah



### A. PERUBAHAN PARADIGMA

Paradigma eksplorasi sebelum tahun 2009 masih bersifat ekstraktif dan bertujuan mencari dan menemukan sumber daya mineral untuk dieksploitasi dan diekstraksi guna meningkatkan pendapatan negara. Pada era tersebut terjadi penemuan cadangan beragam jenis dan komoditas pertambangan, misalnya emas, tembaga, nikel, bauksit, bijih besi, dan batu bara, sehingga disebut *era mining boom*. Di satu sisi, penemuan deposit sumber daya mineral yang diikuti penambangan secara besar-besaran membawa dampak signifikan terhadap perkembangan perekonomian dan pembangunan. Di sisi lain, terjadi degradasi lingkungan dan menipisnya jumlah cadangan sehingga menyisakan cadangan marginal. Kondisi ini sebagai akibat dari eksploitasi yang tidak terkendali (Rosana, 2017). Oleh karena itu, paradigma eksplorasi harus diubah, dari paradigma eksplorasi yang bersifat ekstraktif menjadi paradigma eksplorasi konservatif, seperti diilustrasikan pada Gambar 7.

Paradigma eksplorasi konservatif lebih menekankan pada optimalisasi pemanfaatan sumber daya mineral untuk memberikan keuntungan demi pembangunan berkelanjutan yang berfokus pada pertumbuhan (*pro-growth*), mengurangi kemiskinan (*pro-poverty*), memberikan lapangan kerja (*pro-job*), dan memperhatikan keseimbangan lingkungan (*pro-environment*). Pada paradigma eksplorasi konservatif, masih dimungkinkan ekstraksi dalam eksplorasi sumber daya alam. Hal ini guna memenuhi kebutuhan sehari-hari, pembangunan, dan pertumbuhan perekonomian. Namun, diperlukan penilaian yang sangat cermat dalam manajemen pemanfaatan dan pengelolannya (Rosana, 2017).

Perubahan paradigma eksplorasi memang sudah seharusnya diikuti perubahan dari paradigma benefisiasi menjadi paradigma rekayasa benefisiasi sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 7. Benefisiasi dapat diartikan sebagai pemrosesan mineral secara menguntungkan. Artinya, pemrosesan mineral bertujuan meningkatkan kualitas (kadar) unsur mineral tertentu sehingga menjadi laku dijual (memenuhi kebutuhan pasar dunia) dan mengurangi jumlah berat pengotor. Rekayasa benefisiasi adalah benefisiasi mineral yang dilakukan dengan melibatkan teknologi rekayasa. Hal ini mengandung pengertian bahwa pemrosesan mineral dilakukan melalui formulasi bahan baku dengan menambahkan sejumlah bahan aditif untuk menghasilkan material baru. Dalam konteks ini, tidak dilakukan ekstraksi atau pemurnian terlebih dahulu, tetapi langsung dilakukan pemrosesan untuk menghasilkan material baru yang disebut material fungsional. Jadi, pemanfaatan sumber daya mineral menjadi lebih efektif dan efisien (Sudradjat, 1999).

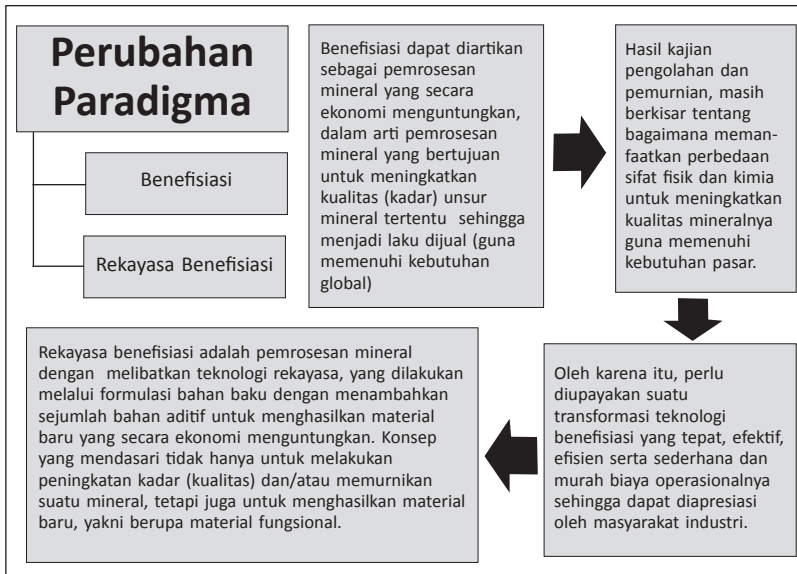


Sumber: Rosana (2017)

**Gambar 7.** Diagram Perubahan Paradigma Eksplorasi (dari paradigma eksplorasi ekstraktif ke paradigma eksplorasi konservatif)

Sebagaimana diamanatkan undang-undang, peningkatan nilai tambah sumber daya mineral dapat dilakukan melalui pengolahan dan pemurnian. Teknologi benefisiasi (Gambar 8) mencakup pengolahan dan pemurnian—yang secara ekonomi menguntungkan—serta berperan dalam peningkatan nilai tambah mineral tahap I (menghasilkan produk antara). Sementara itu, untuk peningkatan nilai tambah mineral tahap II (menghasilkan produk akhir), perlu dilakukan pemrosesan mineral lebih lanjut. Beberapa hasil kajian pengolahan dan pemurnian yang dilakukan di dalam negeri dan negara berkembang lainnya masih berkisar tentang cara memanfaatkan perbedaan sifat fisik dan kimia untuk meningkatkan kualitas mineral dalam rangka memenuhi persyaratan ekspor (Kelly & Spottiswood, 1982; Gaudin, 1971). Berbagai jenis sifat fisik dan kimia yang dimaksud adalah perbedaan ukuran partikel, berat jenis, kemagnetan, kelistrikan, dan perubahan sifat-sifat permukaan mineral (Kelly & Spottiswood, 1982).

Peningkatan nilai tambah mineral logam berharga lebih mudah dilaksanakan oleh pihak industri pertambangan berskala besar yang memang mempunyai sumber daya manusia dan modal yang besar. Peningkatan nilai tambah dapat dilakukan dengan mengadopsi teknologi benefisiasi, baik dilakukan sendiri maupun bekerja sama dengan pihak lain. Peningkatan nilai tambah mineral bukan logam dan batuan pada umumnya dikelola oleh industri pertambangan skala kecil dengan sumber daya manusia dan modal yang terbatas. Akibatnya, peningkatan nilai tambah menjadi relatif lebih sulit direalisasikan. Hal yang sama terjadi pada sumber daya marginal (sumber daya mineral yang tidak dilirik atau terabaikan karena kuantitas dan kualitasnya rendah), misalnya mineral ikutan produksi pertambangan. Oleh karena itu, perlu diupayakan suatu transformasi teknologi benefisiasi mineral yang tepat, sederhana, dan murah biaya operasionalnya sehingga dapat diapresiasi oleh masyarakat industri (Agustinus, 2016; Agustinus & Sembiring, 2014).



**Gambar 8.** Diagram Perubahan Paradigma Benefisiasi Menuju Rekayasa Benefisiasi

## B. KONSERVASI DAN NILAI TAMBAH

Konservasi adalah pengelolaan bahan tambang secara baik untuk mencegah eksploitasi tak terkendali, kerusakan, dan degradasi lingkungan. Konservasi juga dapat diartikan sebagai kegiatan memperoleh manfaat dari bahan tambang, tetapi pada saat yang sama mencegah penggunaan barang tambang secara berlebihan yang dapat menyebabkan kerusakan atau degradasi lingkungan. Konservasi bertujuan menjaga keseimbangan ekologi (lingkungan) yang mendukung kehidupan; melestarikan berbagai bahan tambang yang sangat langka dan menjadi bagian dari warisan sejarah bumi; menjadikan sumber daya tersedia untuk saat ini dan generasi mendatang; dan menjamin kelangsungan hidup bagi umat manusia.

Kebijakan pengelolaan sumber daya mineral sebagai bagian dari konservasi difokuskan pada (i) Pendataan sumber daya dan cadangan mineral serta batu bara sesuai dengan ketentuan yang berlaku, juga pendataan sumber daya dan cadangan mineral dan batu bara yang tidak tertambang serta sisa pengolahan dan pemurnian; (ii) Upaya optimalisasi manfaat dan minimalisasi dampak negatif usaha pertambangan serta pengendalian produksi yang bertujuan memenuhi ketentuan aspek lingkungan, melakukan konservasi sumber daya mineral dan batu bara, mengendalikan stabilitas harga mineral dan batu bara dan memenuhi pasokan kebutuhan mineral dan batu bara dalam negeri; (iii) Penggunaan metode dan teknologi pengolahan dan pemurnian yang efektif dan efisien; (iv) Pengelolaan dan pemanfaatan cadangan marginal, yakni cadangan yang terabaikan karena kualitas dan kuantitasnya relatif rendah, misalnya mineral kadar rendah dan mineral ikutan serta batu bara kualitas rendah; (v) Mengurangi pemakaian sumber daya mineral yang tidak terkendali, menjaga kelestarian fungsi lingkungan, dan membudayakan *re-cycle* serta *re-use* bahan-bahan tambang (Rosana, 2017).

Pemerintah Indonesia mengeluarkan kebijakan tentang peningkatan nilai tambah yang diamanatkan melalui Undang-Undang Republik Indonesia No. 4 Tahun 2009. Pelaksanaan peningkatan nilai tambah lebih lanjut diatur dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 24 Tahun 2010a tentang Pelaksanaan Kegiatan Usaha Pertambangan Mineral dan Batu bara (Pemerintah Republik Indonesia, 2010a) serta Peraturan Menteri Energi Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No. 08 Tahun 2012 tentang Peningkatan Nilai Tambah Mineral melalui Kegiatan Pengolahan dan Pemurnian (Pemerintah Republik Indonesia, 2012b). Peningkatan nilai tambah pada intinya untuk mencegah ekspor mineral dalam kondisi mentah dan memutus mata rantai impor bahan baku industri berbasis mineral melalui pengolahan dan pemurnian mineral di dalam negeri.

Nilai tambah diartikan sebagai pertambahan nilai mineral dari hasil suatu proses yang dilakukan terhadap mineral tersebut. Peningkatan nilai tambah adalah peningkatan nilai mineral sehingga menghasilkan manfaat ekonomi, sosial, dan budaya (Ardha dkk., 2011; Suprpto, Handayani, & Wahyudi, 2007). Sebagaimana diamanatkan dalam Undang-Undang (Pemerintah Republik Indonesia, 2009), kegiatan usaha pertambangan mineral dan batu bara mempunyai peranan penting dalam memberikan nilai tambah secara nyata terhadap pertumbuhan ekonomi nasional dan pembangunan daerah secara berkelanjutan. Pengembangan dan peningkatan nilai tambah dan manfaat kegiatan usaha pertambangan ini hendaknya dilakukan secara optimal agar kebutuhan bahan baku industri berbasis mineral dalam negeri terpenuhi.

Undang-Undang (Pemerintah Republik Indonesia, 2009) mengamanatkan peningkatan nilai tambah mineral logam, mineral bukan logam, batuan, dan batu bara serta menegaskan pelarangan ekspor bahan tambang dalam kondisi mentah ke luar negeri sejak 2014. Dasar

diberlakukannya peraturan tersebut adalah kondisi ekspor mineral bijih yang meningkat pada 2008–2011. Pada periode tersebut, ekspor bijih nikel meningkat 8 kali lipat, ekspor bijih tembaga 11 kali lipat, dan ekspor bijih bauksit meningkat sebesar 5 kali lipat. Kondisi ini tidak memicu perkembangan sektor hilir industri pertambangan. Namun, bila dilaksanakan peningkatan nilai tambah, keuntungan nilai ekspor beberapa komoditas akan berlipat ganda. Sebagai ilustrasi, bijih nikel, setelah dilakukan proses nilai tambah menjadi FeNi, nilainya meningkat sebesar 437 kali lipat. Sementara itu, bijih besi nilainya meningkat menjadi 6 kali lipat. Sehubungan dengan hal tersebut, pemerintah menerbitkan Inpres Nomor 3 Tahun 2013 tentang Percepatan peningkatan Nilai Tambah Mineral melalui kegiatan pengolahan dan pemurnian di dalam negeri.

Peningkatan nilai tambah mineral di dalam negeri juga dilakukan untuk mencegah keanekaragaman mineral ikutan yang terkandung di dalam bijih ikut terbawa ketika dilakukan ekspor dalam kondisi mentah. Hal ini sekaligus akan meningkatkan nilai jual dari mineral itu sendiri dan berujung pada penambahan devisa negara. Dengan menyediakan bahan baku industri berbasis mineral di dalam negeri, akan membuka peluang kerja bagi penduduk Indonesia. Hal ini secara otomatis akan meningkatkan kesejahteraan masyarakat, meningkatkan perekonomian bangsa, dan menjadikan Indonesia sebagai negara industri yang mandiri.

Guna mengambil langkah-langkah yang diperlukan secara terkoordinasi dan terintegrasi, disusunlah konsep dan strategi peningkatan nilai tambah mineral. Konsep dan strategi ini disusun dengan memperhatikan elemen-elemen penting, yaitu koordinasi dan sinkronisasi kebijakan, peningkatan pelayanan dan percepatan perizinan serta peningkatan efektivitas pembinaan dan pengawasan pelaksanaan kebijakan dalam rangka percepatan peningkatan nilai tambah mineral.

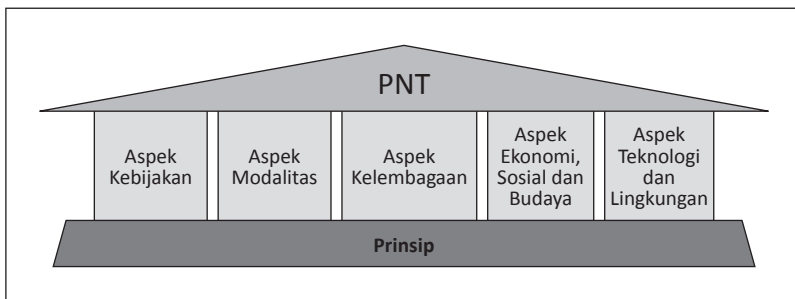


## C. KONSEP PENINGKATAN NILAI TAMBAH MINERAL

Konsep peningkatan nilai tambah mineral dan batuan pada prinsipnya dibangun dengan lima pilar, yaitu aspek kebijakan; aspek modalitas; aspek kelembagaan; aspek ekonomi, sosial, dan budaya serta aspek teknologi dan lingkungan. Kelima pilar tersebut dilandasi oleh prinsip kemandirian seperti diilustrasikan pada Gambar 9.

### 1. Aspek Kebijakan

Aspek kebijakan pemerintah dalam hal peningkatan nilai tambah mineral tercantum dalam Undang-Undang (Pemerintah Republik Indonesia, 2009) tentang Pertambangan Mineral dan Batu bara. Pelaksanaan undang-undang tersebut diatur dalam Peraturan Pemerintah (PP) No. 23 Tahun 2010 (Pemerintah Republik Indonesia, 2010a) tentang Pelaksanaan Kegiatan Usaha Pertambangan Mineral dan Batu bara. Peraturan Pemerintah tersebut telah diubah menjadi PP No. 24 Tahun 2010 (Pemerintah Republik Indonesia, 2010a) dan implementasinya diatur dalam Peraturan Menteri Energi Sumber Daya Mineral Nomor 7 Tahun 2012 tentang Peningkatan Nilai Tambah Mineral melalui Kegiatan Pengolahan dan Pemurnian Mineral. Kemudian, peraturan ini diubah dengan hadirnya Peraturan Menteri Energi Sumber Daya Mineral Nomor 11 Tahun 2012 (Pemerintah Republik Indonesia, 2012b). Peraturan perundang-undangan dan perubahan



Gambar 9. Diagram Konsep Peningkatan Nilai Tambah Mineral

peraturan turunannya tersebut digunakan sebagai landasan hukum pelaksanaan peningkatan nilai tambah mineral.

## 2. Aspek Modalitas

Aspek modalitas didukung oleh tiga faktor, yaitu faktor sumber daya mineral dan batuan, sumber daya manusia, dan sumber modal. Faktor sumber daya mineral dan batuan merupakan objek dari peningkatan nilai tambah itu sendiri. Faktor sumber daya manusia merupakan subjek (pelaku) yang melaksanakan peningkatan nilai tambah. Sumber modal adalah finansial yang dibutuhkan untuk pelaksanaan peningkatan nilai tambah.

Indonesia dikenal mempunyai potensi sumber daya mineral yang beraneka ragam, tetapi penyebarannya tidak merata, seperti tidak meratanya penyebaran batuan. Paling tidak, terdapat delapan jenis mineral logam andalan Indonesia, yaitu timah, nikel, bauksit, tembaga, emas, perak, mangan, pasir besi serta komoditas minyak bumi dan batu bara. Hampir semua jenis bahan tambang tersebut diekspor. Sebagai gambaran, pada dekade 1980-an, produk timah (87,89%), tembaga berbentuk konsentrat (97–100%), nikel dalam kondisi mentah (72–89%) diekspor dan sisanya diolah menjadi ferro nikel (100%) juga diekspor.

Bahan tambang bukan logam dan batuan pada umumnya dimanfaatkan di dalam negeri. Meskipun bahan tambang bukan logam dan batuan tidak sepenting mineral andalan, peranannya cukup berarti dalam kehidupan pertambangan, terutama untuk mendukung kegiatan ekonomi dalam negeri. Berdasarkan sumbernya, mineral bukan logam terbagi menjadi tujuh kelompok, yakni kelompok yang berasal dari batuan sedimen (batu gamping, fosfat, *clay*, diatome), batuan gunung api (perlit, tuf, obsidian), batuan ultrabasa (peridotit, gabro), batuan plutonik (granit, feldspar), batuan metamorf (marmer, batu sabak, grafit dan kalsit), batuan yang terkena panas hidrotermal

(kaolin, toseki, pirofilit, talk, gipsum), dan batuan yang terbentuk karena proses residual (pasir, pasir kuarsa, dan pasir batu).

Sumber daya manusia merupakan pelaku yang mempunyai teknologi. Meskipun jumlah penduduk Indonesia mencapai 200 juta orang, hanya kurang dari 1% yang bergerak dalam bidang pertambangan. Kondisi tersebut sudah termasuk pertambangan yang sangat sederhana dan dapat dikategorikan sebagai kegiatan gali-menggali. Dari 1% jumlah penduduk tersebut, lebih dari 75% berpendidikan SD, bahkan ada pula yang tidak bersekolah. Kualitas sumber daya manusia perlu ditingkatkan untuk mendukung peningkatan nilai tambah mineral (batuan). Untuk memenuhi kebutuhan keahlian di bidang pengembangan sumber daya mineral, didirikan jurusan geologi dan tambang di berbagai perguruan tinggi, baik perguruan tinggi negeri maupun swasta (Sudradjat, 1999).

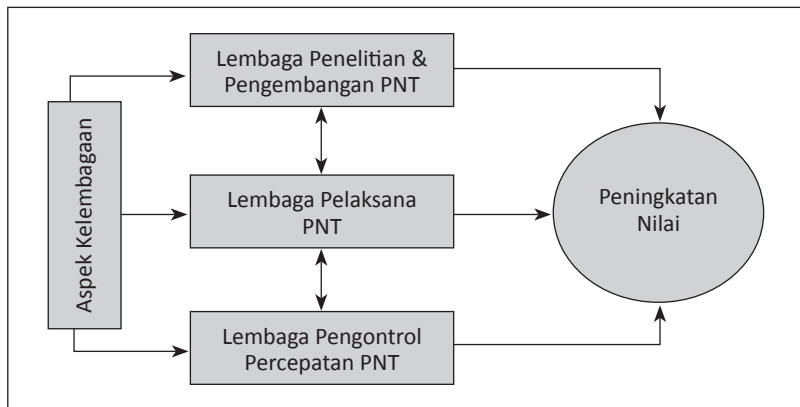
Sumber modal adalah dana yang diperlukan untuk melaksanakan peningkatan nilai tambah. Besarnya bervariasi, tergantung pada kondisi pertambangan itu sendiri. Perusahaan pertambangan skala besar dapat mengambil sumber modal dari laba perusahaan. Dana tersebut dapat dianggap sebagai dana hilang atau penebus risiko. Namun, perusahaan skala menengah dan kecil akan sulit untuk mengalokasikan sumber modal untuk peningkatan nilai tambah karena dananya sangat terbatas.

### **3. Aspek Kelembagaan**

Tinjauan aspek kelembagaan membahas lembaga yang wajib melaksanakan peningkatan nilai tambah, lembaga yang bekerja sama dengan pelaksana peningkatan nilai tambah, dan lembaga yang mengontrol percepatan peningkatan nilai tambah. Korelasi antar-lembaga tersebut dalam kerangka peningkatan nilai tambah diilustrasikan pada Gambar 10.

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 23 Tahun 2010 pasal (93 dan 94) ayat (1) menyatakan bahwa Pemegang IUP serta IUPK Operasi Produksi mineral dan batu bara wajib melakukan pengolahan dan pemurnian untuk meningkatkan nilai tambah mineral dan batu bara yang diproduksi, baik secara langsung maupun melalui kerja sama dengan perusahaan, pemegang IUP, dan IUPK lainnya. Perusahaan, sebagaimana dimaksud pada ayat (1), telah mendapatkan IUP Operasi Produksi khusus untuk pengolahan dan pemurnian. Selanjutnya, IUP Operasi Produksi khusus untuk pengolahan dan pemurnian sebagaimana dimaksud pada ayat (2), diberikan oleh menteri, gubernur, bupati dan atau walikota sesuai kewenangannya.

Peningkatan nilai tambah dalam kegiatan usaha pertambangan mineral batuan, dan batu bara ditujukan untuk melaksanakan kebijakan dalam mengutamakan penggunaan mineral, batuan, dan batu bara untuk kepentingan dalam negeri. Hal tersebut dapat dilakukan melalui kerja sama penelitian dan pengembangan dalam pengolahan dan atau pemurnian. Pemegang IUP Operasi Produksi, IUPK Operasi Produksi, atau IUP Operasi Produksi khusus untuk pengolahan dan



**Gambar 10.** Diagram Alir Korelasi antara Aspek Kelembagaan dan PNT

atau pemurnian dapat melakukan kerja sama dengan mengutamakan kepentingan nasional. Kerja sama penelitian dan pengembangan ini dapat dilakukan dengan (1) lembaga penelitian dan pengembangan pada kementerian yang menyelenggarakan urusan pemerintahan di bidang pertambangan mineral; (2) lembaga penelitian dan pengembangan independen yang kompeten; dan atau (3) perguruan tinggi negeri dan swasta. Penelitian dan pengembangan dalam kerangka pengolahan dan atau pemurnian meliputi kegiatan sebagai berikut.

- (a) Pemecahan masalah dan efisiensi proses;
- (b) Validasi teknologi baru dan belum teruji;
- (c) Penguasaan teknologi, alih teknologi, dan teknologi;
- (d) Kelayakan tekno-ekonomi.

Dalam rangka mempercepat pelaksanaan peningkatan nilai tambah, pemerintah (dalam hal ini Presiden) menerbitkan Instruksi Presiden No. 3 Tahun 2013 tentang Percepatan Peningkatan Nilai Tambah Mineral melalui Pengolahan dan Pemurnian di dalam Negeri. Inpres tersebut ditandatangani oleh Presiden pada 13 Februari 2013 ditujukan bagi delapan menteri, para gubernur serta bupati dan atau walikota. Kedelapan menteri itu adalah Menko Perekonomian, Menteri ESDM, Menteri Perindustrian, Menteri Perdagangan, Menteri Keuangan, Menteri Dalam Negeri, Menteri BUMN, dan Menteri Lingkungan Hidup. Menteri ESDM diinstruksikan untuk menyediakan data dan informasi terkini mengenai potensi dan sebaran cadangan bijih mineral melalui laman resmi. Selain itu, ia juga diperintahkan memfasilitasi penyediaan energi untuk kegiatan pengolahan dan pemurnian, menetapkan kebijakan kewajiban pemenuhan kebutuhan bijih atau konsentrat untuk kegiatan pengolahan dan pemurnian, menetapkan kebijakan kewajiban pemenuhan dalam negeri hasil pengolahan dan pemurnian mineral tertentu untuk kebutuhan di sektor perindustrian, melakukan evaluasi terhadap peraturan perundang-undangan di bidang mineral yang menghambat upaya percepatan

peningkatan nilai tambah mineral melalui proses pengolahan dan pemurnian di dalam negeri. Sementara itu, Menteri Perindustrian diminta menyusun peta arahan (*roadmap*) industri yang berbasis mineral. Menteri Perdagangan diminta menetapkan kebijakan di bidang ekspor, impor, dan perdagangan dalam negeri untuk menjamin ketersediaan pasokan, pengadaan, dan kelancaran distribusi bahan baku, bahan penolong, dan barang modal kebutuhan pengolahan dan pemurnian mineral. Menteri Keuangan diminta menetapkan kebijakan di bidang fiskal dalam rangka mendorong kegiatan pengolahan dan pemurnian mineral. Menteri Dalam Negeri diminta melakukan pembinaan dan pengawasan serta evaluasi terhadap kebijakan perizinan oleh pemerintah daerah dalam rangka percepatan pembangunan pengolahan dan pemurnian mineral dan atau infrastrukturnya. Menteri BUMN diminta mendorong BUMN membangun pengolahan dan pemurnian mineral di dalam negeri, menetapkan prioritas usulan tambahan penyertaan modal negara kepada BUMN yang membangun pengolahan dan pemurnian mineral di dalam negeri, dan mendorong BUMN guna penyediaan energi dalam rangka mendukung pembangunan pengolahan dan pemurnian mineral di dalam negeri. Menteri Lingkungan Hidup diminta melakukan evaluasi peraturan perundang-undangan di bidang lingkungan hidup yang menghambat upaya percepatan peningkatan nilai tambah mineral melalui pengolahan dan pemurnian di dalam negeri. Sementara itu, Menko Perekonomian diminta mengoordinasikan pelaksanaan evaluasi kebijakan yang menghambat pembangunan pengolahan dan pemurnian mineral, menetapkan langkah-langkah kebijakan mempercepat peningkatan nilai tambah mineral melalui pengolahan dan pemurnian di dalam negeri, mengatur kewenangan pembinaan industri pengolahan dan pemurnian mineral dalam negeri, pelaksanaan Inpres dan melaporkan kepada Presiden minimal satu kali dalam enam bulan.

Para gubernur diinstruksikan melakukan pembinaan dan pengawasan terhadap pemda kabupaten/kota dalam rangka mendukung pembangunan pengolahan dan pemurnian mineral serta infrastrukturnya. Para kepala daerah juga diperintahkan mempercepat proses pemberian izin atau rekomendasi pembangunan pengolahan dan pemurnian mineral dan infrastrukturnya. Sementara itu, para bupati atau wali kota bertugas mempercepat proses pemberian izin atau rekomendasi dalam rangka pembangunan pengolahan dan pemurnian mineral dan infrastrukturnya serta memberikan dukungan dan fasilitas.

Dalam memacu percepatan nilai tambah, dilakukan seminar tentang pelaksanaan peningkatan nilai tambah mineral di dalam negeri oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada 10–11 April 2013. Seminar dihadiri oleh wakil dari kementerian terkait, para gubernur, bupati dan walikota, para kepala dinas pertambangan dan energi, dan para kepala dinas perindustrian. Akademisi dari berbagai universitas di Indonesia, pakar pertambangan, ketua asosiasi pengusaha pertambangan mineral, dan para pemegang IUP mineral di Indonesia pun hadir dalam seminar tersebut.

Dari seminar tersebut, para peserta mendapatkan:

- (1) Kejelasan terkait kebijakan pemerintah yang mendukung terlaksananya peningkatan nilai tambah mineral di dalam negeri.
- (2) Data mutakhir perusahaan yang telah melakukan proses pembangunan fasilitas pengolahan dan pemurnian.
- (3) Informasi tentang kemajuan pembangunan fasilitas pengolahan dan pemurnian yang telah dilaksanakan.
- (4) Informasi tentang teknologi pengolahan dan pemurnian yang diimplementasikan oleh perusahaan di Indonesia.

#### 4. Aspek Ekonomi, Sosial, dan Budaya

Aspek ekonomi, sosial, dan budaya dalam peningkatan nilai tambah merupakan satu kesatuan tak terpisahkan yang perlu dipertimbangkan. Hal ini karena peningkatan nilai tambah bukan hanya untuk memperoleh laba yang sebesar-besarnya, melainkan juga untuk mengangkat kesejahteraan sosial dan budaya masyarakat sekitarnya.

Pengelolaan sumber daya mineral Indonesia dilakukan untuk sebesar-besarnya kemakmuran rakyat. Pengejawantahannya dengan pengembangan komunitas (*community development*) di sekitar lokasi pertambangan yang merasakan pengaruhnya dalam kehidupan sehari-hari. Oleh karena itu, perusahaan pertambangan berkewajiban mengembangkan wilayah sekitar daerah pertambangannya, dan hal ini berkaitan erat dengan pemuliaan sumber daya manusia.

#### 5. Aspek Teknologi dan Lingkungan

Tinjauan terhadap aspek teknologi dan lingkungan dalam peningkatan nilai tambah mencakup teknologi pengolahan dan pemurnian. Teknologi berkembang terus sehingga limbah (*tailing*) pemrosesan mineral yang sekarang merupakan sisa pengolahan, mungkin suatu saat dapat diolah kembali. Jumlah mineral yang dapat diambil (*recovery*) meningkat terus, dan sumber daya mineral berkadarnya rendah yang sekarang tidak ekonomis, pada waktu yang akan datang dapat menjadi ekonomis. Teknologi pengolahan dan pemurnian pada umumnya tidak banyak mengalami perubahan dan masih memanfaatkan sifat fisik serta kimia mineral (batuan). Teknologi pemrosesan mineral kini sudah menggunakan metode biologi, yakni memanfaatkan mikroorganisme sebagai media pemrosesannya. Sebagai contoh, pengolahan bijih emas, logam dasar, dan batu bara menggunakan bakteri dalam proses pelarutannya (*leaching*). Konsep dasarnya adalah bakteri memakan unsur logam tertentu, seperti Cu, dalam pelarutan mineral. Beberapa



jenis bakteri juga mengeluarkan enzim yang mampu mengurai rantai hidrokarbon menjadi unsur yang lebih sederhana. Kondisi tersebut diterapkan dalam pemrosesan limbah cair organik (fenolik).

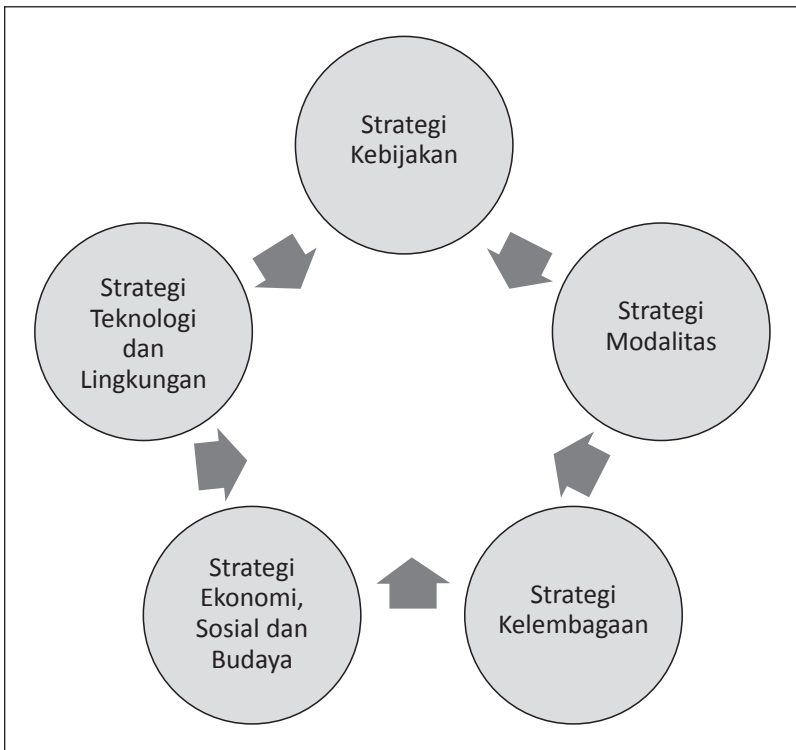
Dihadapkan pada kesadaran umat manusia terhadap lingkungan, produk mineral Indonesia harus dapat memenuhi berbagai pembakuan lingkungan agar diterima pasar. Sebagai ilustrasi, untuk mendapatkan sertifikasi yang menyatakan bahwa kegiatan yang dilakukan telah mengikuti standar pengelolaan lingkungan, diperlukan audit lingkungan. Audit lingkungan dilakukan untuk mengantisipasi dampak negatif pertambangan. Sebenarnya, antisipasi dampak negatif pertambangan telah diatur dalam perangkat peraturan perundangan. Peraturan perundangan tersebut tidak hanya menghindari, menekan, dan meminimalkan (mitigasi) dampak negatif, tetapi juga mengoptimalkan dampak positif pertambangan. Peraturan perundangan tersebut adalah Undang-Undang No. 23 Tahun 1997 dan Peraturan Pemerintah No. 51 Tahun 1993. Secara garis besar pengelolaan lingkungan hidup mencakup pemanfaatan, pengaturan, pengawasan, pengendalian, pemulihan, dan pengembangan. Jadi, sebelum melakukan suatu kegiatan (misalnya pertambangan), harus dibuat studi atau telaah mengenai lingkungan yang disebut Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL), diikuti dengan Rencana Pengelolaan Lingkungan dan Rencana Pemantauan Lingkungan.

## **6. Prinsip Kemandirian**

Pertambahan nilai mineral erat kaitannya dengan prinsip kemandirian. Apabila industri di dalam negeri dapat memanfaatkan semua aspek dalam peningkatan nilai tambah mineral, Indonesia dapat memenuhi berbagai kebutuhan tanpa tergantung pada pihak lain. Itulah yang dimaksud dengan prinsip kemandirian. Dalam prinsip kemandirian, saling memerlukan adalah hal yang wajar, tetapi tidak tergantung pada yang lainnya (Sudradjat, 1999).

#### D. STRATEGI PENINGKATAN NILAI TAMBAH MINERAL

Strategi peningkatan nilai tambah mineral tentunya terkait dengan aspek kebijakan; aspek modalitas; aspek kelembagaan; aspek ekonomi, sosial, dan budaya serta aspek teknologi dan lingkungan. Oleh karena itu, strategi yang dilakukan disebut strategi kebijakan; strategi modalitas; strategi kelembagaan; strategi ekonomi, sosial, dan budaya serta strategi teknologi dan lingkungan. Keterkaitan strategi-strategi tersebut diilustrasikan pada Gambar 11.



**Gambar 11.** Diagram Strategi Peningkatan Nilai Tambah Mineral

## 1. Strategi Kebijakan

Strategi kebijakan peningkatan nilai tambah mineral terkait erat dengan permasalahan ekspor dan impor mineral. Di satu sisi, Indonesia mengeksport bijih mineral logam dalam kondisi mentah. Di sisi lain, Indonesia mengimpor bahan baku industri berbasis mineral. Untuk mengatasinya, pemerintah mengeluarkan kebijakan pelarangan ekspor bahan tambang dalam kondisi mentah, terutama bijih mineral logam. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengolahan dan pemurnian di dalam negeri. Strategi kebijakan yang dilakukan pemerintah adalah hilirisasi industri mineral, terutama mineral logam. Melalui strategi tersebut, diharapkan kebutuhan bahan baku industri berbasis mineral di dalam negeri terpenuhi. Sebagai konsekuensi dari strategi tersebut, pemerintah perlu menyediakan energi listrik untuk memenuhi kebutuhan *smelter* dan infrastruktur, misalnya sarana transportasi, jalan, dan sebagainya.

## 2. Strategi Modalitas

Seluruh sumber daya mineral (mineral logam, bukan logam, dan batuan) merupakan modal dasar yang sudah seharusnya diberikan nilai tambah sehingga dapat digunakan sebagai bahan baku industri lainnya. Sumber daya manusia Indonesia cukup melimpah, hanya saja perlu ditingkatkan kualitasnya melalui pendidikan formal dan nonformal. Kedua jenis sumber daya tersebut merupakan kekuatan yang mengantarkan menuju kesejahteraan.

Dalam pembangunan industri berbasis mineral, sinergi pertambangan dan perindustrian menjadi sangat penting. Pembangunan industri berbasis mineral tidak hanya terhenti di industri dasar pertambangan, tetapi juga harus dilanjutkan dan difokuskan pada industri hilir yang memanfaatkan logam sebagai bahan bakunya. Hilirisasi industri berbasis mineral logam sudah mulai berjalan di Kawasan Industri Morowali, kawasan yang menjadi contoh hilirisasi sektor

pertambangan. Di daerah Halmahera Timur akan dibangun kawasan industri nikel oleh Inalum. Hilirisasi industri berbasis mineral logam difokuskan pada empat kelompok industri, yaitu besi baja, aluminium, nikel, dan tembaga.

### 3. Strategi Kelembagaan

Usaha pertambangan mineral logam dikuasai oleh perusahaan pertambangan berskala menengah hingga besar. Perusahaan tersebut mempunyai modal besar sehingga relatif mampu melaksanakan peningkatan nilai tambah, baik dilakukan sendiri maupun melalui kerja sama dengan pihak lainnya. Namun, perusahaan-perusahaan tersebut masih menghadapi masalah ketersediaan energi yang sangat diperlukan dalam proses peleburan. Oleh karena itu, pemerintah harus memfasilitasi kebutuhan energi tersebut.

Berbeda dengan usaha pertambangan mineral logam, usaha pertambangan mineral bukan logam dan batuan dikuasai oleh perusahaan pertambangan berskala kecil hingga menengah. Perusahaan-perusahaan tersebut tidak memiliki dana yang besar sehingga tidak dapat memanfaatkan teknologi pengolahan untuk menyediakan bahan baku industri berbasis mineral. Oleh karena itu, persoalan golongan komoditas tambang untuk mineral bukan logam dan batuan perlu segera diupayakan jalan keluarnya.

### 4. Strategi Ekonomi, Sosial, dan Budaya

Nilai tambah menggunakan parameter ekonomi sebagai acuan, yakni perbedaan antara nilai *output* dan nilai *input* atau peningkatan harga material yang dihasilkan dari proses pengolahan mineral dan logam per satuan berat logam+mineral. Proses *added value* mineral tidak terlepas dari alur proses pengolahan dan ekstraksi bahan galian bijih yang cukup lama dikenal dalam kegiatan industri metalurgi. Masing-

masing tahap pemrosesan tersebut akan meningkatkan kualitas produk yang dihasilkan atau meningkatkan nilai tambah. Meskipun hanya pengolahan mineral yang sangat sederhana, seperti pencucian dan pengayakan (*screening*) pada mineral aluvial, dimungkinkan terjadinya peningkatan nilai tambah. Sebagai gambaran, pengurangan kandungan *clay* dan mineral berharga terkonsentrasi pada fraksi ukuran tertentu akan meningkatkan nilai tambah hasil konsentrasi. Peran *sampling* dan analisis sangat menentukan dalam merancang langkah-langkah pengolahan mineral yang tepat. Proses ekstraksi lebih lanjut—yang melibatkan proses kimia dan atau suhu tinggi—pada umumnya memerlukan investasi yang besar sehingga perlu dipertimbangkan keekonomiannya apabila skala produksinya tidak cukup tinggi.

Pengertian nilai tambah juga dikaitkan dengan kepentingan lain yang lebih luas. Kepentingan tersebut bukan saja peningkatan ekonomi, tetapi juga peningkatan lapangan kerja baru, *multiplier effect* sektor lain, penguasaan iptek, kemudahan dan kecepatan proses, serta peningkatan ketahanan nasional. Kebutuhan untuk meningkatkan pendapatan daerah maupun pusat, meningkatkan kesempatan kerja, mendorong terciptanya peluang usaha di sektor lain, meningkatkan penguasaan ilmu dan teknologi, mengurangi ketergantungan luar negeri dalam penyediaan bahan baku untuk industri hilir—yang bahan dasarnya tersedia sebagai bahan tambang di Indonesia—dirasakan sangat mendesak. Untuk itu, pemerintah melarang ekspor bahan tambang secara langsung ke luar negeri karena hanya memberikan manfaat yang besar pada pihak pengimpor (dari melakukan usaha peningkatan nilai tambah di negaranya), sedangkan Indonesia hanya mendapatkan penghasilan dari penjualan bahan tambang. Namun, usaha peningkatan nilai tambah hasil tambang di Indonesia menghadapi beberapa kendala, yaitu belum terbangunnya kesadaran akan manfaat dan pentingnya usaha peningkatan nilai tambah bahan tambang di dalam negeri di semua pemangku kepentingan. Hal tersebut

disebabkan belum adanya kajian yang komprehensif mengenai rantai kebutuhan dan penyediaan bahan untuk produksi barang jadi di Indonesia. Selain itu, kajian mengenai peluang dilakukannya peningkatan nilai terhadap bahan tambang di Indonesia pun masih sangat minim.

## 5. Strategi Teknologi dan Lingkungan

Salah satu strategi yang ditawarkan dalam upaya peningkatan nilai tambah cadangan marginal adalah rekayasa benefisi. Sumber daya cadangan marginal dalam konteks ini dapat diartikan sebagai sumber daya mineral, baik mineral bukan logam maupun batuan, termasuk mineral ikutan dan *gangue mineral* dari suatu aktivitas pertambangan mineral dan batu bara serta panas bumi (*amorphous silica, rare earth*) yang ketika itu masih belum terpikirkan untuk dimanfaatkan bagi kehidupan manusia. Belum diperhatikannya cadangan marginal tersebut karena memang potensinya, baik dari segi kualitas maupun kuantitasnya relatif rendah, dan saat itu belum ada kajian teknologi proses yang ekonomis sehingga cadangan mineral tersebut dianggap tidak berharga.



# BAB III

## Benefisiasi untuk Meningkatkan Nilai Tambah Mineral

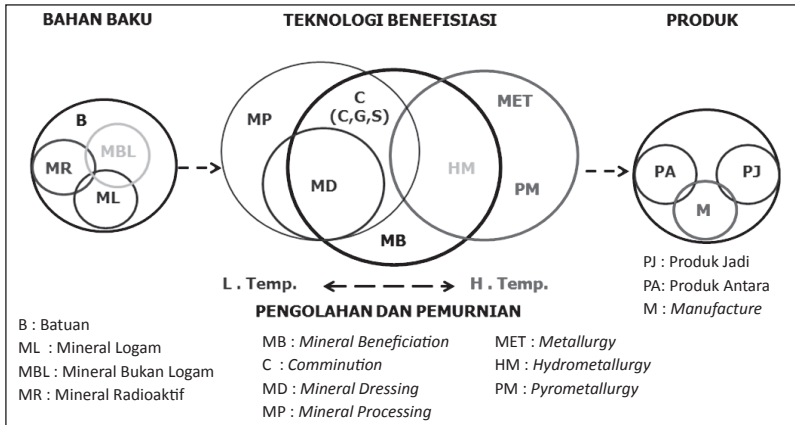


### A. TEKNOLOGI BENEFISIASI

Dalam meningkatkan nilai tambah mineral, teknologi benefisiasi berperan sebagai strategi meningkatkan kadar dan atau pemurnian mineral. Bahan baku yang meliputi mineral logam, mineral bukan logam, dan batuan menjadi objek dari peningkatan nilai tambah. Korelasi antara sumber daya mineral sebagai bahan baku dan teknologi benefisiasi sebagai proses peningkatan nilai tambah dan produk yang dihasilkannya, baik berupa produk antara maupun produk jadi (Pemerintah Republik Indonesia, 2009), diilustrasikan pada Gambar 12.

Kedudukan benefisiasi dalam rantai ekonomi industri pengolahan-pertambangan mineral dalam rangka peningkatan nilai tambah (*added value*) diilustrasikan pada Tabel 1. Secara umum, seluruh aktivitas hulu industri pertambangan yang meliputi eksplorasi dan eksploitasi mineral dikategorikan sebagai industri primer, sedangkan aktivitas hilir dari industri pengolahan dikategorikan sebagai industri sekunder.





**Gambar 12.** Diagram Korelasi antara Bahan Baku, Teknologi Proses, dan Produk

Peningkatan nilai tambah (tahap I) dilakukan melalui pengolahan dan pemurnian mineral dengan memanfaatkan sifat fisik dan kimia komponen materialnya sehingga menghasilkan produk antara. Produk antara adalah produk dari hasil pengolahan dan atau pemurnian mineral yang dapat meningkatkan kualitas bahan baku industri berbasis mineral sehingga memenuhi prasyarat ekspor. Pengolahan dan pemurnian pada umumnya dilakukan dengan memanfaatkan perbedaan sifat fisik dan kimia komponen mineralnya. Sifat fisik meliputi ukuran butir, berat jenis, sifat kemagnetan dan kelistrikan serta sifat permukaan mineralnya. Sifat kimia mineral meliputi perbedaan komposisi kimia mineral, kelompok mineral sulfida, dan kelompok mineral oksida. Peningkatan nilai tambah (tahap II) dilakukan melalui proses lanjut untuk menghasilkan produk akhir. Produk akhir adalah produk antara yang telah diproses lebih lanjut menjadi produk jadi yang sesuai dengan tujuan penggunaannya, misalnya untuk pembuatan blok mesin, produk elektronik, sabun, obat, semen, partisi, keramik, dan batu permata.

Pengolahan mineral logam dengan cara pemisahan, ekstraksi, dan pemurnian menghasilkan paduan logam dan atau bahan baku industri.

**Tabel 1.** Benefisiasi dalam Rantai Ekonomi Industri Pengolahan Pertambangan

INDUSTRI PRIMER		INDUSTRI SEKUNDER	
Industri Pertambangan Mineral		Industri Pengolahan	
Aktivitas Hulu Industri Mineral	Aktivitas Hilir Industri Mineral	Industri Hilir	
Pertambangan	PNT. Tahap I	PNT. Tahap II	
<b>Eksplorasi</b> menghasilkan potensi cadangan mineral logam	<b>Eksplorasi</b> menghasilkan mineral logam (bijih)	<b>Pengolahan dan Pemurnian</b> pemisahan, ekstraksi, pemurnian menghasilkan produk antara berupa logam dasar, bahan baku industri	<b>Proses Lanjut</b> menghasilkan produk akhir berupa logam dasar, blok mesin, produk elektronik
<b>Eksplorasi</b> menghasilkan potensi cadangan mineral bukan logam	<b>Eksplorasi</b> menghasilkan mineral bukan logam	<b>Pengolahan dan Pemurnian</b> penggerusan, pencampuran peningkatan menghasilkan produk antara berupa bahan baku industri berbentuk tepung ( <i>powder</i> ), <i>pellet</i> , dan lain-lain	<b>Proses Lanjut</b> menghasilkan produk akhir berupa bahan kimia, bahan farmasi, dan bahan konstruksi (semen, partisi dan keramik)
<b>Eksplorasi</b> menghasilkan potensi cadangan batuan	<b>Eksplorasi</b> menghasilkan batuan	<b>Pengolahan</b> pemecahan, penggerusan, pengelompokan ukuran dan atau pemotongan, pemolesan menghasilkan produk antara berupa bahan konstruksi bangunan	<b>Proses Lanjut</b> menghasilkan produk akhir berupa <i>artworks construction</i> dan batu permata

Melalui proses selanjutnya, diperoleh produk akhir, seperti produk buatan pabrik, blok mesin, dan produk elektronik. Pengolahan mineral bukan logam dilakukan melalui proses penggerusan, pencampuran, dan peningkatan menghasilkan produk antara berupa bahan baku industri berbentuk tepung atau *pellet* yang dapat digunakan sebagai bahan katalis dan pengisi. Setelah melalui proses selanjutnya, diperoleh produk akhir berupa aneka bahan kimia, farmasi, dan konstruksi. Sementara itu, dari proses pemecahan, penggerusan, dan pemisahan berdasarkan ukuran, diperoleh produk antara berupa bahan konstruksi bangunan. Melalui proses pemotongan dan pemolesan, diperoleh produk akhir berupa *artworks construction* (konstruksi hasil seni).

Dengan demikian, terdapat hubungan yang setara antara benefisiasi dan peningkatan nilai tambah. Namun, nilai tambah mempunyai pengertian yang lebih luas, yakni sebagai pemberdayaan masyarakat. Proses pengolahan dan pemurnian tersebut secara ekonomi memang kurang menguntungkan, tetapi memberikan kesempatan kerja dan peluang berusaha bagi masyarakat. Hal tersebut dapat diartikan sebagai pemberian nilai tambah juga.

## **B. KAJIAN PEMROSESAN MINERAL DI INDONESIA**

Pemrosesan untuk peningkatan nilai tambah mineral pada umumnya dilakukan melalui pengolahan dan pemurnian. Pengolahan didefinisikan sebagai pemrosesan mineral dengan memanfaatkan perbedaan sifat fisik dan kimia komponen mineralnya agar mineral berharga dapat dipisahkan dari mineral yang tidak berharga (*tailing*). Pemurnian adalah pemisahan mineral (logam) berharga dari suatu konsentrat terhadap material pengotornya. Benefisiasi merupakan pengolahan dan atau pemurnian mineral (logam) yang secara ekonomi menguntungkan. Kriteria ekonomi dalam benefisiasi mineral adalah jika biaya pengolahan atau pemurnian mineral dapat dilampaui oleh harga jual produk. Dalam industri pertambangan, ada yang disebut sebagai kualifi-

tas minimum yang harus dipenuhi dari setiap produk yang dihasilkan. Namun, pertimbangan ekonomi (dan kadang-kadang pertimbangan politik) juga tak bisa diabaikan, kecuali jika mineral berharga (bijih) tanpa pengolahan mempunyai harga produk yang melampaui biaya operasional (biaya pertambangan, transportasi, penjualan, dan biaya yang dikeluarkan dalam memenuhi regulasi lingkungan). Praktik demikian telah dilakukan di Indonesia pada periode sebelum 1970, sebagaimana telah dijelaskan pada bab sebelumnya.

Pengolahan dan pemurnian dalam industri pertambangan merupakan tahapan yang penting untuk meningkatkan kualitas produk tambang. Mineral (bijih) melalui benefisiasi dapat dipisahkan menjadi dua komponen, yakni komponen mineral (logam) berharga dan komponen mineral tidak berharga. Komponen mineral (logam) berharga adalah komponen yang memiliki nilai jual, sedangkan komponen mineral tidak berharga adalah komponen mineral yang tidak memiliki nilai jual atau sebagai mineral pengganggu/pengotor. Bijih kompleks adalah bijih yang mengandung lebih dari satu mineral logam berharga. Setiap mineral (bijih) adalah unik sehingga tidak ada prosedur standar untuk pengolahan dan pemurnian mineral (logam). Karena tubuh bijih yang unik, pengetahuan mineralogi suatu mineral (bijih) menjadi penting diketahui untuk perencanaan suatu pabrik pemrosesan.

Karakteristik bijih yang perlu diketahui, yaitu kadar bijih dalam bentuk mineral berharga dan kombinasi mineralnya, ukuran butir dan bentuk relatif mineral berharga dan mineral ikutannya, kehadiran *trace element* dalam *lattice* mineral berharga, dan terdapatnya sejumlah kecil potensi mineral berharga lainnya. Guna memperoleh karakteristik bijih, perlu dilakukan pengujian menggunakan mikroskop, *scanning electron magnetic* (SEM), *X-Ray defraction* (X-RD), *X-ray fluorescence spectrometry* (X-RF), dan lainnya. Tanpa melakukan pengujian mineral, tidaklah mungkin menentukan perencanaan pengolahan mineral dengan baik, seperti dalam reduksi ukuran partikel maupun dalam proses pemisahan mineral.

Aspek-aspek penting sebagai bahan pertimbangan dalam perencanaan pengolahan dan pemurnian mineral, yaitu karakteristik ukuran partikel, proses reduksi ukuran partikel, proses pemisahan mineral berharga dari mineral yang tidak berharga melalui proses pemisahan dan proses klasifikasi, pengurangan kadar air, dan pengangkutan material, bagan alir dan kesetimbangan material serta proses metalurgi. Karakteristik ukuran partikel dalam pemrosesan mineral menjadi penting untuk diketahui. Hal ini karena selain diperlukan sebagai pengontrol dalam proses mereduksi ukuran, karakteristik ukuran partikel juga diperlukan dalam peningkatan luas permukaan, peningkatan kecepatan reaksi dalam proses pelarutan, dan derajat bebas mineral berharga terhadap mineral lainnya. Dalam pemisahan bijih menjadi fraksi mineral yang berharga dan fraksi mineral tidak berharga, derajat pembebasan butiran mineral berharga dari butiran mineral tidak berharga (derajat liberasi) menjadi hal yang penting. Derajat liberasi adalah persentase partikel yang hanya mengandung mineral berharga (partikel bebas) dari sejumlah mineral yang ada. Partikel yang mengandung lebih dari dua jenis mineral (mineral berharga dan mineral yang tidak berharga) disebut *locked* atau partikel menengah, meliputi ukuran setiap partikel dan ukuran rata-rata semua partikel, bentuk partikel mineral. Sementara itu, mineral yang rusak terdiri atas partikel yang bentuknya di deskripsikan tidak beraturan atau tidak dapat didefinisikan secara akurat. Mengukur setiap partikel secara individual merupakan hal yang tidak praktis. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis ukuran dengan membagi partikel menjadi beberapa fraksi ukuran partikel. Pada umumnya, ukuran partikel dinyatakan dalam bentuk persentase distribusi ukuran partikel. Persentase distribusi ukuran partikel ini biasanya disajikan dalam bentuk grafik yang menunjukkan hubungan antara jumlah partikel dan ukuran partikel. Dalam sejumlah kasus, bentuk partikel menjadi lebih penting, misalnya pengaruh karakteristik terhadap luas permukaan, densitas, dan aliran (Simatupang & Sigit, 1991).

Guna menentukan karakteristik partikel, digunakan peralatan mikroskop dengan metode hitung dan sayatan poles. Namun, yang menjadi kendala adalah ketidakseragaman ukuran butir di bawah lensa mikroskop. Metode lainnya adalah dengan sedimentasi yang dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu *incremental* (penambahan) dan kumulatif. Ada pula sedimentasi sentrifugal dan foto sedimentometri yang dilakukan untuk ukuran partikel  $> 5 \mu\text{m}$ . Selain dengan mikroskop dan sedimentasi, menentukan karakteristik partikel juga bisa dengan elutriasi, metode *streaming*, permeabilitas, adsorpsi gas, penentuan luas area, analisis ukuran partikel, dan analisis kimia.

Mereduksi ukuran atau *comminution* adalah tahap penting dalam pemrosesan mineral. Hal ini dilakukan untuk memenuhi persyaratan ukuran dan bentuk produk, liberasi mineral berharga dari mineral tidak berharga melalui konsentrasi, dan meningkatkan luas permukaan dalam reaksi kimia. Mereduksi ukuran biasanya dilakukan dengan proses peremukan dan penggilingan. Contoh peralatan peremukan dan penggilingan adalah *jaw* dan *gyratory crushe* serta *tumbling grinding mill*. Peralatan tersebut dapat meremukkan dan menggiling bahan yang kering ataupun basah.

Pemisahan ukuran pada umumnya dilakukan berdasarkan tipe dasar ukuran. Sebagai contoh, saringan digunakan untuk pemisahan partikel kasar, sementara pemisah (classifier) digunakan untuk pemisahan partikel halus. Hasil pemisahan ukuran memiliki produk akhir yang spesifik. Dalam aplikasinya, yang terpenting untuk mengendalikan ukuran bahan sebagai umpan peralatan untuk tahap berikutnya. Hal ini karena semua peralatan memiliki ukuran optimal dari bahan yang dapat ditangani secara efisien.

Penyaringan dan pengayakan adalah proses pemisahan partikel yang dilakukan secara mekanis berdasarkan perbedaan ukuran. Penyaringan biasanya digunakan pada proses secara kontinu dan dipadukan dengan proses peremukan atau penggilingan. Penyaringan banyak

digunakan dalam skala industri, sedangkan pengayakan dilakukan secara eksklusif pada proses basah dalam skala laboratorium.

Klasifikasi (*classification*) merupakan pemisahan partikel berdasarkan kecepatan pengendapannya dalam sebuah fluida. Media air lazim digunakan dalam pemrosesan mineral, terutama untuk klasifikasi secara basah. Namun, dalam kondisi tertentu digunakan fluida lainnya, seperti udara. Meskipun digunakan untuk pemisahan partikel berdasarkan ukuran, densitas partikel, dan faktor-faktor lainnya, klasifikasi berpengaruh signifikan dalam pengoperasian alat. Sebagai contoh, menyortir lebih cepat dibandingkan memisahkan berdasarkan ukuran (*sizing*). Konsekuensi dari penggunaan klasifikasi dalam sejumlah situasi adalah (1) dapat dilakukan pemisahan fraksi ukuran partikel yang relatif kasar dari ukuran partikel yang relatif halus, pemisahan partikel halus menjadi lebih ekonomis; (2) konsentrasi partikel berat lebih kecil daripada partikel ringan; (3) distribusi pemisahan dalam fraksi ukuran mempunyai kisaran yang panjang; (4) membatasi distribusi properti partikel memasuki proses konsentrasi; dan (5) sebagai kontrol terhadap sirkuit tertutup dalam proses penggilingan. Beberapa jenis pemisah adalah pemisah mekanik, pemisah nonmekanik, pemisah sedimentasi, dan pemisah hidrolis.

Pemilihan metode pemisahan konsentrasi bergantung pada kondisi bijih dan karakteristik mineral yang hendak dipisahkan. Agar dapat dipisahkan, bijih perlu direduksi ukuran partikelnya sehingga mencapai tingkat liberasi yang telah ditentukan berdasarkan hasil pengujian sebelumnya. Secara umum, mineral dapat dipisahkan berdasarkan sifat fisik dan sifat kimia mineralnya. Sifat fisik yang biasa digunakan dalam proses pemisahan, yaitu warna, sifat permukaan yang terefleksi, tingkat radioaktif serta sifat kemagnitan dan konduktivitas. Metode pemisahan konsentrasi memanfaatkan perbedaan sifat-sifat tersebut dalam mineral yang hendak dipisahkan. Sifat kimia yang digunakan dalam proses pemisahan konsentrasi tergantung pada

metode pemrosesan mineral yang diterapkan, misalnya penggunaan sifat kimia permukaannya saja.

Pemisahan dengan konsentrasi gravitasi dilakukan dengan cara memanfaatkan perbedaan berat jenis komponen mineralnya. Di samping lebih murah biaya operasionalnya, kapasitas alatnya juga tinggi. Alat yang digunakan dalam pemisahan dengan konsentrasi gravitasi, yaitu *jig*, meja goyang (*shaking table*), dan konsentrasi hidrosiklon (*hydrocyclone concentrators*).

Pemisahan magnetik adalah pemisahan mineral dengan memanfaatkan perbedaan sifat suseptibilitas magnetik komponen mineralnya. Berdasarkan suseptibilitas magnetik, material dapat dikelompokkan menjadi material paramagnetik dan material diagenetik. Jenis peralatan dan aplikasi pemisahan magnetik untuk skala produksi, yaitu *trams removal* dan *cobbing*, alat pemisah magnetik intensitas rendah (*low intensity magnetic separatos*), sementara untuk skala laboratorium digunakan flokulasi magnetik (*magnetic flocculation*) dan metode pemisahan berdasarkan potensial magnetik (*potential magnetic separation method*).

Pemisahan elektrostatik adalah alat pemisahan mineral dengan memanfaatkan perbedaan sifat *high tension electrostatic* komponen mineralnya. Model ini digunakan untuk memisahkan mineral yang mempunyai konduktivitas tinggi (emas dan sulfida logam) dengan mineral-mineral yang mempunyai konduktivitas rendah, seperti mineral tidak berharga (*silicieus gangue*). Jenis peralatan dan aplikasi pemisahan elektrostatik adalah alat pemisah elektro-dinamik (*electrodynamic separators*), alat pemisah elektro-statik (*electrostatic separators*), dan peralatan elektrostatik lainnya.

Pemisahan flotasi (*Flotation separation*) adalah pemisahan mineral berdasarkan perbedaan kimia antarmuka (*interfacial chemistry*) partikel mineral dalam larutan. Pemisahan flotasi pada umumnya digunakan untuk pemisahan bijih kadar rendah dan mineral bukan



logam. Ukuran partikel mineral harus halus dan pada umumnya melalui proses penggerusan sehingga mineral yang dipisahkan benar-benar terliberasi sempurna. Pemisahan flotasi lazimnya menggunakan metode konsentrasi. Beberapa jenis peralatan flotasi adalah mesin flotasi mekanis (*mechanical flotation machines*), mesin flotasi pneumatik (*pneumatic flotation machines*), dan mesin flotasi skala laboratorium (*laboratory flotation machines*). Peralatan flotasi juga digunakan dalam proses flokulasi selektif, aglomerasi selektif, dan beberapa modifikasi proses flotasi lainnya.

Sedimentasi adalah proses pemindahan partikel padatan tersuspensi dari cairan (*liquid*) dengan cara pengendapan berdasarkan gravitasi. Pengoperasiannya dilakukan dengan *thickening* dan *clarification*. *Thickening* berfungsi meningkatkan konsentrasi padatan, sedangkan *clarification* berfungsi memindahkan padatan dari suatu *relatively dilute stream*. Beberapa jenis *thickening*, misalnya *cylindrical continuous thickeners*, *lamella thickeners*, dan *deep cone thickener*.

*Filtration* adalah pemisahan partikel solid dari suatu fluida dengan melewati fluida di mana solid berada melalui media penyaring. Beberapa jenis filter adalah *drum filters*, *disc filters*, *horizontal continuous vacuum filters*, dan *pressure filters*. *Dewatering* adalah proses menghilangkan atau mengurangi kadar air. *Dewatering* dapat dilakukan melalui pemisahan sentrifugal (*centrifugal separation*), tetapi cukup mahal. *Dewatering* secara unit dapat dilakukan dengan menggunakan *classifier*, *clarifier*, *thickener*, dan *filters*. Peralatan lainnya adalah sistem pengurangan kadar air mekanis (*mechanical dewatering system*) dan pengurangan kadar air melalui pemanasan (*thermal dewatering*).

Proses berikutnya dalam pengolahan bijih suatu logam berharga, yakni ekstraksi bijih. Proses ekstraksi bijih adalah pemurnian konsentrat hasil pengolahan mineral (bijih) sebelumnya. Pada umumnya, proses ini dapat dilakukan secara *pyrometallurgy* melalui proses

peleburan dan secara *hydrometallurgy*, misalnya *solid-liquid extraction* dan *liquid-liquid extraction*.

Aspek penting dalam pabrik pengolahan mineral, di antaranya bagan alir (*flow sheet*), *materials balanced*, dan *material handling*. Urutan prosesnya dalam pabrik pengolahan perlu diatur untuk menghasilkan produk yang terbaik dan biasanya digambarkan dalam sebuah bagan alir. Aspek penting lainnya adalah *material balance* atau analisis tentang bagaimana mendistribusikan (membagi dan atau menggabungkan) material pada setiap proses dalam bagan alir. Pengetahuan ini diperlukan untuk merancang bagan alir penelitian dan pembuatan pabrik pengolahan dengan prinsip *material balance*, di mana *input* sama dengan *output*.

Penanganan bahan artinya penanganan material yang meliputi transportasi dan penyimpanan material. Penanganan bahan merupakan fungsi utama di setiap pabrik pengolahan mineral. Transportasi bahan diperlukan dalam setiap langkah di pabrik pengolahan dan sering menjadi bagian dari langkah pengolahan. Tempat penyimpanan material bisa berupa *stockpiles*, *bin*, dan *hoppers*. Untuk transportasi bahan solid biasa digunakan *mechanical conveyors*, *pneumatic conveyors*, dan *elevators*. Untuk pabrik transportasi *liquid* atau *slurries*, digunakan pompa (*pumps*) dan *pumping*. *Tailing disposal* adalah tempat penampungan ampas (*tailing*). Material ini tidak mempunyai nilai ekonomi, tetapi berpotensi untuk dilakukan pemrosesan kembali. Tempat penampungan tersebut bisa berupa *tailing ponds* atau *dams*.

### C. KAJIAN BENEFISIASI MINERAL LOGAM (BIJIH)

Berikut adalah contoh pengolahan mineral logam (bijih) di dalam negeri.

## 1. Mineral Logam (Bijih) Timah

Pengolahan bijih timah, seperti di Pusat Pengolahan/Pencucian Bijih Timah (PPBT) PT Tambang Timah (Simatupang & Sigit, 1991), dilakukan menggunakan saringan dan alat pencucian berdasarkan berat jenis. Peralatan yang digunakan, misalnya palong, berbagai tipe *jig*, meja goyang yang diintegrasikan dengan tambang semprot, kapal keruk (KK), atau mesin gali mangkuk (MGM). Tujuan utama pencucian adalah peningkatan kadar konsentrat bijih timah (70% timah) dan mineral ikutan lainnya, seperti ilmenit, monazit, zirkon, dan xenotim.

Dalam perkembangannya, pengolahan bijih timah diintegrasikan dengan penambangan di laut. Prosesnya dilakukan dengan menggunakan kapal isap produksi (KIP) atau kapal isap keruk (KIK) seperti pada Gambar 13. KIP mempunyai beberapa komponen peralatan produksi, yakni pompa isap, genset, serta *ladder* yang dilengkapi dengan pipa isap dan *cutter*. Peralatan lainnya berupa alat pemisah bijih timah dari material pengotornya, yakni *greesly*, saringan putar (*rotary screen*), *jig* primer dan *jig* sekunder, *clean up*, *sluice box* (sangkan), dan talang (saluran) untuk pembuangan material pengikutnya yang tidak berharga (*tailing*).

Gambaran tentang mekanisme produksi kapal isap keruk KIK dapat dijelaskan sebagai berikut. Ketika *ladder* dioperasikan, bagian ujungnya yang berupa *cutter* akan berputar memotong lapisan tanah penutup (permukaan dasar laut) dan bijih (kaksa) dengan pola lingkaran atau setengah lingkaran. Gerakan ini dapat dipantau melalui panel digital. Lapisan tanah atau bijih yang terkelupas dan terberaikan dalam air membentuk lumpur (*sludge*), kemudian terisap melalui pipa isap dan disalurkan melewati pipa isap ke dalam *greesly* dan saringan putar (*rotary screen*). Material tersebut terpisah menjadi air lumpur dan butiran-butiran lepas (batu kerikil) yang keluar melalui talang pembuangan (*tailing*), sementara butiran berukuran pasir bersama

air lumpur turun dan lolos dari saringan tersebut. Pemisahan antara material yang mempunyai berat jenis rendah (*tailing*) dan material yang mempunyai berat jenis tinggi (bijih timah) dilakukan dengan menggunakan *jig* primer dan *jig* sekunder. Material ringan bersama air lumpur akan keluar melalui talang pembuangan (*tailing*), sedangkan material berat masuk ke dalam *clean up* (dicuci/dibersihkan) dan selanjutnya dipisahkan kembali antara konsentrat dan *tailing* melalui pencucian/pemisahan akhir menggunakan sangkan (*sluice box*).

Aktivitas tersebut tidak hanya dilakukan oleh perusahaan tambang timah dan mitranya, tetapi juga diikuti oleh penambang ilegal (PETI), baik masyarakat setempat maupun masyarakat pendatang. Pengolahan yang diintegrasikan dengan penambangan tersebut dilakukan secara sederhana menggunakan pompa isap, genset, kompresor, saringan, dan *sluice box* yang diletakkan di atas rakit dan perahu modifikasi dari perahu nelayan (Gambar 14). Produk berupa konsentrat dijual ke tempat peleburan, sedangkan *tailing* langsung dibuang ke laut.

Pemurnian bijih dalam kondisi kering dilakukan menggunakan *high tension separator* dan *magnetic separator* untuk menekan biaya pemurnian. Peleburan konsentrat bijih timah dilakukan dalam tanur



Sumber: Tim Kajian Tambang LIPI (2011)

**Gambar 13.** Kapal Isap Produksi di Sekitar Perairan Pantai Pulau Bangka



Sumber: Tim Kajian Tambang LIPI (2011)

**Gambar 14.** Modifikasi Perahu Nelayan dan Rakit di Perairan Pulau Bangka

listrik bersuhu  $1350^{\circ}\text{C}$  dengan menambahkan antrasit sebagai reduktor, batu kapur sebagai *flux*, dan bahan lainnya. Proses pemurnian selanjutnya dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama ialah mendinginkan cairan timah hingga suhu  $400^{\circ}\text{C}$  sambil diaduk dengan menambahkan serbuk gergaji sehingga diperoleh kadar timah 99,8% Sn. Tahap kedua ialah eliminasi bahan pengotor (besi dan bahan lainnya) melalui penurunan suhu hingga  $260^{\circ}\text{C}$  menggunakan alat *centrifuge*. Timah murni yang dihasilkan dicetak dalam bentuk balok dengan berat 35 kg dengan kandungan timah mencapai 99,85–99,92% Sn.

## 2. Mineral Logam (Bijih) Nikel

Pengolahan bijih nikel menjadi feronikel, seperti di Pomalaa (Simatupang & Sigit, 1991), dilakukan dengan tahapan pra-olahan, kalsinasi serta peleburan dan pemurnian. Pada tahap pra-olahan, bijih nikel dipersiapkan menggunakan *shake out machine* (SOM) sehingga ukuran butir lolos saringan minus 30 cm. Selanjutnya, bijih nikel diangkut dengan *belt conveyor* menuju *ripple flow screen* (RFS) dengan produk *impeller breaker* untuk memperoleh ukuran minus 5 cm, dan diangkut dengan *belt conveyor* menuju dua *ore bin* yang masing-masing berkapasitas 120 ton. Sementara itu, antrasit dan batu kapur secara ter-

pisah ditampung di dalam *ore bin* yang masing-masing berkapasitas 70 ton. Setiap 320.000 ton bijih nikel perlu ditambahkan 30–40 kg/ton antrasit dan 20–40 kg/ton batu kapur dalam kondisi basah sebagai umpan proses kalsinasi.

Kalsinasi dilakukan dengan menggunakan *rotary kiln* sehingga air lembap (*moisture*) dan zat terbang (LOI) akan terlepas dan dibuang sebagai gas. Produk kalsinasi bertemperatur 800°C digunakan sebagai umpan tungku (dapur) listrik untuk proses peleburan. Pada proses peleburan, terjadi *calcine* dan reduksi semua oksida melalui reaksi dengan karbon. Bijih yang tidak tereduksi akan diikat oleh CaO dari batu kapur membentuk *slag*. Pemisahan antara logam feronikel dan *slag* dalam dapur listrik terjadi akibat perbedaan berat jenis logam feronikel dan *slag* sehingga terbentuk dua lapisan. Lapisan *slag* dialirkan dan disemprot dengan air sehingga tergranulisasi menjadi butiran berukuran 5–10 cm, sedangkan lapisan logam feronikel dikeluarkan dari dapur listrik ditampung di dalam *ladle* untuk dimurnikan.

Pemurnian bertujuan mereduksi unsur pengotor, seperti sulfur, karbon, silikon, dan fosfor. Desulfurisasi yakni proses pengurangan sulfur dilakukan dengan menambahkan *carbide* dan soda *ash* sehingga menghasilkan logam feronikel arang tinggi (H/C) dan komposisinya sesuai permintaan pasar. Pembuatan logam feronikel arang rendah (L/C) dilakukan dengan mereduksi unsur Si (desilifikasi), unsur C (dekarbonisasi), dan unsur P (defosfatisasi) melalui *shaking convertor*. Pengembusan O<sub>2</sub> terhadap logam feronikel cair dalam *convertor* dilakukan sehingga terbentuk oksida-oksida SiO<sub>2</sub>.CO dan P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.CO yang dikeluarkan sebagai gas, sedangkan SiO<sub>2</sub>, CO dan P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> akan diikat oleh CaO dari batu kapur yang berfungsi sebagai *flux* dan membentuk *slag*. Pemisahan *slag* dan logam feronikel murni (FeNi) dalam *convertor* dilakukan secara *skimming*.

Pengolahan bijih nikel menjadi nikel *matte* di Soroako merupakan modifikasi dari proses sebelumnya (pengeringan, reduksi, peleburan,

dan konversi). Perubahan tersebut untuk memperbaiki kemampuan peralatan dan kepastian operasi (*operating reability*). Modifikasi untuk menghasilkan nikel *matte* ini disesuaikan dengan keinginan pembeli di Jepang. *Convertor* yang digunakan termasuk jenis konvensional, yakni *side blown pierce smith* (PS), dan sebelumnya menggunakan *top blown kaldo type rotary converter* (TBRC) dalam kondisi *standby*. Dengan penggunaan PS ini, terak yang dibuang pun mempunyai kandungan nikel lebih rendah (<0,8%) sehingga dapat meningkatkan efisiensi operasi.

### 3. Mineral Logam (Bijih) Tembaga

Metode yang diterapkan dalam pengolahan bijih tembaga di Freeport Indonesia Company (FIC) (Simatupang & Sigit, 1991) ialah flotasi. Tahapan pengolahan bijih tembaga terdiri atas preparasi ukuran butir melalui unit *crushing* dan *grinding plant* serta pemisahan melalui flotasi dan pengawa-airan (*dewatering*). Pada tahap preparasi, bijih tembaga berukuran 15 cm diremukkan dalam instalasi peremuk batuan (*crushing plant*) dan mesin pengayak getar sehingga ukuran butir menjadi 0,6 cm. Selanjutnya, dilakukan penggerusan dalam instalasi penggerusan (*grinding plant*) yang terdiri atas rangkaian mesin *ball mill-cyclone* sehingga ukuran butir menjadi lebih kecil 200 mesh atau lebih kecil 0,074 millimeter.

Bijih tembaga berukuran halus yang bercampur air dalam bentuk lumpur (*slurry*) dimasukkan ke tangki-tangki sel flotasi, kemudian ditambahkan sejumlah reagen agar pemisahan mineral tembaga dan mineral pengotornya dapat berlangsung baik. Melalui beberapa tahapan flotasi (tahap flotasi bijih/*roughing flotation* dan tahap flotasi konsentrat/*scavenging flotation*) dihasilkan konsentrat tembaga 35–45% Cu dan *tailing* yang mengandung senyawa mineral-mineral pengotor tembaga 0,1–0,2% Cu.

Proses flotasi yang diterapkan sangat rumit, tetapi tingkat perolehan (*recovery*) mineral-mineral berharga sangat tinggi. Perolehan logam Cu mencapai 92%, perolehan logam emas mencapai 80%, dan perolehan logam perak mencapai 70%. Konsentrat berbentuk lumpur ini ditampung di stasiun pompa, kemudian dipompa lewat pipa khusus ke kompleks Pelabuhan Ammapare untuk diproses lanjut dalam pabrik pengawa-airan (*dewatering-plant*). Sementara itu, seluruh *tailing* yang juga berbentuk lumpur dialirkan ke Sungai Agawagon.

Lumpur konsentrat dengan kekentalan 65–75% padatan atau kandungan air 30–35% dimasukkan ke mesin penyaring putar (*rotary-disc-filter*) sehingga diperoleh konsentrat tembaga yang masih mengandung kandungan air 12–15%. Selanjutnya, konsentrat ini dimasukkan ke mesin pengering putar (*rotary drier*) dan diperoleh konsentrat tembaga yang mengandung air (8–10% H<sub>2</sub>O) yang dianggap sebagai konsentrat tembaga kering. Sementara itu, filtrat dari mesin pengering putar dilewatkan mesin pengental, dan air jernih dialirkan ke kolam pengendap (*settling pond*). Gas buang dari mesin pengering putar dilewatkan sistem *scrubber*. Konsentrat tembaga kering kemudian disimpan dalam gudang khusus, selanjutnya secara periodik diangkut dengan ban berjalan (secara tertutup) ke dalam kapal yang bersandar di Pelabuhan Amamapare.

#### 4. Mineral Logam (Bijih) Emas

Metode pengolahan mineral logam (emas dan perak) sudah lama dikenal. Teknologi pengolahan ini diperkirakan sudah digunakan ketika orang-orang Mesir Kuno memisahkan logam emas dan perak dari bijih (*ore*) menggunakan mercury (Hg). Metode pengolahan mineral logam emas terus berkembang sejak ditemukannya metode konsentrasi gravimetri dan amalgamasi (sebelum Masehi), proses sianidasi (1860), flotasi (1930), dan *leaching* (1960). Walaupun metode tersebut sudah dipergunakan sejak lama, hingga kini masih relevan dan digunakan orang (Simatupang & Sigit, 1991).



Pemilihan metode pengolahan mineral logam emas dan perak ditentukan oleh berbagai faktor, yaitu karakteristik bijih dan variasi kandungan mineral logam berharga, proses yang sederhana, dan biaya operasi yang relatif murah. Dari keempat metode tersebut (gravimetri dan amalgamasi, sianidasi, flotasi serta *leaching*), gravimetri dan amalgamasi adalah yang paling murah biayanya. Pertambangan skala kecil, baik yang legal maupun yang ilegal, biasanya memiliki modal kerja yang relatif kecil. Oleh karena itu, metode konsentrasi gravimetri dan amalgamasi cenderung lebih disukai.

Metode pengolahan gravimetri dan amalgamasi telah diterapkan di pelosok Indonesia. Pengolahan mineral logam emas sekunder pada umumnya dilakukan melalui proses konsentrasi gravimetri, sedangkan pengolahan mineral logam emas primer dilakukan dengan proses amalgamasi. Pada pengolahan mineral logam emas sekunder di Kalimantan dan Bombana (Sulawesi Tenggara), dilakukan metode konsentrasi gravimetri, seperti pendulangan (*panning*) dan *sluice box*, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 15.



Sumber: Tim Kajian Tambang LIPI (2010)

**Gambar 15.** Pengolahan mineral logam emas dilakukan dengan metode konsentrasi gravimetri (a) pendulangan dan (b) *sluice box* di Bombana, Sulawesi Tenggara.

Metode amalgamasi dilakukan dengan mencampurkan sejumlah *mercury* ke bijih yang sedang ditumbuk dan digiling sampai berukuran halus dalam sebuah gelundung (amalgamator) yang diputar menggunakan tenaga mesin (dinamo penggerak) atau tenaga air (Gambar 16). Amalgamator berbentuk tabung (silinder) tertutup dilengkapi pintu untuk memasukkan dan mengeluarkan bahan dan media proses. Amalgamator biasanya terbuat dari pipa bekas dengan berbagai ukuran, sedangkan sebagai media giling digunakan batangan besi bekas rel kereta api atau as mobil yang sering disebut pelor.

Bijih emas aluvial skala perusahaan, seperti di Tambang Emas Ampalit, diolah dari lumpur hasil penambangan kapal keruk atau penggalan kanal. Pengolahan bijih aluvial dilakukan dengan pemisahan berdasarkan ukuran butir penyaringan, konsentrasi (berdasarkan perbedaan berat jenis emas dengan komponen material pengotornya), dan amalgamasi untuk mengikat emas dari mineral pengotornya.

Bijih emas aluvial berupa lumpur dipompakan ke unit pengolahan terapung (*floating treatment*), kemudian dialirkan melalui saringan putar (*trommel*) yang mempunyai lubang-lubang berukuran 3 mm. Material berukuran > 3 mm dibuang ke kolam melalui *belt conveyor*,



Sumber: Tim Kajian Tambang LIPI (2010)

**Gambar 16.** Amalgamator dengan Penggerak Tenaga Diesel (Listrik) dan Tenaga Air

sedangkan pasir bercampur emas yang berukuran minus 3 mm ditampung di dalam bak penampung (*hopper*). Selanjutnya, pasir bercampur emas dipompakan dan didistribusikan ke *spiral primer* sehingga menghasilkan tiga jenis produk, yaitu konsentrat, *middling*, dan *tailing*. Konsentrat dialirkan ke dalam bak *cleaner*, *middling* dialirkan ke bak *middling* untuk diolah kembali pada *spiral* sekunder, sementara *tailing* dibuang ke dalam kolam. Kemudian, konsentrat dimasukkan ke kotak besi (*kibble*) dan diangkut ke tempat pemurnian. *Middling* dimasukkan kembali ke *cleaner*, sedangkan *tailing* dimasukkan dalam bak sekunder. Selanjutnya, konsentrat dipompakan ke meja goyang cleaner (*gemini table*). Konsentrat yang diperoleh selanjutnya dimurnikan, *middling* dipompakan kembali ke dalam *cleaner*, sementara *tailing* di buang ke kolam setelah melalui *sluice box*.

Pemurnian dilakukan melalui proses amalgamasi. Dalam proses ini, konsentrat ditambahkan air raksa dengan perbandingan 3:1 terhadap perkiraan berat emas dalam konsentrat yang diamalgamasi. Amalgam yang diperoleh selanjutnya dimasukkan ke mangkok *retort* yang dilengkapi dengan desilator untuk menangkap uap Hg. Emas berbentuk *spons* dari *retort* dimasukkan ke mangkok besi dan ditambahkan *borax* yang berperan sebagai *flux* dan dilebur dalam dapur peleburan (*smelter*). Hasil peleburan berbentuk *bullion* dengan kadar konsentrat 96,7% emas dikirim ke unit logam mulia untuk dimurnikan.

Pengolahan bijih emas primer, seperti di Pongkor, dilakukan melalui preparasi bijih yang meliputi pemecahan batuan (*crushing*), pemisahan ukuran (*screening*), penggerusan (*grinding*), dan *classifying* (pemisahan ukuran yang relatif halus). Tujuan preparasi adalah memperkecil ukuran butir menjadi minus 200 mesh. Ukuran tersebut merupakan ukuran partikel emas dan perak dalam bijih dapat terliberasi optimal sehingga dapat larut dalam *cyanide*. Bijih emas *refractory* adalah sulfidis yang mengandung sulfida *base metal* yang tinggi. Logam emas dan perak dalam bijih yang bersifat sulfidis lebih

berasosiasi (*interlock*) dengan mineral sulfida *base metal*. Pengolahan bijih lebih baik dilakukan dengan flotasi, barulah dilakukan cyanidasi untuk memisahkan *base metal* (Pb, Cu, dan Zn).

Proses pengambilan/pemisahan emas (ekstraksi) dapat dilakukan dengan amalgamasi dan sianidasi atau kombinasi keduanya. Proses kombinasi dilakukan jika bijih emas mengandung butiran emas kasar dan halus. Ukuran butiran emas kasar setelah dipisahkan dan dikonsentrasi, diproses dengan cara amalgamasi, sementara sisanya diproses dengan cara cyanidasi. Amalgamasi dilakukan seperti pada pengolahan pada bijih emas aluvial. Cyanidasi adalah pelarutan selektif emas dan perak atau senyawanya dalam larutan encer *cyanide* dari alkali metal atau alkali tanah dengan aerasi. Dalam proses cyanidasi ini digunakan NaCN. Pelarutan bisa terjadi dengan kehadiran oksigen bebas dalam larutan dan kondisi pH 11–12. Penambahan *litharge* (PbO) dilakukan untuk mempercepat pelarutan Ag berupa sulfida perak ( $Ag_2S$ ) dan mengurangi NaCN yang termakan oleh sebagian sulfida yang berasal dari mineral-mineral yang berada dalam bijih. Proses cyanidasi berlangsung selama 63–72 jam. Selang waktu tersebut adalah yang optimal untuk proses ini. *Pulp* dari agitator dialirkan ke *thickener* secara *counter current decantation* dengan filtrat dari unit filtrasi. Proses cyanidasi menghasilkan dua produk. Pertama, *over flow* dari *thickener* berupa larutan kaya (*pregnant rich solution*) yang mengandung emas sebagai umpan (*feed*) proses presipitasi. Kedua, *under flow* dari *thickener* berupa *pulp* sebagai umpan unit filtrasi.

Pemisahan larutan kaya dari ampasnya dilakukan melalui filtrasi (penyaringan) dan *counter current decantation*. Filtrasi air kaya dilakukan bergantian dengan proses pencucian agar *sand tailing* yang dihasilkan bersih dari kandungan air kaya. Sementara itu, filtrat berupa air kaya dari air pencucian dipompakan ke *thickener*. Filtrat dari unit filtrasi mengalami *counter current decantation* dengan *pulp* hasil proses cyanidasi agitator yang masuk ke *thickener*. Ampas pasir (residu) dari

proses filtrasi diolah lebih lanjut dengan filtrasi untuk mendapatkan konsentrat timbal (Pb) dan konsentrat seng (Zn).

Pengambilan emas dari larutan kaya dapat dilakukan dengan dua cara, yakni proses presipitasi (pengendapan) yang dikenal sebagai proses Merrill Crowe dan proses karbon. Proses presipitasi (Merrill Crowe) adalah saat logam emas dan perak yang berupa senyawa kompleks dalam larutan NaCN dibebaskan dan ditangkap dengan mempergunakan serbuk seng (*zink dust*) sebagai reagen. Filtrat yang dihasilkan berupa *barrent solution* yang disirkulasikan kembali untuk memenuhi kebutuhan air yang diperlukan dalam pengolahan bijih secara keseluruhan. Presipitasi dalam kantong-kantong filter yang mengandung logam emas dan perak dikirim ke Unit Pengolahan dan Pemurnian Logam Mulia untuk proses *refining* sebelum dilebur untuk menghasilkan *dore bullion*. Pengambilan emas dalam larutan kaya dengan karbon aktif dapat dilakukan dalam tiga cara, yaitu *Carbon in Pulp* (CIP), tangki cyanidasi terpisah dengan karbon aktif; *Carbon in Leach* (CIL), tangki cyanidasi menjadi satu dengan karbon aktif; *Carbon in Column* (CIC) atau *Carbon in Tower* (CIT) yang digunakan untuk *heap bleaching*.

Proses pemurnian emas (*refining process*) dilakukan dengan cara *electro refining*. Emas yang akan dimurnikan, baik dari hasil amalgamsi maupun dari cyanidasi, agar dapat dicetak menjadi anode, harus memenuhi persyaratan kadar emas paling rendah 95%. Bila kandungan emas tidak memenuhi jumlah tersebut, perlu dilakukan proses *pre-treatment* agar kandungan emas dapat ditingkatkan sesuai persyaratan. Anode yang kaya kandungan perak diproses dalam sel elektrolisa perak. Perak akan larut dalam elektrolit, kemudian diendapkan pada katode sebagai perak murni. Sementara itu, emas tidak larut dan membentuk *slime*. Setelah proses elektrolisis perak selesai, dilakukan *pre-treatment* terhadap *slime* yang dihasilkan untuk memperoleh emas yang memenuhi syarat sebagai anode elektrolisis

emas. Anode dalam sel elektrolisis akan larut ke dalam elektrolit dan diendapkan dalam katode yang terbuat dari plat tipis emas murni. Proses elektrolisis, baik dalam sel perak maupun emas, dapat berlangsung karena adanya arus listrik searah yang dilewatkan melalui anode dan katode. Jika hasil pengendapan sudah cukup banyak, katode diangkat dari sel, kemudian dicuci, dan dilebur. Emas murni yang dihasilkan—paling sedikit mengandung 99,9% emas—dilebur dan dicetak sebagai emas balok dengan standar berat tertentu atau sebagai bahan baku pembuatan emas induk.

## 5. Mineral Logam (Bijih) Bauksit

Bijih bauksit adalah mineral logam bauksit yang memiliki kandungan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dominan. Pengolahan bauksit bertujuan mengekstraksi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  melalui proses bayer. Proses bayer dilakukan melalui preparasi bijih bauksit dengan penggilingan dan penyaringan sehingga memperoleh ukuran butir minus 35 mesh. Proses selanjutnya adalah melarutkan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dalam bauksit dengan menggunakan soda api (*caustic soda*) dengan konsentrasi dan temperatur tertentu dan menggunakan uap sebagai media penghantar panas dalam tabung baja yang tahan terhadap tekanan yang ditimbulkannya. Pelarutan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dari bauksit Indonesia (*gibbsite*) dilakukan pada temperatur 108–165°C. Proses selanjutnya ialah memisahkan larutan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dengan material padat yang tidak larut dan *desilification product*. Endapan persenyawaan yang terbentuk antara silika akan reaktif dengan  $\text{Na}_2\text{O}$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Kemudian, dilakukan penyaringan larutan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dari koloid-koloid dan material padat lainnya sehingga diperoleh larutan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang bening. Setelah itu, dilakukan proses presipitasi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dengan menambahkan *seed* yang terdiri atas hidrat  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang halus. Proses ini dipercepat dengan membangun partikel-partikel  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang lebih besar, tetapi tidak mudah pecah. Endapan hidrat  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang dihasilkan selanjutnya diseleksi; hidrat  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang berukuran lebih besar diambil sebagai

produksi, sedangkan hidrat  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang masih halus dikembalikan ke proses presipitasi sebagai *seed*. Hidrat  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang berukuran lebih besar selanjutnya dikalsinasi sedemikian rupa untuk menghilangkan kadar air dan molekul air yang terikat dalam partikel  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Alumina hasil kalsinasi siap untuk dikapalkan ke pabrik peleburan untuk dibuat menjadi logam aluminium. Proses pembuatan aluminium dengan elektrolisis lelehan dalam kryolit ditemukan bersamaan oleh Charles Maartin Hall (Amerika Serikat) dan Paul T. Heroult (Prancis) pada 1825 sehingga disebut sebagai Proses Hall Heroult.

Elektrolit yang digunakan adalah larutan alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dalam kryolit ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ). Larutan 4–20%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dalam  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  mempunyai titik leleh  $980^\circ\text{C}$  sehingga elektrolisis dapat dilakukan pada temperatur  $1.000^\circ\text{C}$ . Kryolit sesungguhnya berfungsi sebagai *flux* untuk menurunkan titik leleh campuran.  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ , dan  $\text{LiF}$ , serta  $\text{NaCl}$  ditambahkan untuk menurunkan titik lelehan meskipun  $\text{Mg}$  dan  $\text{Li}$  dapat mengotori aluminium yang dihasilkan. Sementara itu, penambahan  $\text{NaCl}$  dapat mengakibatkan terbentuknya  $\text{HCl}$  dalam gas hasil elektrolisis yang dapat menimbulkan korosi.

## 6. Mineral Logam (Bijih) Kromit dan Pasir Besi

Pengolahan bijih kromit dilakukan dengan metode konsentrasi gravitasi dan konsentrasi magnetik menggunakan spiral dan pemisah elektrostatik jenis rol ataupun jenis plat. Proses pemisahannya bersifat fleksibel sehingga produk yang dihasilkan dapat disesuaikan dengan kebutuhan pasar. Hasil produksi kromit diekspor sebagai kromit refraktori yang berkualitas sangat baik sebagai pasir cetak. Pengolahan pasir besi dilakukan melalui penyaringan dan pemisahan dengan menggunakan *magnetic separator*.

## D. KAJIAN PEMROSESAN MINERAL BUKAN LOGAM DAN BATUAN

Secara umum, pengolahan dan pemurnian mineral bukan logam dan batuan di Indonesia masih sangat sederhana, bahkan ada yang tidak memerlukan pengolahan dan pemurnian, tetapi dipergunakan sebagai bahan industri bangunan, misalnya sirtu dan tanah uruk. Berdasarkan tujuannya, pengolahan mineral bukan logam dan batuan dapat dibedakan menjadi lima, yaitu (1) pemurnian, (2) peningkatan kadar suatu unsur, (3) peningkatan sifat kimia, (4) peningkatan sifat fisik, dan (5) peningkatan bentuk dan penampilan.

Pengolahan atau pemurnian mineral, seperti zirkon dan intan, dilakukan menggunakan alat konsentrasi berdasarkan gaya berat, seperti *jig* dan meja goyang. Sementara itu, pengolahan barit yang merupakan *tailing* dari pengolahan emas dilakukan dengan *cyclone*, *classifier*, *filter*, dan pengering (*dryer*) hingga menghasilkan serbuk barite yang dapat dipergunakan sebagai lumpur bor.

Peningkatan suatu unsur, seperti belerang, dilakukan melalui proses penyulingan (*fraser*). Sementara itu, peningkatan kadar fosfat dilakukan melalui reduksi ukuran butir dilanjutkan dengan proses flotasi.

Peningkatan sifat kimia terjadi pada pembakaran batugamping untuk memperoleh kapur (kalsium oksida) dan pengaktifan zeolit. Pengolahan lanjut batu kapur menjadi Ca-karbonat kualitas kimia dapat memberikan nilai tambah yang tinggi. Pengolahan zeolit dilakukan melalui tahap preparasi bahan dan pengaktifan, baik secara fisik maupun secara kimia. Preparasi bahan dimaksudkan untuk mereduksi ukuran butir dari 15 cm menjadi fraksi ukuran yang lebih kecil. Preparasi bahan pada umumnya dilakukan melalui peremukan (*crushing*) dan penggilingan (*milling*), dilanjutkan dengan penyaringan menggunakan unit ayak getar agar zeolit terbagi menjadi beberapa fraksi



ukuran butir. Pengaktifan secara fisik dilakukan melalui pemanasan pada suhu tertentu, sementara pengaktifan secara kimia dilakukan dengan menggunakan NaOH dan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Zeolit yang telah diaktifasi dapat digunakan dalam industri pertanian, peternakan, perikanan, dan pengolahan air.

Contoh pengolahan untuk peningkatan sifat fisika adalah peningkatan kehalusan ukuran butir dan derajat warna putih kaolin di Belitung yang dilakukan dalam beberapa tahap. Pada tahap pertama, kaolin dari tambang disaring menggunakan ayakan untuk menghilangkan unsur pengotor. Tahap kedua dilakukan dengan menggunakan *cyclone*, *classifier*, dan *sluice box* untuk memisahkan pasir kasar terhadap pasir halus. Pada tahap ketiga, dilakukan kembali penyaringan pasir halus menggunakan ayakan (400 mesh). Untuk ukuran butir lolos saringan di bawah 400 mesh, dapat dilakukan dengan menggunakan *thickener* dan *filter*, sedangkan untuk ukuran di atas 400 mesh, dilakukan flotasi untuk menghilangkan unsur pengotor, dilanjutkan dengan *thickener*. Tahap kelima adalah peningkatan derajat putih (*bleaching*) dan pengeringan sehingga diperoleh tepung kaolin murni.

Pengolahan dengan tujuan peningkatan bentuk dan permukaan batuan sebagai bahan bangunan dan untuk perhiasan dilakukan dalam dua tahap, yaitu pemotongan (*cutting*) dan penggosokan/pemolesan (*polishing*). Banyak jenis batuan sebagai bahan bangunan di Indonesia yang kian dikenal masyarakat, misalnya marmer, granit, basal, andesit dan batuan produk gunung api lain, seperti tufa-andesitik, yang digunakan sebagai lantai dan dinding bangunan. Namun, usaha penggosokan dan perakitan batu perhiasan di Martapura masih relatif kecil jika dibandingkan yang ada di Thailand.

## E. KAJIAN PEMROSESAN MINERAL DI LUAR NEGERI

Berikut ini contoh pengolahan dan pemurnian dan atau benefisiasi mineral di luar negeri yang dikaji dari buku *Minerals Processing & Beneficiation* karya Awni Al-Otoom dan Mohammad Al-Harashsheh (Al-Otoom & Al-Harashsheh, 2015). Buku tersebut memuat makalah yang dipresentasikan dalam lokakarya internasional di Johannesburg, Afrika Selatan. Lokakarya tersebut diprakarsai oleh Centre for Science and Technology of the Non-Aligned and Other Developing Countries (NAM S&T Centre) bekerja sama dengan *Department of Science and Technology (DST)*. Hal-hal yang dibahas dalam lokakarya tersebut adalah sebagai berikut.

### 1. Pemrosesan Bijih Laterit di Gambia

Pengolahan dan benefisiasi endapan laterit yang mengandung logam berat di Gambia dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama adalah memisahkan konsentrat dari ampas (*tailing*), dan proses ini diintegrasikan dengan penambangan menggunakan kapal keruk (*dredging*). Bijih aluvial hasil penggalian kapal keruk dipisahkan menggunakan spiral sehingga diperoleh konsentrat berukuran pasir yang mengandung mineral berat, seperti ilmenit, rutil, dan zirkon. Pada tahap kedua, konsentrat diangkut ke tempat penimbunan (*stock pile*) di pabrik pengolahan. Konsentrat tersebut kemudian dipisahkan dengan menggunakan magnetik separator hingga diperoleh mineral bersifat *magnetic* (ilmenit) dan mineral bersifat *non-magnetic* (zirkon). Tujuan benefisiasi tersebut adalah meningkatkan kadar bijih dan mineral ikutan dari mineral pengotornya. Melalui pemisahan mineral pengotornya (ampas), berat ampas dapat dikurangi, dan hal ini secara otomatis akan mengurangi biaya transportasi. Bijih pun dapat dijual dan memberikan nilai tambah. Jika tidak dilakukan pemisahan terlebih dahulu, bijih tersebut tidak akan laku diekspor.

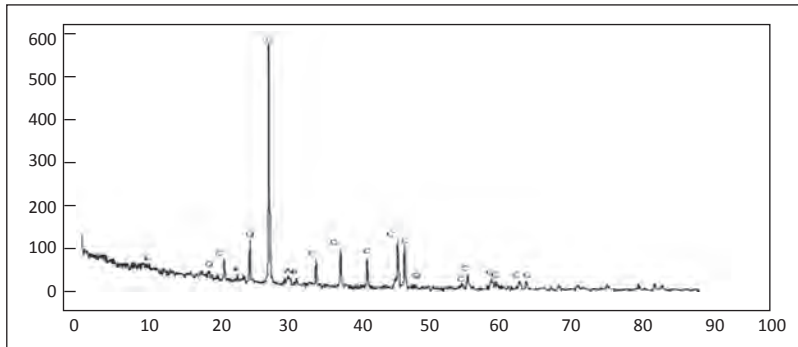
## 2. Pemrosesan Bijih Emas di Guyana

Inisiasi Guyana Geology and Mines Commission (GGMC) untuk improvisasi perolehan mineral dan peningkatan profitabilitas sektor pertambangan setempat, dilakukan dengan penelitian dan evaluasi mineralogi proses emas, metode konsentrasi emas, pelarutan emas dengan sianida serta implikasi proses emas terhadap kesehatan dan lingkungan. Penelitian dan pengembangan fasilitas dalam berbagai aspek dan penerapannya untuk konsentrasi bijih dan perolehan emas dilakukan dengan metode pemisahan gravitasi dan kimia untuk mengurangi Hg yang digunakan. Beberapa hasil evaluasi di bidang pemrosesan emas di antaranya melengkapi *sluice box* dengan *radiotracers*. Dikonfirmasikan bahwa pada 1/3 panjang *sluice box* (20 ft) perolehan emas bisa mencapai 90%.

## 3. Pemrosesan Mineral dari *Oil Shale* di Yordania

Karakterisasi dan benefisiasi mineral *oil shale* di Yordania dilakukan menggunakan teknik analisis yang berbeda-beda, di antaranya analisis *scanning electron microscope* (SEM) dengan *energy dispersive spectrum* (EDS), *X-ray diffraction*, dan *qemscan*. Hasil karakterisasi ini cukup menarik untuk ditampilkan karena karakterisasi mineral *oil shale* jarang ditemukan dalam publikasi di Indonesia. Hasil analisis X-RD *oil shale* pada Gambar 17 memperlihatkan bahwa mineral dari *oil shale* didominasi oleh *calcite*, *clays*, *quartz* dan *phosphate* dalam porsi yang berbeda. Sulfur terdapat pada bagian organik dalam *oil shale*, dan beberapa in-organik sulfur hanya terdeteksi oleh *qemscan* selama pembakaran.

Hasil analisis *Energy Dispersive Spectrum* (EDS) dalam *Scanning Electron Microscope* (SEM) menunjukkan bahwa fase utama dalam *oil shale* yang dijumpai ialah *calcyte*, *clays*, dan *quartz*. Hal yang mengejutkan, yakni terlihat minyak atau kerogen dalam *oil shale* yang dikemas oleh cangkang mineral, terutama *calcyte*. Analisis kerogen

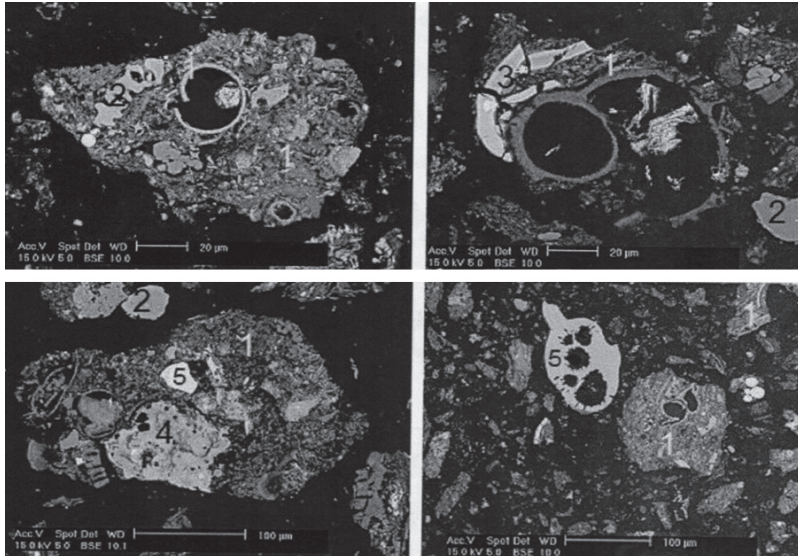


Ket.: c = calcite, Q = quartz, k = kaolinite/clays dan Ap = apatite/phosphate  
 Sumber: Al-Otoom dan Al-Harashseh (2015)

**Gambar 17.** Difraktogram Hasil X-RD Mineral dari *Oil Shale*

menggunakan EDS menunjukkan bahwa kerogen terdiri atas karbon, hidrogen, dan sulfur. Sementara itu, hasil analisis SEM pada Gambar 18 menunjukkan beberapa gambar penampang SEM dari partikel *oil shale*. Gambar tersebut menunjukkan mineral dan cangkang berbentuk bola yang mengurung kerogen. Analisis EDS SEM secara menyeluruh menunjukkan bahwa terdapat sulfur anorganik yang sangat sedikit, terutama atom besi, untuk membentuk pirit. Sulfur terdapat pada bagian organik *oil shale* (kerogen).

Benefisasi dilakukan dengan flotasi menggunakan *Methyl Iso Butyl Carbonel* (MIBC) sebagai *frothing agent*, sedangkan *collector agent*-nya berbeda-beda, misalnya kerosen, DMSO, *calcium lignosulfonate*, *sodium lignosulfonate*, *sulphonated naphthalene*, *diethyl ketone*, dan *fuel oil #2*. Flotasi *oil shale* menunjukkan perolehan yang rendah dengan maksimum 3% peningkatan ketika digunakan kolektor berupa *fuel oil #2*. Perolehan yang rendah ini terjadi karena ada kerogen terkapsul dalam lapisan mineral oil selama *crushing* dan *grinding* partikel *oil shale* basah sehingga sulit untuk melakukan penyesuaian terhadap sifat permukaan.



Sumber: Al-Otoom dan Al-Harahsheh (2015)

**Gambar 18.** Foto mikrograf SEM dari sampel *oil shale* pada berbagai fase mineral memperlihatkan (1) *Calcite*, (2) *Clays*, (3) *Silica*, (4) *Calcium*, (5) *Iron oxide*.

Demineralisasi *oil shale* dilakukan dengan mencampur 5 gr *oil shale* 125–250 µm dengan 20 ml dengan variasi konsentrasi asam (5, 10, 20, dan 35%). Asam yang digunakan berupa HCl, HF, HNO<sub>3</sub>, dan CH<sub>2</sub>COOH. Campuran tersebut dipanaskan di atas *hot plate*, dan diaduk dengan kecepatan rendah hingga mendidih merata. Kemudian, campuran tersebut disaring dengan *vacuum suction* melalui 0,45 µm kertas saring dan dicuci dengan sejumlah akuades untuk memisahkan residu. Solid residu dipanaskan dalam *oven* pada suhu 60°C selama 24 jam untuk menghilangkan *moisture*. Sejumlah campuran asam (35% HCl, 10% HF, dan 10% HNO<sub>3</sub>) digunakan untuk memaksimalkan hasil perolehan. Hasil sebesar 50 gr dianalisis menggunakan *Fischer Assay* sesuai dengan ISO 647-74. Penggunaan asam *asetik* efisien dalam proses demineralisasi dan bereaksi dengan *calcite* membentuk kalsium asetat.

#### 4. Pemrosesan Mineral Logam dan Mineral Bukan Logam di Kenya

Pengolahan dan benefisiasi mineral di Kenya meliputi mineral logam emas dan logam berat dan mineral bukan logam, soda ash ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), flourspar, kaolin, *gemstone*, dan mineral lainnya. Pengolahan ini dilakukan untuk memberikan nilai tambah mineral sebelum diekspor.

#### 5. Pemrosesan Mineral Feldspar di Malaysia

Pengolahan bijih *pegmatite* untuk memisahkan feldspar dari kuarsa dilakukan dengan cara flotasi. Penyiapan umpan flotasi dilakukan melalui kombinasi *crushing*, *grinding*, dan *sieving* sehingga diperoleh ukuran partikel  $-600\mu\text{m}$ . Selanjutnya, digunakan pemisah magnetik (*wet high intensity magnetic separator*) untuk mengurangi kandungan besi. Karakterisasi dilakukan dengan menggunakan *X-ray diffraction* (X-RD), *field emission scanning electron microscope* (FESEM), *energy dispersive X-ray* (EDX), dan kandungan Fe dianalisis dengan *atomic absorption spectrophotometer* (AAS). Ada beberapa reagen kimia yang digunakan. Pertama, 1 bagian *cationic-anionic diamine* dan 3 bagian *propane diaminedioleat* (duomeen TDO) yang berperan sebagai *collector*. Duomeen TDO terdiri atas reaksi 1 mol *alkyl propane diamine* [ $\text{R-NH-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-NH}_2$ ] dan 2 mol *oleic acid* [ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ ]. Sementara itu, *sodium hydroxide* digunakan untuk penyesuaian pH. Kedua, *frother* yang digunakan sebagai Aero 65. Ketiga, *sulfuric acid*. Hasil flotasi lalu dianalisis dengan *zeta potential* dan *fourier transformed infrared* (FTIR).

#### 6. Pemrosesan *Brine* di Nigeria

*Brine* secara alami terbentuk di danau, *saline springs*, dan *pond*. Di Nigeria, belum diketahui jumlah cadangan batuan yang mengandung garam (*rock salt deposit*). *Brine* mengandung 74–81% NaCl, selebihnya adalah kandungan garam Ca, Mg, dan K. Pengolahan dilakukan

oleh penduduk asli dengan teknologi sederhana, yakni melarutkan garam dari tanah yang asin (*saline earth*), dididihkan dan dilakukan kristalisasi serta dikeringkan pada panas matahari (*sun drying*). Produk yang dihasilkan oleh penduduk biasanya belum ditambahkan unsur yodium. Namun, kini telah dilakukan modifikasi proses melalui tahapan konsentrasi *brine* melalui proses *filtration*, *thin layer evaporator*, *open pan evaporator*, *solar dryer*, *iodization*, dan *packaging* (Al-Otoom & Al-Harahsheh, 2015).

## 7. Pemrosesan Mineral *Columbite* di Nigeria

*Pegmatite* di Nigeria diketahui mengandung konsentrasi mineral jarang seperti *columbite-tantalite*. *Columbite* termasuk kelompok *black mineral* dengan densitas tinggi seperti Niobium [(Fe, Mn)Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>]. Proses pengolahan dilakukan dengan menggunakan proses konsentrasi baik *wet* maupun *dry gravity*, *magnetic* atau *electrostatic method* untuk menghasilkan konsentrat yang mengandung lebih dari 70% yang telah dikombinasikan dengan *pentoxide* guna memenuhi persyaratan ekstraksi. Secara umum, *magnetic separator* digunakan untuk memisahkan *columbite* dari *gangue* mineral termasuk *sand*, *tin*, *zircon*, *ilmenite* dan *monazite*. Kemudian digunakan *air float* untuk memisahkan *tin*, *zircon*, dan *monazite* dari *sand*.

## 8. Pemrosesan Mineral Logam dan Mineral Bukan Logam di Tanzania

Tanzania memiliki potensi mineral logam unggulan, seperti emas, nikel, tembaga dan bijih besi serta mineral selain logam seperti batu permata (berlian, rubi, tanzanit, tsavorite/garnet hijau, turmalin hijau, rhodolit, safir, zamrud dan crysoprase) dan hidrokarbon. Beberapa jenis mineral bukan logam lainnya, seperti kaolinit, diatomit, gipsum, pozollana, batu kapur, meerschaum, bentonit, bola tanah liat, dimensi

dan *artstones* (*genes, marmer, anyolite*). Aktivitas benefisiasi dan nilai tambah mineral termasuk pemotongan, pemolesan dan *jewelry, smelting and refinery metal* dimaksudkan untuk peningkatan kualitas dan nilai mineral.

## 9. Pemrosesan Mineral Logam dan Mineral Bukan Logam di Uganda

Uganda mempunyai potensi mineral logam (*emas, timbal, timah putih, tungsten, kobalt*) dan mineral bukan logam (batu kapur, gipsum, *vermiculite*, dan fosfat). Teknologi pengolahan emas di Uganda tergantung jenis cebakan bijih, apakah bijih endapan aluvial atau cebakan bijih primer. Sementara itu, modal investasinya bervariasi, dari *artisanal* hingga skala besar.

Pengolahan emas *artisanal* dilakukan untuk memperoleh konsentrasi emas dari hasil penggalian. Batuan hasil penggalian ini diangkut ke *stream* (semacam kubangan), lalu dilakukan pendulangan menggunakan sekop dan *dulang*. Pendulangan batuan yang relatif keras dilakukan menggunakan *pick axes* dan *shovel*, selanjutnya batuan tersebut dihancurkan menggunakan *hammers, mortar*, dan *pestles*. Konsentrasi emas dilakukan dengan *sluice box*, kemudian konsentrat emas diekstraksi dengan metode amalgamasi menggunakan *mercury* (Hg). Pengolahan emas pada tambang skala kecil biasanya menggunakan peralatan mekanis untuk mereduksi ukuran, misalnya *primary and secondary crusher, ball*, dan *rod mill*. Untuk konsentrasi emas, digunakan *falcon concentrators* sebagai pengontrol. Untuk ukuran umpan, digunakan *hydrocyclone* dan saringan. Pengolahan emas pada tambang skala besar menggunakan *gravity concentration* dan *cyanidation*.

Pengolahan bijih timbal (*lead*) dilakukan dengan menggunakan *sluice box, rotary pans*, dan *jig*. Pengolahan bijih timah (*tin*) level *artisanal* menggunakan peralatan sederhana, yakni *pan* (*dulang*), sementara penambangannya menggunakan *pick axes, shovels, jack*



*hammers* dan *crownbars*. Demikian pula penambangan *wolfram level artisanal* menggunakan peralatan *pick axes, crownbars, spades, chisels, hammers*, dan *hous*. Dalam pengolahan, *hammers* digunakan untuk menghancurkan bijih, yang kemudian diangkut ke *stream* atau *ponds*. Setelah itu, *pan* digunakan memperoleh konsentrat. Pengolahan bijih timbal telah menggunakan peralatan mekanis, seperti *crusher* dan *screen*, namun untuk konsentrasinya masih menggunakan *pan*. Kini, *shaking tables, jigs* dan *mechanical pans* pun digunakan dalam pengolahan timbal. Pengolahan *cobalt* dilakukan dengan ekstraksi melalui *bioleaching* di *stockpile* yang merupakan *tailing* dari pengolahan tambang tembaga. Setelah itu, dilakukan serangkaian *electrolytic* terhadap hasil *leaching* untuk menghasilkan produk *cobalt chips* berbentuk *ingots* sebagai produk ekspor. Pengolahan wolfram dilakukan dengan *crushing* dalam dua tingkat yang dikombinasikan dengan *screen*. Konsentrasi ini dilakukan dengan menggunakan *jig*.

Pengolahan mineral bukan logam, seperti batu kapur, dilakukan untuk menghasilkan dua kategori produk, yakni produk kapur dan produk semen, seperti *porland pozolan cement* melalui penambahan bahan lainnya. Pengolahan *gypsum* melalui *artisanal operation* hanya pemisahan antara *gypsum* kadar tinggi dan kadar rendah. *Vermiculite* diolah dengan menyaring hasil penambangan secara selektif. Pengolahan *fosfat* dilakukan dalam skala kecil melalui *crushing* dan *grinding*, selanjutnya dilewatkan *magnetic separator* untuk mereduksi kandungan besi.

## F. PEMROSESAN BIJIH METODE BIOLEACHING

Dalam industri mineral, *bioleaching* bukanlah metode baru untuk mengekstraksi logam dari bijih karena sudah ada sejak zaman Romawi. *Bioleaching* adalah proses interaksi antara mikroba dan bijih logam. Sebagai hasil interaksi tersebut, logam dapat dilarutkan. Logam ini

dilarutkan melalui transformasi dengan oksidasi dan reduksi asam organik dan anorganik dengan merilis pembuatan reagen yang kompleks.

Proses *bioleaching* dapat terjadi secara langsung maupun tidak langsung. Berdasarkan mekanismenya, metode *bioleaching* dibagi dua, yakni *direct bioleaching* dan *indirect bioleaching*. Pada *direct bioleaching*, mikroorganisme memiliki kontak langsung dengan permukaan bijih mineral dan langsung terjadi kontak fisik secara tertutup. Dari kontak ini, sulfat dihasilkan melalui serangkaian reaksi dikatalisasi oleh enzim. Pada *indirect bioleaching*, mikroorganisme tidak kontak langsung dengan permukaan mineral bijih. Mikroorganisme dalam hal ini adalah mikrob yang menghasilkan reagen sehingga mampu melarutkan mineral.

Beberapa jenis mikroorganisme yang dapat digunakan untuk *bioleaching*, di antaranya *thiobacillius*, *leptospirillum*, *thermophilic bacteria*, dan *heterothropic microorganisms*. Tiga tipe proses *bioleaching* secara komersial dari ekstraksi metal, yaitu *slope bioleaching*, *in-situ bioleaching*, dan *heap bioleaching*. Keuntungan metode *bioleaching*, adalah mengekstraksi logam dari bijih kadar rendah sehingga bernilai ekonomi karena jika menggunakan metode proses *smelting* dan *roasting* umumnya biaya proses akan lebih mahal. Metode *bioleaching* juga dapat digunakan untuk mengekstraksi limbah atau *drainage* dan tidak menghasilkan gas yang merusak lingkungan. Selain itu, metode *bioleaching* dapat mengekstraksi dan *refining* logam mahal yang tidak dapat dilakukan oleh proses kimia lainnya. Kerugian *bioleaching* adalah prosesnya lebih lambat dibandingkan metode lainnya. *Bioleaching* bergantung pada beberapa faktor, seperti kondisi cuaca, mengakibatkan prosesnya kurang efisien.

## **G. KRITIK TERHADAP BENEFISIASI MINERAL**

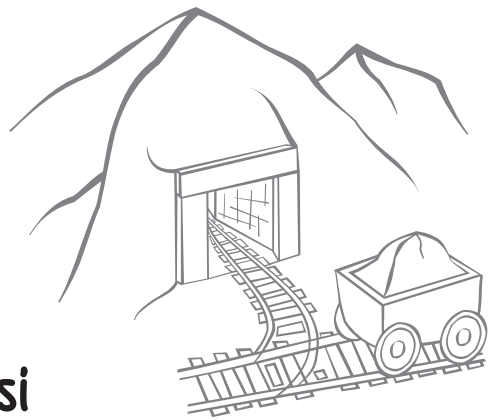
Hingga kini, hampir tidak ada pengolahan mineral (bijih) yang langsung dapat dikonversikan menjadi produk akhir, melainkan membutuhkan persiapan dan penyiapan dengan metode fisik. Metode fisik inilah yang diilustrasikan sebagai pengolahan mineral. Pengolahan mineral logam (bijih) dan batu bara pada umumnya mudah direalisasikan oleh pihak industri pertambangan (peleburan) berskala besar. Namun, ketersediaan energi menjadi kendala. Pengolahan mineral bijih dan batu bara pada umumnya hanya untuk meningkatkan kualitas produknya demi memenuhi persyaratan pasar global.

Peningkatan nilai tambah mineral nonlogam (batuan) dan mineral ikutannya biasanya dikelola oleh pihak industri pertambangan berskala kecil sehingga sulit untuk dilakukan. Permasalahannya adalah bagaimana memperoleh sebuah metode pemrosesan mineral yang tepat dan murah untuk peningkatan nilai tambah mineral nonlogam (batuan) dan mineral ikutan produk pertambangan yang dapat dipraktikkan oleh masyarakat industri berskala kecil. Oleh karena itu, perlu segera dicarikan solusi yang tepat, yakni transformasi teknologi metode pemrosesan mineral, batuan, dan batu bara yang efektif dan efisien.

# BAB IV

## Rekayasa Benefisiasi

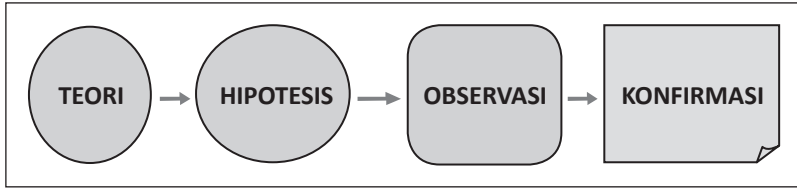
### Inovasi Transformasi Teknologi



Rekayasa (*engineering*) dapat diartikan sebagai adaptasi bahan dan atau energi untuk kebutuhan manusia (Ardha dkk., 2011; Simatupang & Sigit, 1991). Rekayasa benefisiasi dalam konteks ini didefinisikan sebagai pemrosesan mineral yang melibatkan teknologi rekayasa melalui formulasi bahan baku dengan menambahkan sejumlah bahan aditif untuk menghasilkan material baru berupa produk material fungsional secara menguntungkan. Rekayasa benefisiasi merupakan inovasi pemrosesan mineral yang relatif berbeda dengan pemrosesan mineral pada umumnya. Berikut ini akan dijelaskan awal mula inovasi ini terbentuk melalui kerangka alur pikir, konsep yang mendasari, model rekayasa benefisiasi, dan peran rekayasa benefisiasi dalam memberikan nilai tambah mineral, terutama sumber daya marginal.

#### A. ALUR PIKIR

Alur pikir dalam rekayasa benefisiasi ini secara deduktif (dari hal yang bersifat umum menuju hal yang lebih spesifik) seperti pada Gambar 19. Berawal dari teori (asumsi), selanjutnya disusun sebuah



Sumber: Hirnawan (2007)

**Gambar 19.** Alur Pikir Deduktif Inovasi Metode Pemrosesan Mineral

hipotesis. Hipotesis tersebut dibuktikan melalui observasi, baik telaah dari fakta pendukung maupun melalui eksperimen di laboratorium sebagai konfirmasi terhadap hipotesis (Hirnawan, 2007).

Untuk lebih menjelaskan alur pikir deduktif, diberikan ilustrasi pembuatan keramik lembaran berukuran  $50 \times 50 \times 0,5$  cm. Secara teoretis, bodi keramik dibentuk dari tiga jenis bahan, yaitu bahan kerangka (kuarsa), bahan pembentuk bodi (*clay*), dan bahan pelebur (*feldspar*). Permasalahannya adalah bagaimana memformulasikan ketiga jenis bahan tersebut menjadi keramik lembaran secara tepat. Selanjutnya, disusunlah hipotesis pembuatan keramik lembaran dengan melibatkan parameter teknologi rekayasa. Parameter tersebut meliputi komposisi bahan baku dan bahan aditif, perlakuan pembentukan, pengeringan, suhu, dan trajek pembakaran yang berperan sebagai variabel bebas. Sementara itu, indikator meliputi nilai uji kuat lentur, kuat tekan, kadar air, dan persentase penyusutan yang mencakup presisi bentuk, baik dalam kondisi mentah maupun setelah pembakaran, berperan sebagai variabel respons. Observasi dilakukan melalui eksperimen dan analisis sifat fisik serta mekanik di laboratorium. Melalui analisis statistik, dapat diketahui parameter teknologi rekayasa yang paling berperan dalam pembentukan bodi keramik lembaran sebagai konfirmasi terhadap hipotesis. Dengan demikian, alur pikir ini tergolong alur pikir deduktif.

Alur pikir serupa juga telah digunakan dalam berbagai penelitian dan menghasilkan berbagai prototipe produk material baru, seperti

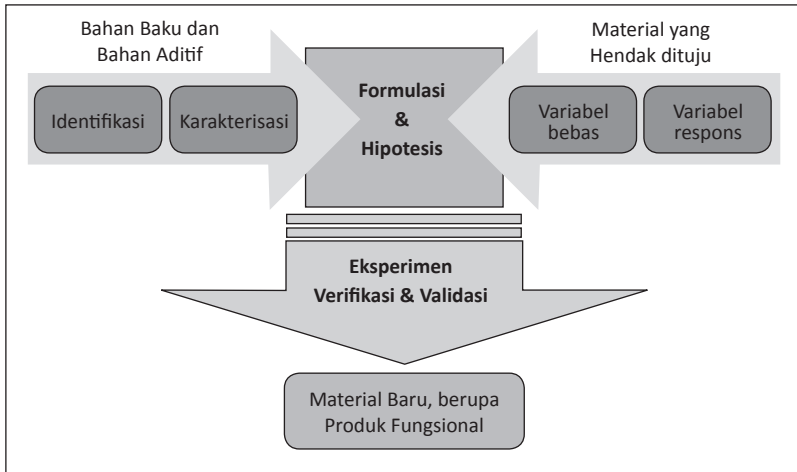
Forsterite, Atapulgit syn, Zeokeramik, *ground enhancement material* (GEM), material preservasi mikroorganisme (MPMO), Geomaterial (*Geopolymer*), dan *surfactant modified activated carbon* (SMAC). Beberapa ilustrasi alur pikir tersebut selanjutnya disintesis menjadi sebuah inovasi baru dalam pemrosesan mineral yang disebut benefisiasi atau pemrosesan mineral dengan melibatkan teknologi rekayasa yang disebut sebagai rekayasa benefisiasi.

## **B. KONSEP REKAYASA BENEFISIASI**

Secara umum, konsep yang mendasari rekayasa benefisiasi adalah bagaimana memformulasikan hasil identifikasi dan karakterisasi bahan baku dan bahan aditif menjadi material berkarakteristik baru. Pemikiran dipersempit lagi menjadi hipotesis khusus (spesifik) yang dapat diuji. Hipotesis tersebut dipersempit lagi ketika melakukan observasi melalui eksperimen di laboratorium. Hipotesis ini diarahkan menuju uji hipotesis statistika yang meliputi uji validasi dan uji verifikasi sebagai konfirmasi terhadap teori pendukung penelitian.

Secara konseptual, hipotesis dibangun melalui dua pendekatan. Pertama, formulasi melalui identifikasi dan karakterisasi bahan baku, bahan aditif, dan produk yang hendak dituju. Kedua, eksperimen di laboratorium dengan melibatkan teknologi rekayasa (Gambar 20). Jika ditinjau dari bahan yang diproses, teknologi prosesnya, dan produk yang dihasilkannya, rekayasa benefisiasi memuat beberapa unsur kebaruan. Hal ini tecermin dari perbedaan konsep antara benefisiasi sebelumnya dan rekayasa benefisiasi. Beberapa perbedaan konsep antara rekayasa benefisiasi dan benefisiasi sebelumnya sebagai berikut.

1. Dalam rekayasa benefisiasi, pemanfaatan sumber daya mineral menjadi lebih efisien karena semua bahan diformulasikan sedemikian rupa secara stokiometri sehingga hampir tidak ada bahan yang terbuang (ampas).



Sumber: Agustinus (2017)

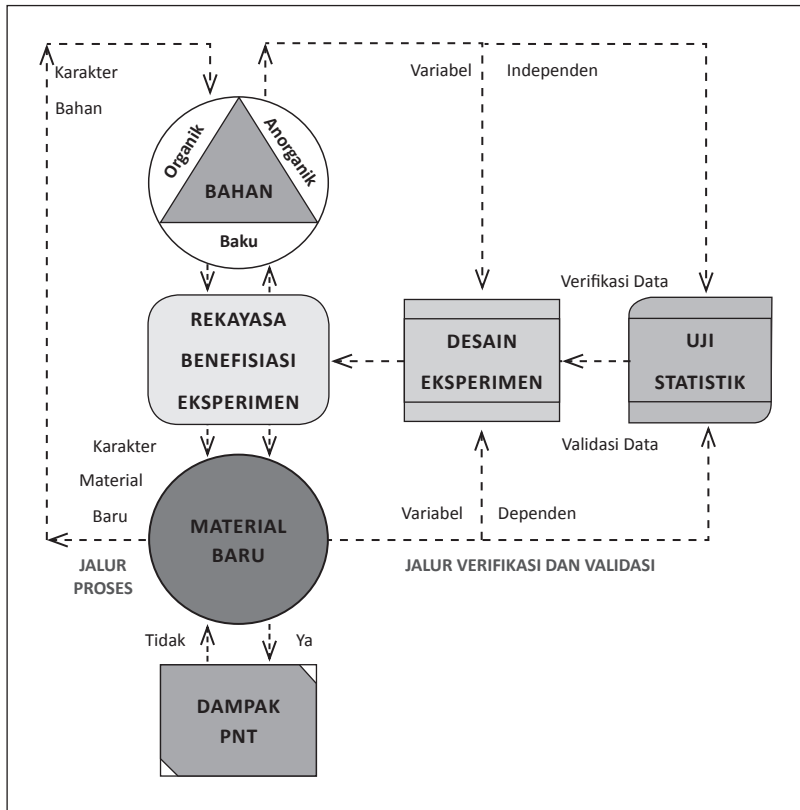
**Gambar 20.** Diagram Konsep Rekayasa Benefisiasi Berdasarkan Alur Pikir Deduktif

2. Rekayasa benefisiasi bukanlah untuk peningkatan kualitas dan atau pemurnian mineral—seperti pada proses benefisiasi sebelumnya, melainkan untuk menghasilkan suatu material baru.
3. Rekayasa benefisiasi menghasilkan produk jadi berupa material fungsional, sedangkan benefisiasi mineral menghasilkan produk antara.

### C. MODEL REKAYASA BENEFISIASI

Model rekayasa benefisiasi untuk peningkatan nilai tambah mineral, batuan, dan batu bara dilakukan menggunakan metode ilmiah dan disebut sebagai penelitian ilmiah. Dalam penelitian ilmiah, ada dua unsur penting, yakni unsur pengamatan (*observation*) dan unsur penalaran (*reasoning*). Penelitian ilmiah juga mempunyai arti penyelidikan yang sistematis, terkontrol, empiris, dan kritis tentang fenomena-fenomena alami yang didukung oleh teori dan hipotesis terkait (Hirawan, 2007).

Model rekayasa benefisiari secara umum diperlihatkan pada Gambar 21. Aneka variabel yang berperan dalam memperoleh material baru didapat dari hasil identifikasi dan karakterisasi bahan baku serta bahan aditif, sementara teknologi rekayasa dilibatkan sebagai variabel bebas (*independent*). Variabel respons (*dependent*) diperoleh melalui identifikasi dari karakterisasi material baru yang diinginkan.



Sumber: Agustinus (2017)

**Gambar 21.** Bagan Alir Eksperimen Model Rekayasa Benefisiari sebagai Konfirmasi terhadap Hipotesis

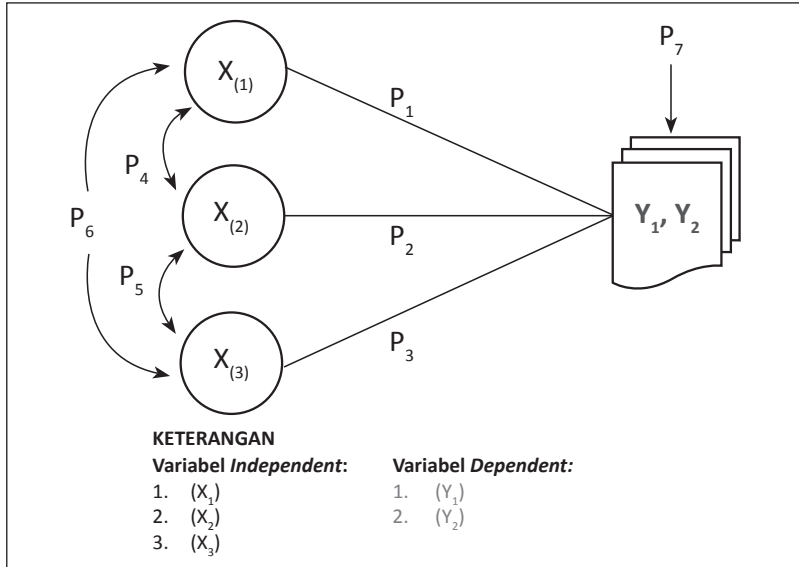


Melalui desain eksperimen dengan metode *factorial design*, dapat diketahui parameter yang berpengaruh. Sementara itu, dengan metode rancang acak lengkap (RAL), parameter optimal dapat diketahui (Supardi, 2013). Hasil eksperimen selanjutnya dianalisis secara statistik untuk uji validasi dan verifikasi hipotesis (Supardi, 2013; Sudjana, 1980). Sebagai gambaran, eksperimen yang dilakukan menggunakan metode *design factorial 2<sup>3</sup>* mengandung arti dua level dari tiga faktor. Ketiga faktor tersebut adalah parameter teknologi rekayasa terpilih yang berpengaruh dalam peningkatan nilai tambah. Ketiga faktor ini terdiri atas dua level, yakni level rendah dan level tinggi yang keduanya berperan sebagai variabel bebas (*independent*). Indikator eksperimen adalah parameter karakteristik produk material baru yang hendak dituju, yang berperan sebagai variabel respons (*dependent*). Secara umum, korelasi antara variabel bebas (*independent*) dan variabel respons (*dependent*) dijelaskan pada Tabel 2 dan Gambar 22, yang menggambarkan pola jalur analisis desain faktorial  $2^3$  (dua level dari tiga faktor).

**Tabel 2.** Desain Faktorial  $2^3$  (dua level dari tiga faktor) dengan Enam Replikasi

DESAIN FAKTORIAL ( $2^3$ )		FAKTOR ( $X_1$ )			
		$X_{(1-a)}$		$X_{(1-b)}$	
		FAKTOR ( $X_2$ )			
		$X_{(2-a)}$	$X_{(2-b)}$	$X_{(2-a)}$	$X_{(2-b)}$
FAKTOR ( $X_3$ )	$X_{(3-a)}$	1 $Y_1, Y_2$	3 $Y_1, Y_2$	5 $Y_1, Y_2$	7 $Y_1, Y_2$
	$X_{(3-b)}$	2 $Y_1, Y_2$	4 $Y_1, Y_2$	6 $Y_1, Y_2$	8 $Y_1, Y_2$

Sumber: Sudjana (1980)



Sumber: Sudjana (1980)

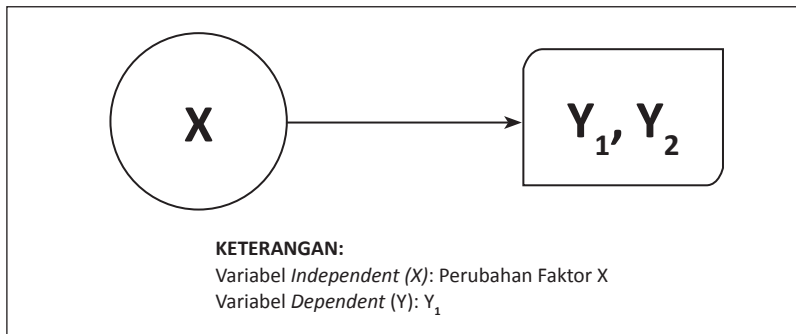
**Gambar 22.** Pola Jalur Analisis Desain Faktorial 2<sup>3</sup> (dua level dari tiga faktor)

Guna mengetahui parameter teknologi rekayasa pada kondisi optimal, dilakukan eksperimen dengan metoda rancang acak lengkap (RAL), dan satu faktor terdiri atas enam level. Satu faktor tersebut adalah parameter terpilih yang paling berpengaruh dalam peningkatan nilai tambah terdiri atas enam level, yang berperan sebagai variabel bebas (*independent*). Indikator eksperimen adalah parameter karakteristik produk material baru yang hendak dituju, yang berperan sebagai variabel respons (*dependent*). Secara umum, korelasi antara variabel bebas (*independent*) dan variabel respons (*dependent*) diilustrasikan pada Tabel 3 dan Gambar 23, yang menggambarkan pola jalur analisis rancang acak lengkap satu variabel bebas terdiri atas enam level dan dua variabel respons dengan tiga replikasi.

**Tabel 3.** Rancang acak lengkap (RAL) satu variabel bebas terdiri atas enam level dan dua variabel respons dengan tiga replikasi.

VARIABEL RESPON	VARIABEL BEBAS					
	Faktor (X)					
	(X <sub>1</sub> )	(X <sub>2</sub> )	(X <sub>3</sub> )	(X <sub>4</sub> )	(X <sub>5</sub> )	(X <sub>6</sub> )
(Y <sub>1</sub> )	(X <sub>1</sub> Y <sub>1</sub> )	(X <sub>2</sub> Y <sub>1</sub> )	(X <sub>3</sub> Y <sub>1</sub> )	(X <sub>4</sub> Y <sub>1</sub> )	(X <sub>5</sub> Y <sub>1</sub> )	(X <sub>6</sub> Y <sub>1</sub> )
(Y <sub>2</sub> )	(X <sub>1</sub> Y <sub>2</sub> )	(X <sub>2</sub> Y <sub>2</sub> )	(X <sub>3</sub> Y <sub>2</sub> )	(X <sub>4</sub> Y <sub>2</sub> )	(X <sub>5</sub> Y <sub>2</sub> )	(X <sub>6</sub> Y <sub>2</sub> )

Sumber: Supardi (2013)



**Gambar 23.** Pola jalur analisis rancang acak lengkap satu variabel bebas terdiri atas enam level dan dua variabel respons dengan tiga replikasi.

Model rekayasa benefisiasi ini pada akhirnya dapat diterapkan sebagai metode pemrosesan mineral, batuan, dan batu bara dengan berbagai perbedaan parameter yang berperan sebagai variabel bebas (*independent*) maupun sebagai variabel respons (*dependent*). Perlu diketahui, suatu metode baru untuk dapat diakui atau diterima tidaklah mudah, perlu dilakukan pengujian di lapangan melalui implementasi.

#### D. STRATEGI REKAYASA BENEFISIASI

Secara strategis, rekayasa benefisiasi hanya menghasilkan material baru karena semua bahan telah diformulasikan sedemikian rupa sehingga hampir tidak ada material yang terbuang. Di samping teknologi yang

sederhana, biaya operasionalnya juga relatif murah sehingga dapat diimplementasikan ke masyarakat industri. Sebelum diimplementasikan ke masyarakat industri, rekayasa benefisasi perlu diuji. Hal ini perlu dilakukan karena tidak semua jenis mineral mempunyai peluang yang sama untuk bisa dilakukan peningkatan nilai tambah.

Secara umum, perbedaan metode pemrosesan mineral dan batuan serta korelasinya terhadap jenis produk yang dihasilkannya diilustrasikan pada Tabel 4. Pada tabel tersebut diperlihatkan bahwa benefisasi mineral atau pengolahan dan pemurnian secara ekonomi menguntungkan, tetapi hanya menghasilkan produk antara yang perlu pemrosesan lebih lanjut. Sementara itu, hasil akhir rekayasa benefisasi ialah produk baru berupa material fungsional yang berorientasi pada pengaplikasiannya.

**Tabel 4.** Korelasi Metode Pengolahan, Bahan Baku, dan Produk yang Dihasilkannya

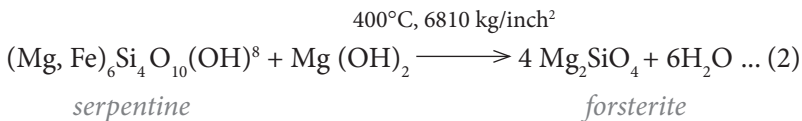
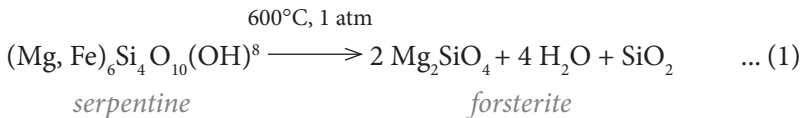
	Metode	Bahan	Produk
<b>Teknologi Benefisasi</b>	Pengolahan/ Pemrosesan	Mineral logam	Produk antara berupa konsentrat sebagai bahan baku industri berbasis mineral dan atau sebagai umpan proses selanjutnya.
		Mineral bukan logam	
		Batuan	Produk antara sebagai bahan baku industri
	Pemurnian	Konsentrat mineral logam	Produk antara berupa <i>metal alloy</i> untuk proses selanjutnya.
	Rekayasa Benefisasi	Mineral/batuan dengan menambahkan sejumlah bahan aditif, baik berupa bahan organik maupun bahan anorganik.	Material baru berupa material fungsional yang berorientasi pada pengaplikasiannya.

## E. PENERAPAN REKAYASA BENEFISIASI

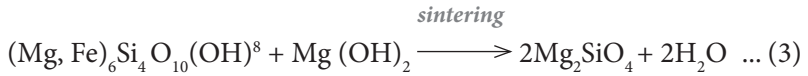
Studi kasus penerapan rekayasa benefisiasi untuk peningkatan nilai tambah mineral, batuan, dan batu bara merupakan hasil penelitian selama lima belas tahun terakhir ketika penulis bekerja di Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI. Ruang lingkup kajian mencakup mineral bukan logam (zeolit dan bentonit); batuan; mineral ikutan dan/atau limbah dari produksi panas bumi (silika amorf), dan modifikasi karbon aktif batu bara. Kajian ini mengemukakan latar belakang, alur pikir dan permasalahan, solusi yang ditawarkan, dan manfaat hasil penelitian dalam proses pembuatan prototipe produk Forsterite, Atapulgit Sintetis, Zeokeramik, GEM, MPMO, Geomaterial (*Geopolymer*), dan SMAC.

### 1. Forsterite berbahan baku Serpentine

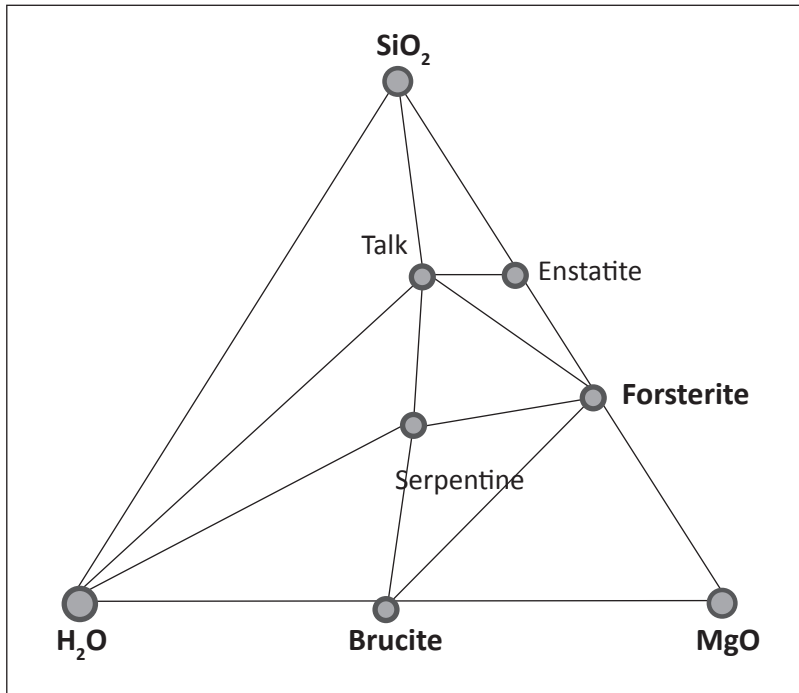
Batuan serpentine tergolong batuan ultrabasa yang didominasi oleh mineral serpentin dan mengandung mineral pengotor, seperti khlorite. Kandungan Mg yang cukup tinggi menjadikan serpentine berpotensi sebagai bahan baku *refractory* jenis forsterite. Korelasi antara mineral serpentine dan forsterite serta mineral lainnya digambarkan dalam diagram sistem  $\text{MgO-Si}_2\text{-H}_2\text{O}$  pada Gambar 24. Forsterite ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) dan Fayalite ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) termasuk kelompok batuan *olivine* yang dapat diperoleh melalui pemanasan dengan mengacu persamaan reaksi (Deer, Howie, & Zussman, 1966):



Penambahan bahan aditif berupa MgO dilakukan melalui pemanasan dengan mengacu persamaan Budnikov 1964 sehingga diperoleh persamaan:



Dengan demikian, dapat dibentuk forsterite dengan cara menambahkan  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  dengan komposisi tertentu melalui pemanasan sekitar  $400^\circ\text{C}$ .

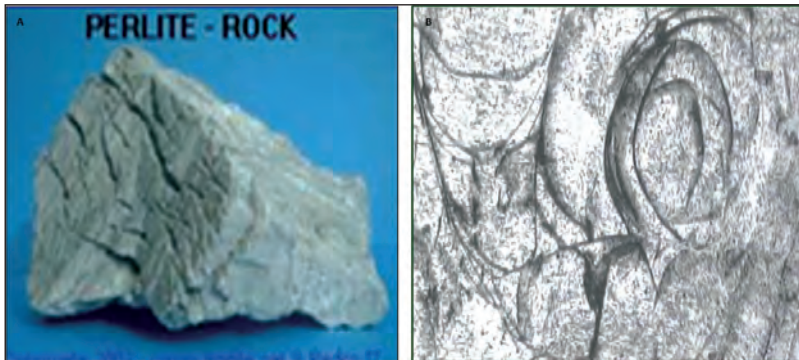


Sumber: Zulkarnaen dan Agustinus (1996)

**Gambar 24.** Diagram Sistem MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O

## 2. Atapulgit Sintesis Berbasis Batuan Gelas Vulkanik

Walaupun obsidian dan tuf termasuk komoditas batuan gelas vulkanik, yang akan dibahas dalam studi kasus ini hanyalah perlit. Secara ilmiah, perlit didefinisikan sebagai batuan gelas vulkanik yang mempunyai struktur konsentris (mengulit bawang) dan berkilap mutiara (Gambar 25). Berbeda dengan batuan gelas vulkanik lainnya, perlit mengandung lebih banyak air terikat (*combined water*). Secara komersial, perlit didefinisikan sebagai gelas vulkanik yang mengandung 70%  $\text{SiO}_2$  dan apabila dipanaskan sampai zona temperatur leburnya, volumenya akan mengembang sebesar 4–20 kali lipat volume semula. Karena sifat perlit yang ringan, tahan api, dan sebagai insulator yang baik, perlit digunakan sebagai bahan bangunan (Johnstones & Johnstones, 1961). Sebagai gambaran, perlit di Amerika Serikat digunakan sebagai bahan *plaster* (76%), *concrete aggregate* (10%), *oil drilling mud* (6%), dan *filter aid* (2%) (Kelly & Spottiswood, 1982). Kini perlit dikembangkan oleh The Perlite Institute Inc., dan digunakan sebagai isolasi penyekat, bahan abrasif, senyawa mendempul, alat bantu filter, penggunaan pengecoran, penyerap minyak dan minyak, pengisi lembam, penutup sendok, pengepresan cat, produk tahan api, dan pengondisi tanah.



Sumber: Ismayanto dan Agustinus (2007)

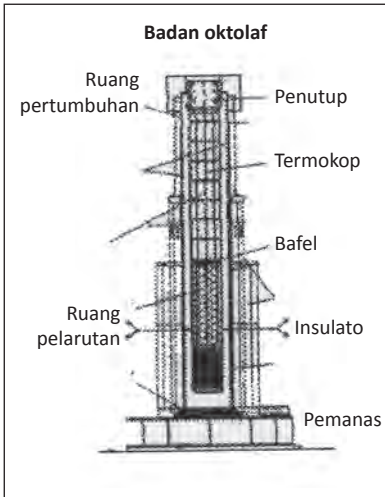
**Gambar 25.** Batuan perlit (a) dan foto mikroskop sayatan tipis dilihat dari mikroskop polarisasi (b) memperlihatkan struktur mengulit bawang.

Beberapa jenis batuan gelas vulkanik ditemukan di Indonesia, misalnya gelas tuf, obsidian, dan perlit di Karangnunggal dan Tasikmalaya, Jawa Barat. Penggunaan perlit di Indonesia masih terbatas sebagai bahan baku industri bangunan, khususnya sebagai agregat beton ringan. Oleh karena itu, perlit Karangnunggal berpotensi untuk diberikan nilai tambah (Ismayanto & Agustinus, 2007). Peningkatan nilai tambah perlit dilakukan melalui sintesis hidrotermal untuk memperoleh mineral atapulgit sintetis yang dapat berfungsi sebagai adsorben dalam industri farmasi dan obat-obatan. Sintesis hidrotermal merupakan teknik kristalisasi bahan atau material dari suatu larutan dengan kondisi suhu dan tekanan tinggi. Teknik ini dikenal dengan istilah metode hidrotermal. Hidrotermal semula merupakan istilah yang digunakan pada lingkungan kegiatan keilmuan geologi. Mineral atapulgit atau dengan kata lain adalah mineral *palygorskit* dengan rumus kimia  $(\text{Mg},\text{Al})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})\cdot 4(\text{H}_2\text{O})$  atau  $\text{Mg}_{1,5}\text{Al}_{0,5}\text{Si}_4\text{O}_{10}\cdot 4(\text{H}_2\text{O})$ . Komposisi kimia atapulgit secara ideal mengandung persentase berat oksida-oksida 14,70%  $\text{MgO}$ , 6,20%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 58,43%  $\text{SiO}_2$  dan 19,71%  $\text{H}_2\text{O}$ . Secara kristalografi, atapulgit termasuk sistem kristal *monoclinic-prismatic* (*H- symbol*  $(2/m)$  dan *space group*  $C 2/m$ ). *X-Ray diffraction* dicirikan oleh intensitas ( $I/I_0$ ): 3,23(1); 10,5(1); dan 4,49(0,8).

Terdapat faktor-faktor penting yang berperan dalam proses hidrotermal, yaitu komposisi bahan, suhu dan tekanan serta lama waktu pembentukannya. Permasalahannya adalah bagaimana mengubah batuan gelas perlit yang bersifat amorf menjadi atapulgit sintetis yang bersifat kristalin melalui sintesis hidrotermal skala laboratorium di dalam *autoclave*. Atapulgit berperan sebagai zat penyerap (adsorpsi) yang dapat menyerap bakteri atau kuman penyebab diare. Diare merupakan penyakit yang ditimbulkan oleh bakteri. Beberapa jenis bakteri yang terkonsumsi melalui makanan atau minuman yang terkontaminasi dapat menyebabkan diare, misalnya *Campylobacter*, *Salmonella*, *Shigella*, dan *Escherichia coli*. Ketika digunakan sebagai



obat diare, secara kimia-fisika atapulgit akan mengikat bahan-bahan asam dan racun di dalam perut dan sistem pencernaan. Atapulgit tidak diserap secara sistematis, tetapi dapat mengurangi cairan yang dibuang bersama kotoran dengan efek samping kecil. Oleh karena itu, atapulgit digunakan sebagai bahan baku obat diare. Sintesis hidrotermal sebagai metode sangat ditentukan oleh tingkat kelarutan suatu mineral dalam air yang bersuhu dan bertekanan tinggi. Baik bahan baku maupun bahan aditif dibuat dalam bentuk gel dengan menambahkan sejumlah bahan *organic templating agent* berupa *ethylenediamine (EDA)*. Proses pelarutan dan pertumbuhan kristal dilakukan dalam bejana tertentu yang disebut *autoclave* (Gambar 26) atau wadah dari baja yang tahan pada suhu  $400^{\circ}\text{C}$  dan tekanan tinggi 400 Bar. Pertumbuhan kristal terjadi karena adanya *gradient temperature*. Pada bagian yang lebih panas akan terjadi reaksi pelarutan, sedangkan pada bagian yang lebih dingin akan terjadi proses supersaturasi dan pengendapan kristal.



Sumber: Agustinus (2009a)

**Gambar 26.** Foto dan Bagan Penampang *Autoclave*

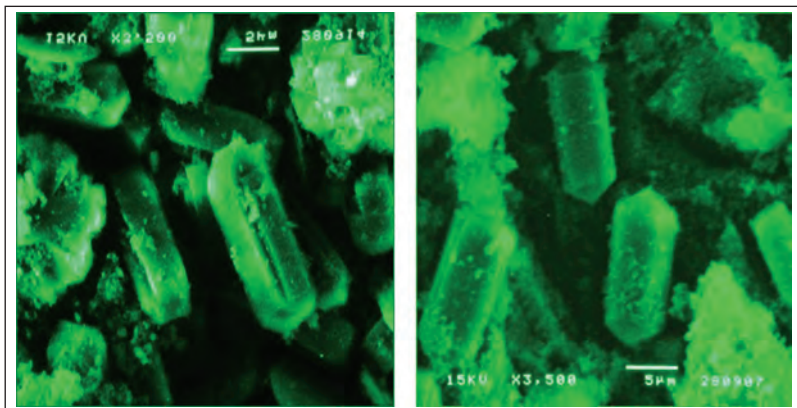
Formulasi material baru didasarkan pada karakteristik bahan baku dan karakteristik material yang hendak dituju dan dibuktikan melalui eksperimen di laboratorium yang melibatkan parameter teknologi rekayasa. Pelaksanaan eksperimen memuat dua faktor perlakuan yang diobservasi. Pertama, faktor perlakuan pelarutan yang meliputi ukuran butir, temperatur, dan rasio antara bahan baku (BB) dan bahan pelarut (BP) dalam rangka menghasilkan tingkat perolehan volume dan viskositas gel yang akan digunakan sebagai umpan proses hidrotermal. Kedua, faktor perlakuan proses hidrotermal (lamanya waktu reaksi dalam viskositas umpan dan temperatur yang ditetapkan) dalam rangka menghasilkan kuantitas dan kualitas produk. Kuantitas produk adalah tingkat perolehan produk yang dinyatakan dalam % berat, sedangkan kualitas produk dinyatakan dalam % daya serap terhadap *E. coli*, bakteri yang berperan sebagai variabel respons (*dependent*). Tingkat perolehan dapat diartikan sebagai perbandingan (*ratio*) antara berat produk (*output*) dan berat umpan (*feed*) sebagai *input* proses pengolahan yang dinyatakan dalam skala rasio (% berat). *Escherichia coli* (*E. coli*) adalah bakteri garam negatif yang berbentuk batang. Eksperimen dilakukan dengan dua model perlakuan, yakni model statis (tanpa pengadukan) dan model dinamis (dengan pengadukan).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa batuan perlit yang bersifat amorf dapat dibentuk menjadi mineral atapulgit sintesis yang bersifat kristalin. Hasil eksperimen model statis (tanpa pengadukan) selama 3 hari (72 jam) menghasilkan bentuk kristal tunggal monoklin prismatic yang mendekati bentuk ideal dari mineral palygorskite (atapulgite). Meskipun demikian, masih terdapat mineral silicalite lainnya dan bahkan masih ada yang bersifat amorf (Gambar 27). Kondisi tersebut menyebabkan rendahnya tingkat perolehan produk (23,43%) dan daya serap terhadap bakteri *E. coli* (43,0%). Hasil eksperimen model dinamis (melalui pengadukan) dengan lama waktu bervariasi (6–48 jam) menghasilkan bentuk kristal relatif membulat dan berbutir seragam

(Gambar 28). Hasil eksperimen ini bahkan lebih baik dibandingkan, misalnya, atapulgit alam impor. Lama waktu reaksi hidrotermal tidak berpengaruh secara signifikan terhadap tingkat perolehan produk, tetapi berpengaruh secara signifikan terhadap daya serap bakteri *E. coli*. Daya serap terhadap bakteri tergantung pada kualitas kristal yang dipengaruhi oleh faktor konkomitan. Faktor konkomitan adalah faktor-faktor yang tidak diperhitungkan sebagai variabel (kondisi tetap) eksperimen, tetapi berpengaruh terhadap hasil reaksi hidrotermal. Faktor konkomitan, yaitu temperatur, tekanan, viskositas gel, dan kondisi alat yang masih sulit dikontrol.

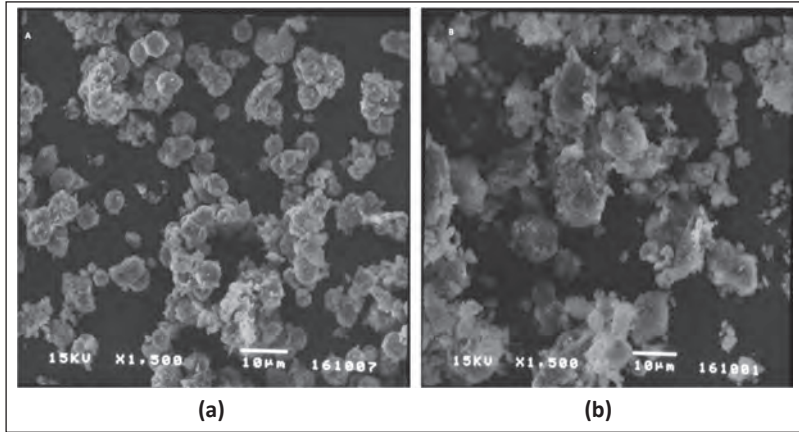
Kondisi optimal eksperimen model dinamis melalui interpolasi grafik polinomial dicapai dalam lama waktu kontak 13 jam. Dalam hal ini, tingkat perolehan produk sebesar 41,61% berat dan daya serap terhadap bakteri *E. coli* sebesar 89,92%.

Kedua model eksperimen belum sampai tahap tekno-ekonomi, tetapi sudah terlihat peruntukannya. Eksperimen model perlakuan statis lebih cocok diterapkan untuk keperluan studi, khususnya mengenai pengembangan bidang kristalografi dan mineralogi. Sementara itu, model perlakuan dinamis lebih cocok diimplementasikan ke bidang



Sumber: Agustinus (2009b)

**Gambar 27.** Foto Mikrograf SEM Hasil Eksperimen Model Statis



Sumber: Agustinus (2009b)

**Gambar 28.** Foto Mikrograf SEM Hasil Eksperimen Model Dinamis (a), dan Contoh Atapulgit Impor (b)

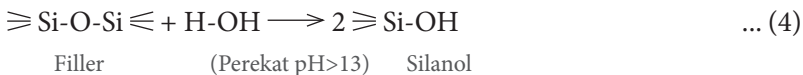
industri. Hasil penelitian ini dapat memberikan nilai tambah dan berpotensi untuk dijadikan bahan baku industri farmasi dan obat-obatan yang selama ini masih diimpor (Agustinus, 2009b).

### 3. Zeokeramik Berbasis Limbah Penambangan Zeolit

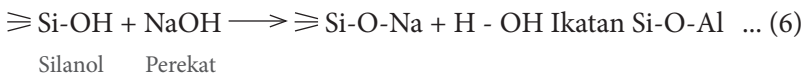
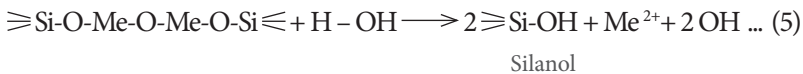
Zeolit tergolong mineral alumino tekto silikat. Pembentukan zeolit di alam tidak terlepas dari peranan aktivitas gunung api berumur tersier muda. Lebih dari 50 deposit zeolit ditemukan di Indonesia, dan kebanyakan dijumpai di Sumatra, Jawa, Sulawesi, Nusa Tenggara, dan Maluku. Zeolit yang digunakan sebagai matriks zeokeramik dalam studi kasus ini berasal dari Desa Cikancra, Kabupaten Tasikmalaya, Provinsi Jawa Barat. Zeolit ini mengandung jenis mineral mordenit dan klinoptilolit yang mempunyai daya serap air 9% sehingga dapat berfungsi sebagai adsorben.

Zeokeramik didefinisikan sebagai keramik bakaran rendah (150–200°C) dengan zeolit sebagai matriks. Sebagai bahan pengisi (*filler*), digunakanlah hasil pelapukan batuan rijang dari daerah Karangsambung, Kabupaten Kebumen, Provinsi Jawa Tengah. Bahan pengikat (*binder*) terdiri atas campuran abu terbang batu bara (*fly ash*) dengan *water glass* dan air. *Fly ash* berperan sebagai sumber  $Al_2O_3$  dan *water glass* sebagai sumber  $SiO_2$  dan kation  $Na^+$  yang berperan sebagai katalis yang membentuk mikro struktur keramik yang kuat dan keras. Badan keramik yang kuat dan keras disebabkan oleh pembentukan ikatan Si-O-Al melalui persamaan reaksi (Kelly & Spottiswood, 1982):

Ikatan Si-O tanpa kation:



Ikatan Si-O dengan kation:



Ikatan Si-O dari bahan baku bereaksi dengan H-OH dari bahan perekat, kemudian membentuk ikatan silanol Si-OH. Ikatan Si-OH melepaskan ion  $H^+$  dan digantikan ion  $Na^+$  dari NaOH membentuk Si-ONa, dengan cara yang sama, Al dari *filler* membentuk ikatan Si-O-Al yang keras dan kuat.

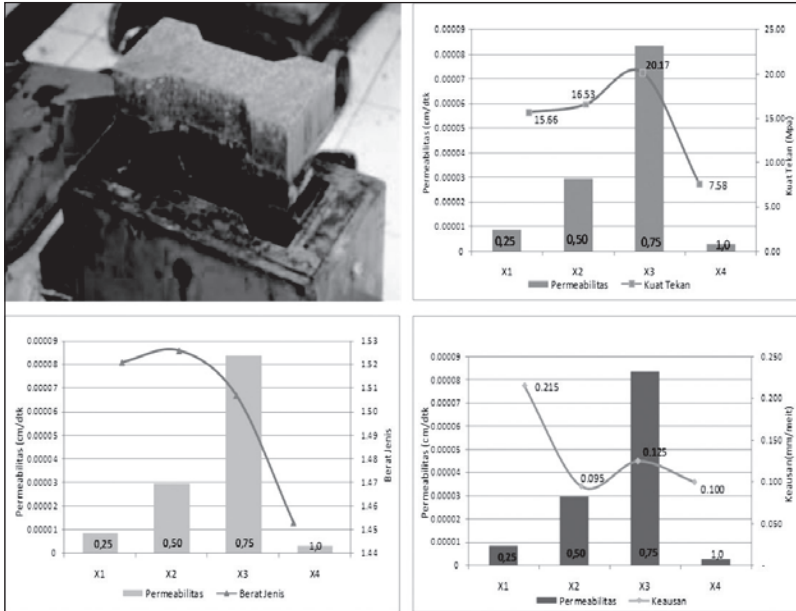
Pembentukan zeokeramik dilakukan dengan variabel bebas berupa kuat cetak tekan ( $kg/cm^2$ ); konsentrasi zeolit (%), suhu pemanasan ( $^{\circ}C$ ) dengan indikator berupa penyerapan air (%) berperan sebagai variabel respons. Hasil eksperimen selengkapnya disajikan pada Tabel 5, yang menunjukkan bahwa kondisi optimum dicapai pada rasio zeolit/rijang: 70/30, tekanan 200  $kg/cm^2$ , suhu pemanasan 200°C selama 24 jam dengan penyerapan air 20,56 %.

**Tabel 5.** Korelasi Antarvariabel Optimasi Zeokeramik

No	Variabel bebas ( <i>independent</i> )			Variabel Respons
	Konsentrasi Zeolit (%)	Tekanan (kg/cm <sup>2</sup> )	Suhu bakaran (°C)	Penyerapan air (%)
1	100	100	150	27,85
2		150		27,71
3		200		25,93
4	70/30	100	150	22,42
5		150		21,44
6		200		20,56
7	60/40	100	150	21,56
8		150		21,17
9		200		20,81
10	0	200	150	8,84

Sumber: Agustinus (2007)

Hasil penelitian pendahuluan zeokeramik ini dilanjutkan di Pusat Penelitian Geoteknologi dan di UPT Jampang Kulon, Sukabumi, Provinsi Jawa Barat. Hasil penelitian menghasilkan prototipe zeokeramik suhu bakar rendah (150–200°C) yang dapat digunakan sebagai bahan bangunan konstruksi ringan (Agustinus, 2007). Di samping itu, zeokeramik juga telah dikembangkan menjadi bahan bangunan ramah lingkungan karena bahan bakunya berasal dari limbah penambangan zeolit dan abu terbang (*fly ash*) PLTU Suralaya (Arifin & Hartanto, 2011). Pada perkembangan terakhir, diperoleh *paving block* dengan nilai kuat tekan dan daya serap terhadap air memadai untuk digunakan sebagai material penutup pelataran parkir atau perumahan (Hartanto, 2016). Prototipe produk *paving block* dan korelasinya dengan nilai kuat tekan, densitas, keausan terhadap nilai permeabilitas disajikan pada Gambar 29. Korelasi antara permeabilitas dan sifat fisik zeokeramik menunjukkan bahwa komposisi penambahan 0,75 liter RHA mempunyai sifat fisik yang paling ideal dengan nilai permeabilitas paling baik, yaitu sebesar  $8,35^{-5}$  cm/detik. Penggunaan zeokeramik ini dapat mengurangi air larian sehingga semakin banyak air yang meresap ke tanah.



Sumber: Arifin dan Hartanto (2011)

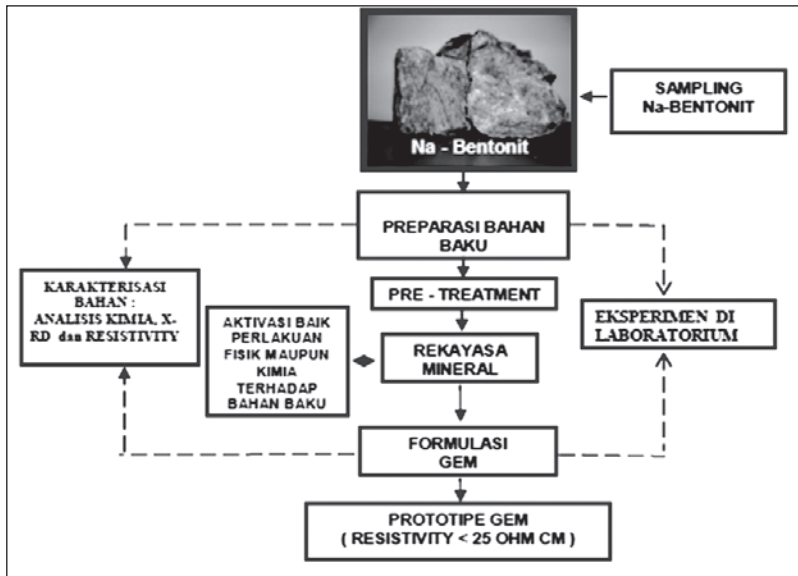
**Gambar 29.** Prototipe *Paving Block* dan Karakteristiknya

#### 4. GEM Berbasis Na-Bentonit

*Ground enhancement material (GEM)* adalah material komposit yang digunakan sebagai *back fill* di antara dinding tanah dan bagian batang (*rod*) penangkal petir yang tertanam di dalam tanah. GEM berfungsi meredam dan meneruskan tegangan sambaran petir (*lightning strike*) sehingga dapat mengurangi kerusakan-kerusakan yang ditimbulkan (Agustinus, Sembiring, & Listiyowati, 2010), misalnya peralatan elektronik yang sensitif, sistem komunikasi, sistem komputer serta LAN dan WAN yang sensitif akibat penyimpangan arus netral yang berlipat ganda setelah sambaran petir. Walaupun GEM telah banyak digunakan di Indonesia, hingga kini kebutuhan GEM masih dipenuhi dengan cara impor. Penelitian yang dilakukan bertujuan mengantisipasi kebutuhan material tersebut dengan memanfaatkan mineral bentonit

dari Karangnunggal, Tasikmalaya. Metode yang digunakan adalah eksperimen di laboratorium dengan parameter fisik dan kimia serta melibatkan teknologi rekayasa.

Secara konseptual, GEM dapat diformulasikan melalui tiga jenis bahan, yakni bahan baku utama, bahan aditif, dan bahan pengikat yang berperan sebagai variabel bebas (*independent*). Sebagai indikator, GEM nilai *resistivity*-nya rendah, yakni  $<25$  Ohm cm (Agustinus, Sembiring, & Listiyowati, 2010), dan berperan sebagai variabel respons (*dependent*). Bahan baku utama GEM ialah Na-bentonit karena memiliki volume pori yang besar sehingga mampu menyerap dan menyimpan air. Karbon aktif (*charcoal*) berperan sebagai bahan aditif yang dapat meningkatkan daya serap air karena bersifat higroskopis. Untuk menurunkan nilai pH, perlu ditambahkan garam NaCl dan *water glass* yang dapat berfungsi sebagai bahan pengikat (semen). Tahapan penelitian secara lengkap disajikan pada Gambar 30.



Sumber: Agustinus (2010)

**Gambar 30.** Bagan Alir Pembentukan Prototipe GEM



Pada bagan alir tersebut, diperlihatkan tahapan penyiapan bahan dan peralatan eksperimen dan karakterisasi bahan dan teknologi rekayasa untuk memperoleh formula dan prototipe GEM. Pengukuran indikator prototipe GEM dilakukan dengan menggunakan *soil resistivity meter* seperti diperlihatkan pada Gambar 31.

Hasil eksperimen secara berturut-turut menunjukkan bahwa aktivasi fisik Na-bentonit pada suhu 300°C akan menurunkan nilai *resistivity* dari 514 Ohm cm menjadi 227 Ohm cm. Selanjutnya, aktivasi kimia Na-bentonit dengan 0,1 M NaOH dapat menurunkan nilai *resistivity* menjadi 164 Ohm cm. Penambahan air sebanyak 36% dapat menurunkan nilai *resistivity* menjadi 28,0 Ohm cm. Formula yang terdiri atas 70% Na-bentonit, 25% *charcoal*, dan 5% *water glass* akan memperoleh nilai *resistivity* 20,6 Ohm cm yang dipengaruhi oleh



Sumber: Agustinus, Sembiring, dan Listiyowati (2010)

**Gambar 31.** *Soil Resistivity Meter* dan Benda Uji GEM

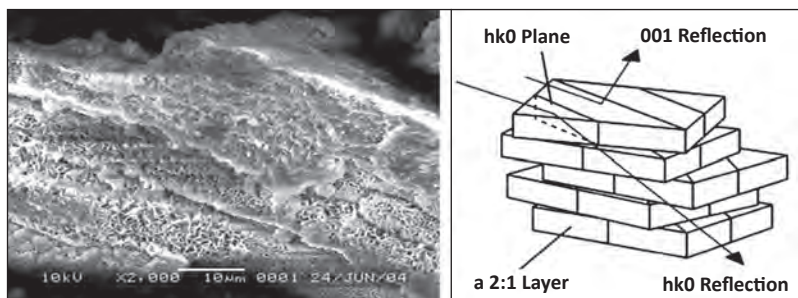
fungsi waktu. Penambahan 6,0% NaCl akan memberikan nilai *resistivity* 16,4 Ohm cm. Berdasarkan hasil eksperimen tersebut, dilakukan reformulasi GEM dalam bentuk tepung yang terdiri dari 70% Na-bentonit, 24% *charcoal*, dan 6% garam NaCl. Dalam aplikasinya, perlu ditambahkan 5% *water glass* dan 36% air sehingga membentuk *slurry* dan dituangkan ke dalam paritan atau lubang bor, lalu dibiarkan mengering. Nilai *resistivity* 16,4 Ohm cm telah memenuhi persyaratan standar <25 Ohm cm. Secara ekonomi, peningkatan nilai tambah diilustrasikan bahwa harga jual Na-bentonit di lokasi tambang hanya Rp700/kg, sementara bahan aditif mudah diperoleh di pasar dengan harga yang relatif murah. Sementara itu, harga produk GEM impor mencapai sekitar Rp1.750.000/sak (25 lb) atau Rp140.000/kg. Dengan demikian, prototipe GEM menjadi lebih berpeluang sebagai substitusi GEM impor.

## 5. MPMO Berbasis CA-Bentonit

Penelitian ini dilatarbelakangi modernisasi industri berbasis petrokimia yang tumbuh dan berkembang secara cepat. Pada 2009, di Jawa Barat terdapat 201.953 unit Industri, dan 85%-nya merupakan industri yang mengeluarkan limbah cair organik (Sembiring & Agustinus, 2012). Limbah cair organik tersebut berbahaya bagi makhluk hidup karena berpotensi menimbulkan berbagai penyakit, seperti penyakit kulit, kanker, dan sebagainya (Fair, Geyer, & Okun, 1968). Penanganan limbah cair organik dapat dilakukan secara biologi dengan menggunakan mikroorganisme (bakteri) yang mampu mendegradasi senyawa organik menjadi unsur-unsur penyusun yang lebih sederhana dan tidak berbahaya bagi lingkungan, misalnya MPMO kultur tablet (Sembiring & Agustinus, 2012).

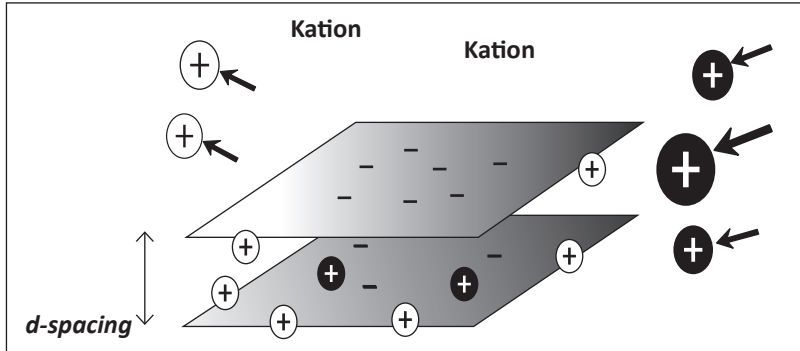
Material Preservasi Mikroorganisme (MPMO) merupakan sistem penyimpanan bakteri pengurai limbah cair organik kultur tablet yang mampu bertahan dalam jangka waktu 1–5 tahun. Ca-bentonit

berperan sebagai media (cangkang) untuk mengisolasi bakteri. Mikroorganisme yang dikembangkan adalah bakteri jenis *aerobic*, *Bacillus licheniformis* sp. Penggunaan MPMO kultur tablet dapat memberikan kemudahan bagi pengguna mikroorganisme (bakteri), terutama pada pengolahan limbah cair organik metode biologi dalam unit Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Kini terdapat sediaan mikroorganisme dalam bentuk lain (bentuk kultur cair dan kultur serbuk/powder), tetapi masih mempunyai kelemahan. Sediaan kultur cair mempunyai waktu simpan yang relatif singkat (3–6 bulan), sedangkan sediaan kultur serbuk dapat menimbulkan permasalahan infeksi saluran pernafasan. Oleh karena itu, penelitian tentang pembuatan sediaan mikroorganisme kultur tablet dan atau *pellet* berbasis Ca-bentonit dengan melibatkan teknologi rekayasa menjadi penting untuk direalisasikan. Bentonit termasuk kelompok mineral alumino filo silikat, terdapat dua jenis bentonit, yakni Na-bentonit dan Ca-bentonit. Terbentuknya bentonit di alam bisa diakibatkan oleh proses pelapukan, alterasi hidrotermal, transformasi, dan sedimentasi. Secara mikroskopis, terlihat bahwa bentonit mempunyai mikrostruktur *layer* (Gambar 32) sehingga memungkinkan volume rongga untuk diperbesar melalui proses interkalasi. Secara konseptual, Ca-bentonit memungkinkan volume rongga untuk diperbesar menjadi  $28,1598 \text{ \AA}^\circ$ , melalui proses interkalasi seperti dilustrasikan pada Gambar 32. Ter-



Sumber: Agustinus, Sembiring, dan Listiyowati (2010)

**Gambar 32.** Ilustrasi Mikrostruktur Layer Bentonit Dilihat dari Mikroskop Polarisasi



Sumber: Agustinus, Sembiring, dan Listiyowati (2010)

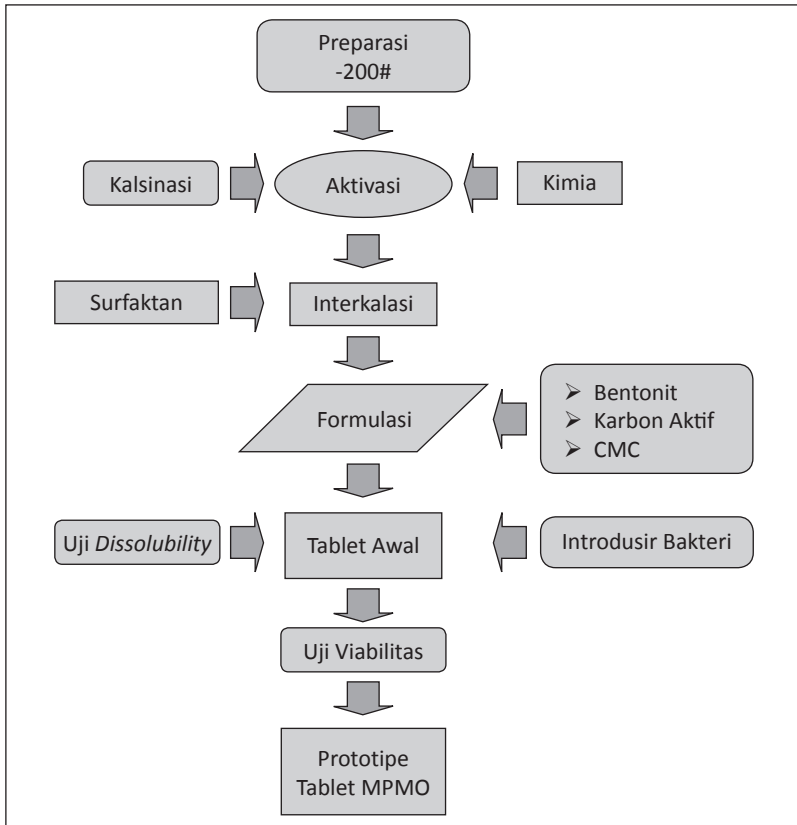
**Gambar 33.** Mekanisme Pembesaran Pori melalui Interkalasi

jadinya pembesaran rongga bentonit memungkinkan mikroorganisme (*B. lincheniformis sp.*) tinggal dalam rongga pori tersebut. Hal ini disebabkan oleh diameter mikroorganisme yang lebih kecil (0,04–0,07 mikron).

Mekanisme berpindahnya mikroorganisme ke dalam rongga pori mineral bentonit dapat terjadi melalui proses adsorpsi. Perpindahan mikroorganisme disebabkan bentonit bersifat hidrofobik, sedangkan mikroorganisme bersifat nonpolar. Perbedaan tersebut mengakibatkan mikroorganisme dapat menempel pada permukaan rongga pori dari bentonit secara adsorpsi. Adsorpsi akan terus berlangsung hingga seluruh mikroorganisme dapat tersebar luas secara merata dan atau mencapai keadaan setimbang.

Pembentukan prototipe MPMO dilakukan dengan tahapan pada Gambar 34. Tahapan tersebut terdiri atas preparasi Ca-bentonit, aktivasi (baik secara kalsinasi maupun dengan cara kimia), interkalasi dengan surfaktan, formulasi, uji *dissolubility*, introduksi bakteri dan uji viabilitas serta pencetakan tablet MPMO (Sembiring & Agustinus, 2012; Agustinus, Sembiring & Effendi, 2014).

Preparasi dimaksudkan sebagai penyeragaman ukuran butir untuk memperoleh fraksi ukuran butir -200 mesh. Aktivasi dengan cara



Sumber: Sembiring dan Agustinus (2012)

**Gambar 34.** Bagan Alir Pembentukan Prototipe Tablet MPMO

pemanasan bentonit bertujuan meningkatkan daya serap. Mekanisme yang terjadi adalah penguapan *moisture content* dan *volatile matter*. Dalam proses pemanasan, kenaikan temperatur harus bertahap untuk menghindari kerusakan struktur bentonit. Proses aktivasi secara kimia dengan metode *batch* dilakukan dengan menggunakan HCl 10% dengan waktu retensi 3–4 jam. Kultivasi mikroorganisme dimaksudkan untuk memperbanyak koloni melalui pembiakan bibit mikroorganisme dalam sebuah reaktor skala laboratorium. Pertumbuhan mikroorganis-

me akan terjadi dengan menambahkan media/bahan nutrisi, seperti karbohidrat, bahan protein, dan mineral. Mikroorganismenya tersebut dapat tumbuh baik jika suhu, pH, oksigen, dan pengadukannya terjaga dengan baik pula. Adsorpsi mikroorganismenya dengan menggunakan *carrier* bentonit tidak dapat langsung digunakan, tetapi perlu persiapan supaya *carrier* tidak mengganggu dan mengubah sifat-sifat mikroorganismenya, baik secara kualitatif maupun kuantitatif. *Carrier* yang digunakan adalah bentonit teraktivasi karena bersifat adsorben dan tingkat kelembabannya 40%–60% sehingga mudah terdesorpsi. Hal ini memudahkan mikroorganismenya berkembang biak pada limbah cair organik yang akan diolah. Proses adsorpsi mikroorganismenya oleh bentonit dilakukan dalam bioreaktor berbentuk *mix tank adsorption*. Berdasarkan formula yang telah ditentukan, dilakukan pembuatan tablet/*pellet* dengan alat pres tablet.

Pembuatan prototipe tablet dilakukan dengan mempertimbangkan parameter-parameter yang meliputi tekanan, tingkat plastisitas,



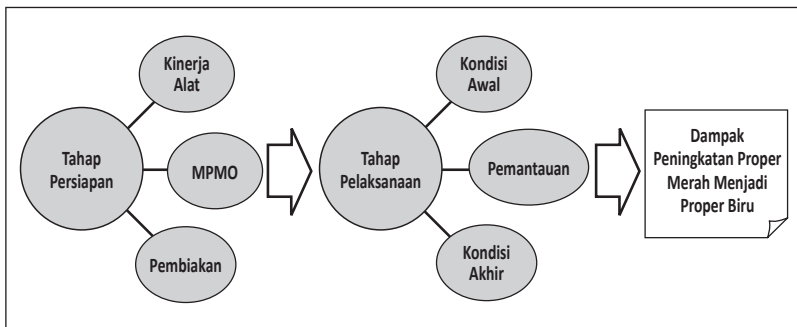
Sumber: Sembiring dan Agustinus (2012)

**Gambar 35.** Prototipe Produk MPMO Kultur Tablet

dan cara pengeringan. Pengukuran tingkat *dissolubility* dilakukan dengan metoda *batch*. Uji viabilitas mikroorganisme dilakukan untuk melihat jumlah mikroorganisme yang masih hidup setelah tinggal dalam preservasi mineral bentonit terinterkalasi dengan selang waktu tertentu.

Implementasi MPMO telah dilakukan terhadap limbah cair organik, Unit IPAL Pabrik Gula, Sindanglaut Cirebon (Agustinus, Sembiring & Effendi, 2014). Tahapan kegiatan meliputi tahap persiapan dan tahap pelaksanaan mulai dari pengukuran parameter fisika dan kimia pada kondisi awal, masa pemeliharaan (pemantauan), hingga pada kondisi akhir IPAL. Tahapan implementasi MPMO seperti disajikan pada Gambar 36.

Pengembangbiakan bakteri dilakukan di dalam kolam Aerasi 1 dengan kapasitas 200 m<sup>3</sup> yang diisi air sampai 150 m<sup>3</sup>. Sebagai media pertumbuhan bakteri, digunakan tetes tebu sebagai sakarosa atau glukosa, sedangkan pupuk ZA dan NPK digunakan sebagai sumber Nitrogen dan Posfor (Agustinus, Sembiring & Effendi, 2014). Prosedur pembiakan bakteri dilakukan dengan menambahkan larutan tetes tebu sebanyak 60 kg atau sebanyak 2 jerigen dengan masing-masing berisi



Sumber: Agustinus, Sembiring, dan Effendi (2014)

**Gambar 36.** Bagan Alir Implementasi MPMO dalam Unit IPAL PG Sindanglaut

20 liter. Kemudian, larutkan ZA dengan kemurnian 60% sebanyak 14,1 kg dan NPK nisbah 30:30:30 sebanyak 0,2 kg (Sembiring & Agustinus, 2012). Air di dalam kolam diaerasi selama 30 menit agar merata ketika diaduk. Bakteri *Bacillus licheniformis* dalam MPMO berbentuk pasta lalu disuspensikan dengan air kolam Aerasi I dalam ember. Suspensi dibuat secara bertahap sampai jumlah MPMO mencapai 200 Kg, dan pH air kolam diukur, diamati, dan dijaga pada kondisi pH 7. Selanjutnya, ditambahkan Molases, ZA, dan NPK setiap hari sampai nilai SV 30 mencapai 150 ml/L. Kegiatan pemberian nutrisi dan aktivitas penanaman mikroorganismenya di Unit IPAL pabrik gula Sindanglaut, Cirebon, diperlihatkan pada Gambar 37.



Sumber: Agustinus, Sembiring, dan Effendi (2014)

**Gambar 37.** Pemberian Nutrisi dan Penanaman Mikroorganismenya di Unit IPAL PG. Sindanglaut, Cirebon



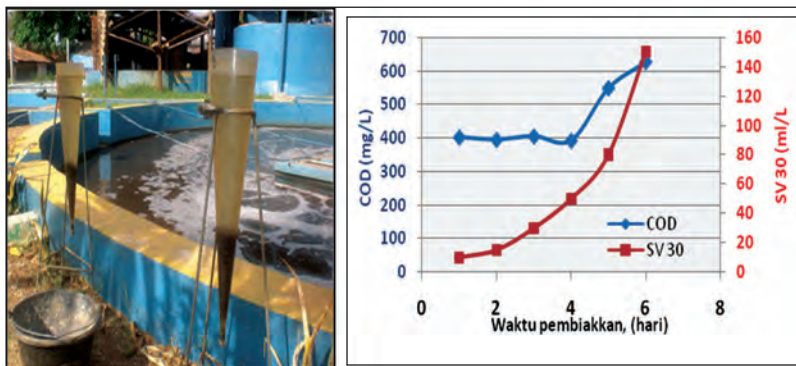
Pada tahap pelaksanaan, dilakukan pengukuran parameter fisika dan kimia yang meliputi temperatur, pH, DHL, turbiditas, konduktivitas, salinitas, TSS, BOD, dan COD yang digunakan untuk pemantauan kondisi awal, masa pemeliharaan, hingga kondisi akhir IPAL. Hasil pengukuran karakteristik limbah cair pada bagian *inlet* unit IPAL sebelum pemrosesan limbah cair, disajikan pada Tabel 6. Tabel tersebut menunjukkan bahwa limbah cair mempunyai nilai TSS, BOD, COD, dan kandungan minyak/lemak melebihi nilai baku mutu yang dipersyaratkan SK Men LH No. 51 Tahun 1995 dan SK Gubernur Jawa barat No. 6 Tahun 1999.

Guna melihat pertumbuhan bakteri, dilakukan pengamatan setelah tujuh hari berjalan dan hasil pertumbuhan bakteri ditunjukkan pada Gambar 38. Data tersebut menunjukkan bahwa kurva pertumbuhan bakteri cukup baik (nutrisi disuplai setiap hari dengan konsentrasi 400 mg/L). Hal ini karena terjadi peningkatan biomassa (dalam hal ini jumlah bakteri) sesuai dengan bertambahnya jumlah bahan makanan (nutrisi) dan aerasi yang diberikan. Kondisi tersebut terlihat pada hari ketujuh dengan tercapainya keseimbangan antara nilai COD dan nilai SV-30. Nilai SV-30 telah mencapai nilai 150 ml/L, artinya sudah memenuhi target jumlah bakteri untuk proses pengolahan (nilai baku SV-30 berkisar antara 100–400 ml/L).

**Tabel 6.** Karakteristik Awal Limbah Cair di Dalam IPAL

No	Parameter fisik IPAL	Satuan	Hasil pengujian	Bakumutu	Metoda pengujian
1	Temperatur	°C	32,56	-	SNI-06-6989.23-2005
2	TSS	mg/L	173,0	100	SNI-06-6989.3-2004
3	pH	-	6,58	6 – 9	SNI-06-6989.11-2004
4	BOD	mg/L	2.356	100	SNI-06-6989.14-2004
5	COD	mg/L	2.957	250	APHA Ed21.5220C 2005
6	Sulfida sebagai S	mg/L	0,26	0,5	SNI-06-6975. -2002
7	Minyak/lemak	mg/L	18,9	5	APHA Ed21.5220C 2005

Sumber: Agustinus, Sembiring, dan Effendi (2014)

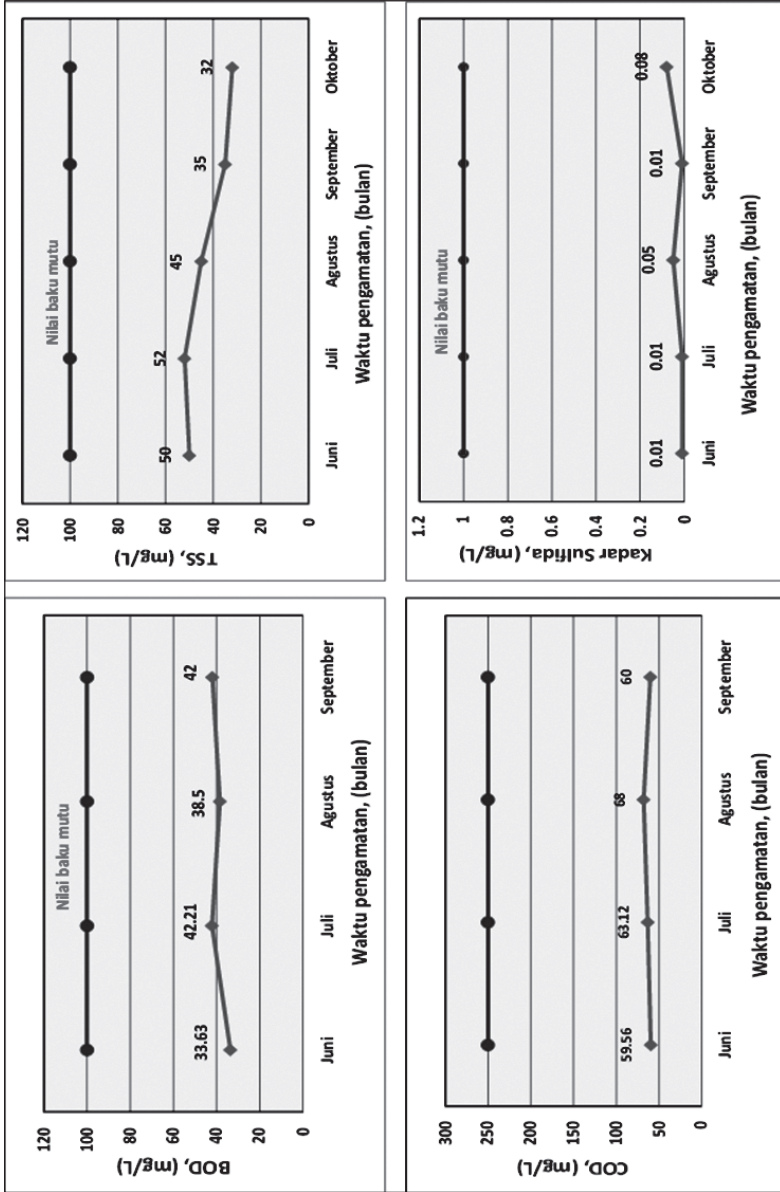


Sumber: Agustinus, Sembiring, dan Effendi (2014)

**Gambar 38.** Pengukuran SV-30 dan Kurva Pertumbuhan Bakteri Selama Tujuh Hari

Pengukuran terhadap nilai COD, pH, dan SV 30 pada dua bulan berjalan menunjukkan kinerja bakteri pengurai bahan organik tersebut. Hasil pengamatan dan pengukuran nilai COD, pH, dan SV-30 yang dilaksanakan di lapangan selama bulan Juni dan Juli 2012 disajikan pada Gambar 39. Kurva tersebut menunjukkan bahwa nilai polutan organik dalam air limbah industri gula mempunyai nilai rata-rata COD 737 mg/L untuk jangka waktu tinggal satu hari, sementara proses di dalam bak aerasi dapat menurunkan nilai COD hingga menjadi 98 mg/L. Nilai COD yang dihasilkan mencerminkan bahwa bahan organik yang terdapat dalam air limbah berupa polutan organik harus dihilangkan dari air limbah tersebut melalui pemrosesan air limbah.

Data pengamatan uji implementasi di lapangan skala industri selama 5 bulan memperlihatkan bahwa MPMO mempunyai kinerja yang sangat baik. Kondisi ini ditunjukkan oleh kemampuan MPMO mereduksi bahan organik rata-rata sebagai COD 1.985 mg/L (*inlet*) dan 850 mg/l COD (data 5 bulan setelah proses kimia), setelah melalui proses biologi menggunakan MPMO dan menghasilkan nilai COD 60 mg/L. Nilai akhir pengolahan ini jauh lebih kecil daripada nilai bakumutu yang dianjurkan berdasarkan SK Menteri Lingkungan



Sumber: Agustinus, Sembiring, dan Effendi (2014)

**Gambar 39.** Kurva Hasil Pemantauan Nilai COD, pH, dan SV-30, Juni–Juli 2012

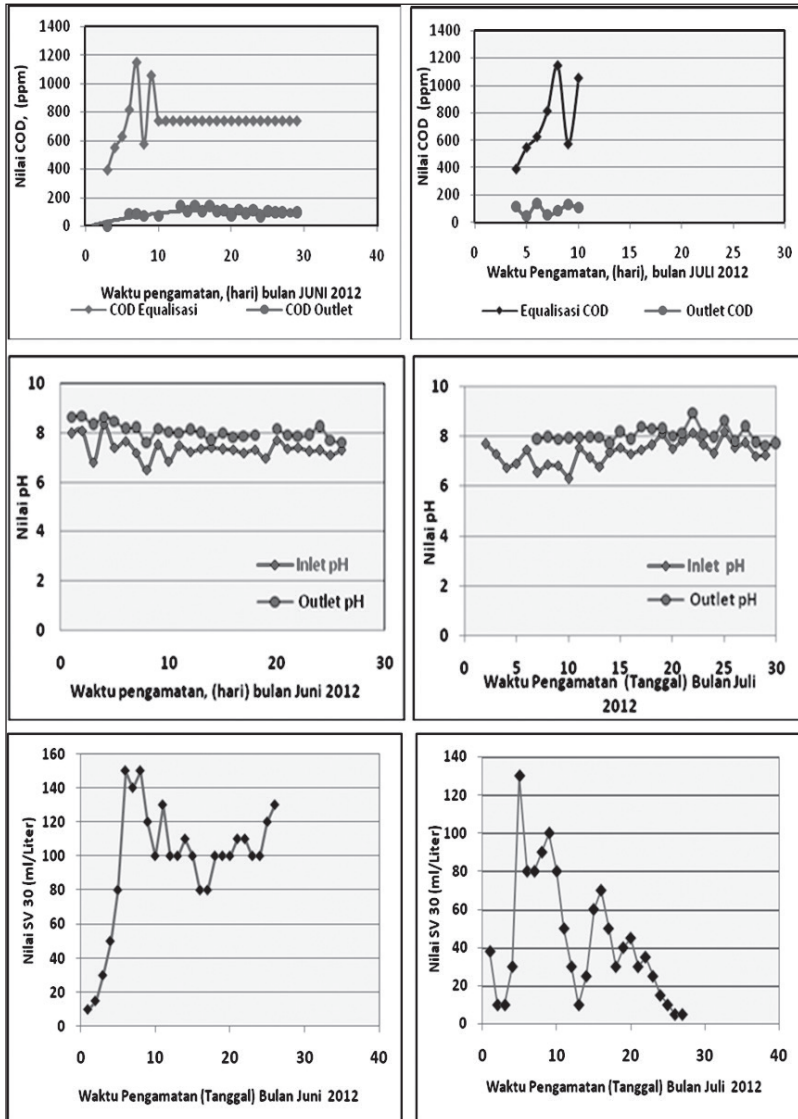
Hidup No. 51 Tahun 1995. Hasil pengukuran fisik dan kimia dalam IPAL disajikan pada Tabel 7 dan digambarkan dalam bentuk kurva pada Gambar 40. Nilai COD *outlet* hasil pengujian air limbah sudah memenuhi syarat untuk dibuang ke badan air sungai, di mana nilai COD maksimum untuk industri gula 250 mg/L.

Unit IPAL PG Sindanglaut berdasarkan hasil pemanfaatan MPMO menunjukkan nilai *removal* organik sebesar 790 mg/L/hari pada *loading* air limbah 120 m<sup>3</sup>/hari dengan kondisi SV-30 sebesar 120 ml/L. Dengan kata lain, unit IPAL tersebut memiliki *removal* organik 2.244 Kg COD/Kg/hari. Artinya, setiap 1 kg mikrob *Bacillus lincheniformis* mampu menguraikan bahan organik sebagai COD sebesar 2.244 kg terhadap limbah cair untuk waktu penguraian selama 1 hari. Hasil pengolahan limbah cair secara signifikan diperlihatkan pada Gambar 41.

**Tabel 7.** Hasil Pengukuran Fisik dan Kimia dalam IPAL

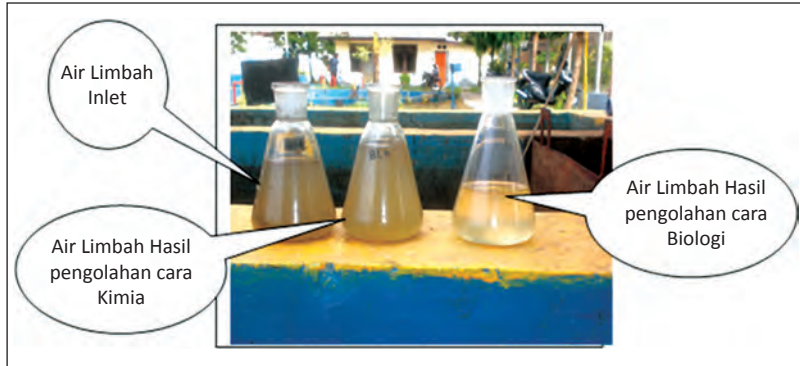
PARAMETER FISIKA DAN KIMIA DALAM IPAL						
KONDISI IPAL	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	pH	Sulfida (mg/L)	Minyak/ Lemak (mg/L)
Inlet IPAL	1421,97	1985,2	30	6,99	1,56	1
Nilai baku mutu	100	250	100	6,0 – 9,0	1	5
Outlet IPAL						
bulan:						
Juni	33,6	59,56	50	6,17	0,01	1
Juli	42,21	53,12	52	7,11	0,01	1
Agustus	38,5	68	45	7,16	0,05	1
September	42	60	35	7,22	0,01	1
Oktober	34	56	32	7,19	0,08	1
<b>Rata-rata / bulan</b>	<b>38,17</b>	<b>59,39</b>	<b>43</b>	<b>7,43</b>	<b>0,032</b>	<b>1</b>

Sumber: Agustinus, Sembiring, dan Effendi (2014)



Sumber: Agustinus, Sembiring, dan Effendi (2014)

**Gambar 40.** Kurva Hasil Pemantauan IPAL, Juni–Oktober 2012



Sumber: Agustinus, Sembiring, dan Effendi (2014)

**Gambar 41.** Perbedaan Warna Contoh Air Limbah Sebelum dan Sesudah Pemrosesan

Gambar tersebut memperlihatkan warna hasil pemrosesan yang relatif jernih sehingga tidak mencemari lingkungan. Dengan demikian, pengolahan air limbah menggunakan bakteri *Bacillus licheniformis* yang dikemas dalam MPMO cukup efektif untuk mengolah limbah cair organik. Di samping itu, harga MPMO hanya Rp30.000/kg, lebih murah dibandingkan kultur lainnya.

## 6. Geomaterial (*Geopolymer*) Berbasis Silika Amorf

Lapangan Panasbumi Dieng di satu sisi dapat menghasilkan energi listrik untuk pembangunan. Di sisi lain, Lapangan Panasbumi Dieng juga dapat menghasilkan mineral ikutan (*sludge*) yang belum dimanfaatkan dan masih ditampung di tempat penampungan akhir (TPA) serta mengakibatkan degradasi lingkungan sekitarnya (Gambar 42). Pembentukan *sludge* diawali ketika dua molekul asam silikat yang hadir bersama-sama dalam larutan jenuh bergabung membentuk *dimer*  $(\text{OH})_3 \text{Si-O-Si} (\text{OH})_3$ . Ikatan dari beberapa *dimer* akan membentuk *cyclus* yang disebut sebagai *cyclic* (C), dan selanjutnya akan terbentuk koloid (partikel halus silika amorf yang melayang dalam larutan). Kemudian, partikel koloid tersebut bergabung dan mengendap sebagai

endapan *sludge*. Karakteristik *sludge* didominasi oleh kandungan silika amorf dengan kadar silika 70–80%  $\text{SiO}_2$  berukuran butir (15–27  $\mu\text{m}$ , berpotensi digunakan sebagai geomaterial (*geopolymer*) dan material preservasi mikro-organisme (MPMO) pengolah limbah cair phenolik (Agustinus, 2016).

Geomaterial atau *geopolymer* secara umum dapat didefinisikan sebagai material yang dihasilkan dari geosintesis aluminosilikat polimerik dan alkali-silikat yang menghasilkan kerangka polimer  $\text{SiO}_4$  dan  $\text{AlO}_4$  yang terikat secara tetrahedral (Davidovits, 1989). Ketika  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  terikat secara tetrahedral dengan atom oksigen, diperlukan ion positif ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{NH}_4^{++}$ ) dalam lubang kerangka untuk menyeimbangkan muatan negatif dari  $\text{Al}^{3+}$  dalam bentuk koordinasi tetrahedral.

*Geopolymer* merupakan terobosan material baru dari jenis material beton tanpa semen yang lebih ramah lingkungan. Bahan dasar *geopolymer* banyak mengandung silikon dan aluminium. Untuk melarutkan unsur-unsur silikon dan aluminium serta memungkinkan terjadinya reaksi kimiawi, digunakan larutan yang bersifat alkalis. Material *geopolymer* ini, jika digabungkan dengan agregat batuan, akan



Sumber: Agustinus dan Sembiring (2014)

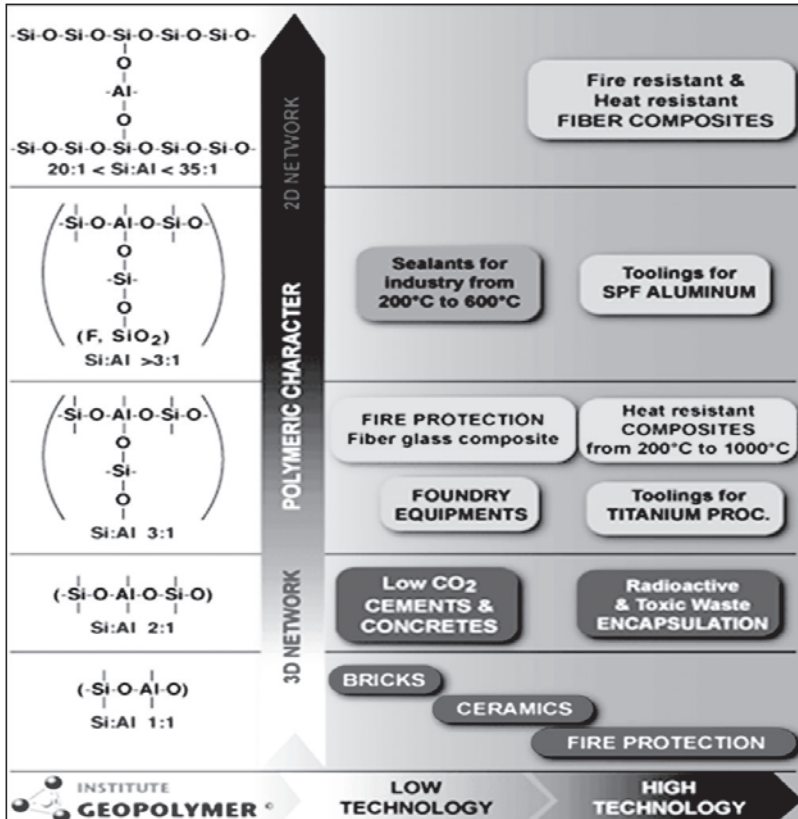
**Gambar 42.** *Sludge* di Saluran Terbuka dan TPA

menghasilkan beton *geopolymer* tanpa semen. *Geopolymer* lebih ramah lingkungan karena menggunakan bahan buangan industri. Proses pembuatannya juga tidak perlu energi yang tinggi. Pada pembuatan semen diperlukan suhu 800°C, sedangkan pada *geopolymer* cukup dengan pemanasan 60–80°C selama 24 jam dan bisa menghasilkan beton berkualitas tinggi (Davidovits, 1991).

Teknologi *geopolymer* memiliki keunggulan karena mampu menghasilkan *binder* berkinerja tinggi dari berbagai sumber aluminosilikat. Beberapa riset telah dikembangkan dalam pembuatan *geopolymer* dari aluminosilikat yang berasal dari metakaolinit dan *fly ash*. Hasil riset selama ini menunjukkan bahwa beton *geopolymer* memiliki sifat-sifat teknis, misalnya kekuatan dan keawetan yang tinggi. *Geopolymer* menjadi menarik karena sifat mekanik dan durabilitas yang mengagumkan, juga stabilitas termal dan ketahanan terhadap asam (Bakharev, 2005). *Geopolymer* telah membuktikan bahwa komposisi matriks *geopolymer* tidak berubah setelah dipanaskan pada suhu 1200°C. Material *geopolymer* dengan kandungan Ca lebih rendah memiliki ketahanan terhadap asam lebih baik dari pada material yang terbuat dari semen portland (Bakharev, 2005). Secara umum, Gambar 43 memberikan ilustrasi dari produk *geopolymer low technology* hingga *high technology*.

Uji coba pembuatan *geomaterial* berbahan baku *sludge* dari Lapangan Panasbumi Unit I Dieng dilakukan dengan tahapan (1) Penyiapan bahan baku berupa *sludge*, dan agregat halus (pasir), kaolin serta abu sekam padi (RHA) sebagai bahan aditif; (2) Penyiapan bahan pengikat (*binder*) berupa *water glass*, air dan NaOH; (3) Formulasi dan pembentukan benda uji dan prototipe produk; (4) Pengeringan pada suhu kamar dalam ruang terbuka selama 7–14 hari; dan (5) Pemanasan dalam *oven* pada suhu 60–80°C selama 24 jam. Hasil pembuatan benda uji dan prototipe produk pada Gambar 44 dapat digunakan sebagai bahan bangunan, seperti bata ringan dan *paving block* (Gambar 45). Prototipe produk yang dihasilkan, misalnya *spesial blended concreat- ted* (SBC), merupakan pengembangan dari *geopolymer* atau proses

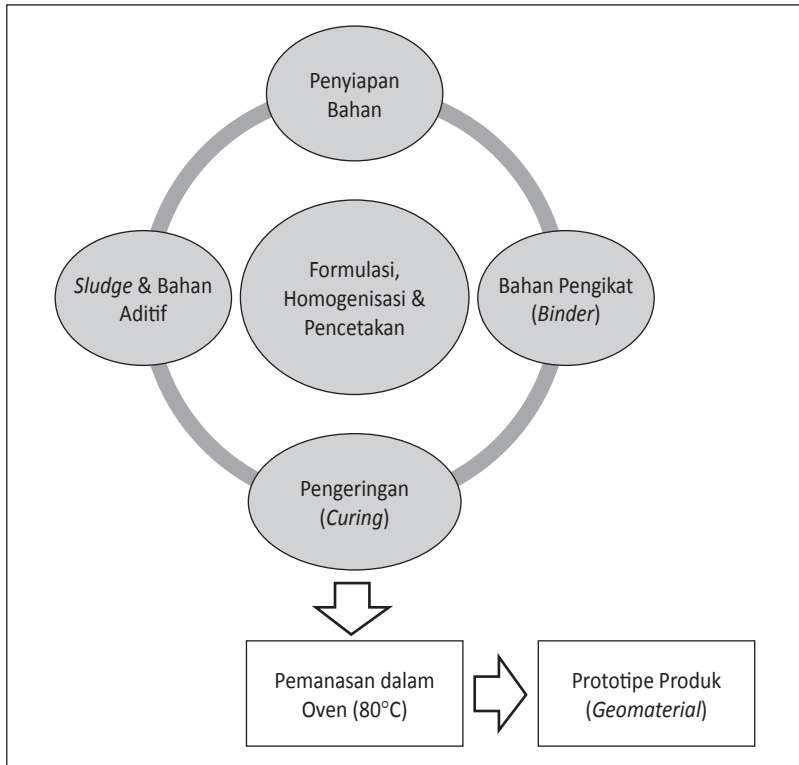




Sumber: Davidovits (1989)

Gambar 43. Diagram Alir Aplikasi Geopolymer

polikondensasi material aluminosilikat dengan melibatkan teknologi rekayasa. Bahan bakunya berupa silica amorf (SiO<sub>2</sub>) dan sejumlah bahan aditif berupa agregat dan kaolin serta *water glass* (WG), *rice hush ash* (RHA), air, dan (NaOH) yang berperan sebagai *binder*. Hasil penelitian ini menghasilkan prototipe produk bata ringan dan *paving block* yang kemudian didaftarkan HKI. Hasil penelitian ini juga telah diapresiasi serta diimplementasikan oleh PT Geodipa Energi Unit Dieng untuk keperluan sendiri (Agustinus & Sembiring, 2014).



Sumber: Agustinus dan Sembiring (2014)

**Gambar 44.** Bagan Alir Pembuatan Benda Uji dan Prototipe Produk Geomaterial



Sumber: Agustinus dan Sembiring (2014)

**Gambar 45.** Benda Uji dan Prototipe Produk Geomaterial

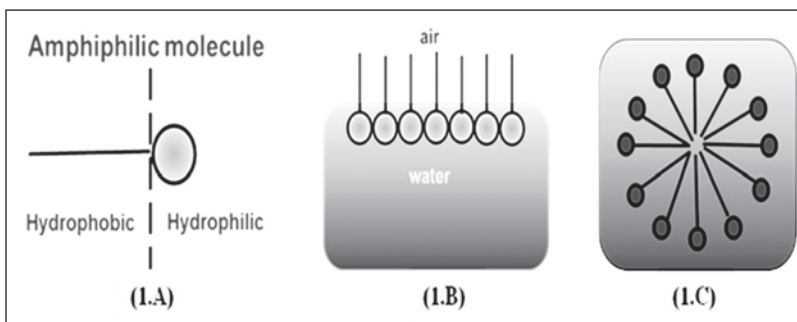
## 7. SMAC Berbasis Karbon Aktif dari Batu Bara

Karbon aktif dari batu bara memiliki rongga pori berdiameter rata-rata sebesar  $21,6 \text{ \AA}$  dengan luas permukaan  $1,95 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{kg}$  dan volume pori  $10,28 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{kg}$  sehingga memungkinkan untuk menyerap adsorbat. Karbon aktif juga diketahui mampu menyerap ion logam berat (ion logam Hg, Cu, dan Fe), tetapi kurang efektif terhadap ion logam *hexavalent chromium* ( $\text{Cr}^{\text{vi}}$ ) (Choi dkk., 2009). Air sungai yang mengandung polutan partikel logam *hexavalent chromium* melebihi baku mutu  $0,05 \text{ mg/liter}$ —dari pembuangan limbah cair industri penyamakan kulit—dapat membahayakan kesehatan manusia, misalnya terjadinya pembengkakan saluran pencernaan dan ginjal dan mematikan sel otak karena terakumulasinya ion logam *hexavalent chromium* (Balbich & Davis, 1981). Oleh karena itu, penelitian bertema rekayasa benefisiasi yang bertujuan memperoleh material adsorbat baru menjadi penting untuk direalisasikan.

Salah satu upaya penanganan limbah cair industri penyamakan kulit dalam sebuah IPAL adalah memodifikasi karbon aktif dari batu bara menjadi SMAC sehingga lebih efektif menyerap ion logam *hexavalent chromium* ( $\text{Cr}^{\text{vi}}$ ) (Agustinus, Mursito, & Sembiring, 2013). *Surfactant Modified Activated Carbon* (SMAC) adalah karbon aktif yang telah dimodifikasi dengan menggunakan *surfactant*. *Surfactant* adalah bahan kimia yang mempunyai molekul dengan bagian tangkal (batang) bersifat hidrofobik dan bagian kepala bersifat hidrofilik serta mampu menempel pada permukaan padatan. Konsep yang mendasari adalah terdapatnya perbedaan tegangan permukaan karbon aktif yang bersifat hidrofobik (tidak suka akan air) dan hidrofilik (suka akan air). Tegangan permukaan padatan yang kontak dengan suatu larutan cenderung menghimpun lapisan dan molekul-molekul zat terlarut pada permukaan sebagai akibat ketidaksetimbangan gaya-gaya pada permukaan. Terjadinya adsorpsi secara fisik diakibatkan oleh kon-

densasi molekuler dalam kapiler-kapiler dari padatan. Mekanisme adsorpsi polutan ionik pada umumnya adalah interaksi elektrostatis atau pertukaran ion pada tegangan permukaan yang bersifat hidrofilik. Karbon aktif dari batu bara pada umumnya bersifat hidrofobik sehingga mampu menyerap polutan organik, tetapi kurang efektif terhadap polutan ionik, seperti ion logam *hexavalent chromium* ( $\text{Cr}^{\text{vi}}$ ). Permasalahannya, bagaimana mengubah sifat tegangan permukaan karbon aktif dari batu bara yang bersifat hidrofobik menjadi bersifat hidrofilik secara optimal?

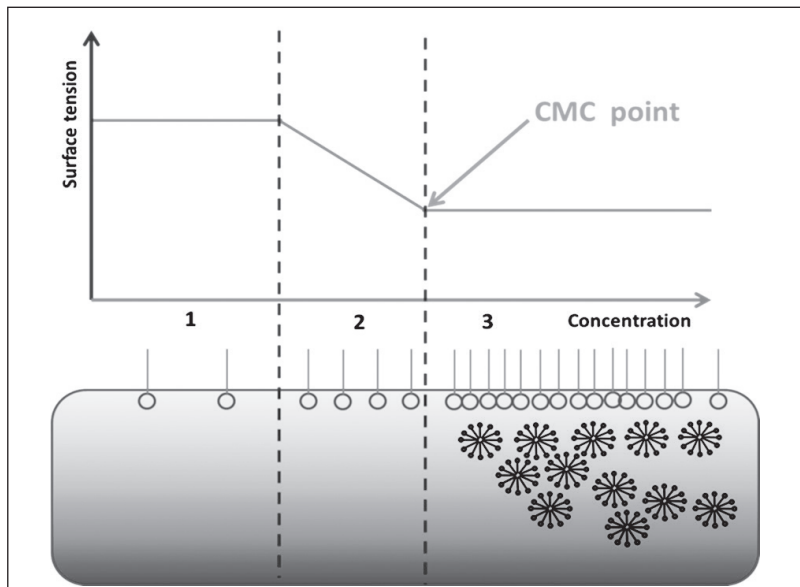
Solusi yang dilakukan adalah pembesaran kanal rongga pori dan perubahan sebagian besar sifat permukaan karbon aktif batu bara diharapkan dapat meningkatkan daya serap karbon aktif terhadap ion logam *hexavalent chromium*. Metode yang diterapkan adalah eksperimen metoda *batch* dengan melibatkan parameter fisika dan kimia. Perubahan pH, suhu proses, konsentrasi proses, dan lama waktu kontak digunakan sebagai variabel bebas. Uji penyerapannya terhadap *hexavalent chromium* diobservasi melalui analisis X-RD, FTIR, dan UV. Secara teoretis, perbedaan tegangan permukaan karbon aktif dalam kondisi normal dalam air dengan kondisi dalam larutan surfaktan konsentrasi rendah diilustrasikan pada Gambar 46.



Sumber: Lauren (2019)

**Gambar 46.** *Amphibolic molecule* (1a) dalam kondisi normal, (b) dalam air, dan (c) dalam larutan bersurfaktan pada konsentrasi rendah.

Gambar 46 menunjukkan bahwa karbon aktif mengandung dua tipe komponen, yakni hidrofobik dan hidrofilik yang disebut sebagai *molekul amfifilik* (1a). Jika molekul berada di dalam air, bagian polar berinteraksi dengan air, sedangkan bagian nonpolar berinteraksi dengan udara dan atau cairan nonpolar (1.b). Jika molekul berada dalam larutan bersurfaktan (konsentrasi rendah), terjadi perubahan molekul dan akan membentuk pola melingkar (1.c). Secara teoretis, perubahan tegangan permukaan sebagai akibat perubahan konsentrasi surfaktan dilustrasikan pada Gambar 47. Titik kritis ditunjukkan oleh *Critical Micelle Concentration* (CMC) sebagai indikator kondisi optimal. Pada diagram Gambar 47 tersebut diperlihatkan fase perubahan tegangan permukaan versus konsentrasi surfaktan. Pada kondisi konsentrasi surfaktan yang sangat rendah (fase 1), perubahan tegangan tidak tampak signifikan, bahkan sering kali tidak terdeteksi. Bertambahnya konsentrasi surfaktan akan menurunkan tegangan

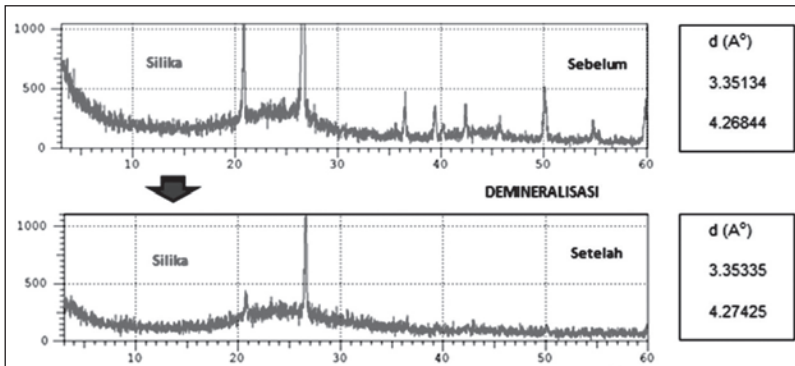


Sumber: Lauren (2019)

**Gambar 47.** Ilustrasi Perubahan Tegangan Permukaan vs Konsentrasi Surfaktan

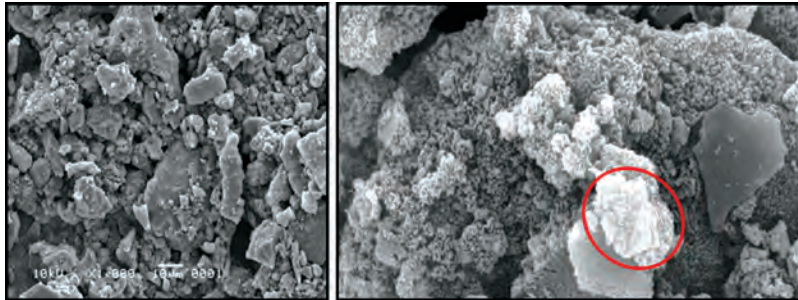
permukaan (fase 2). Fase 3 terjadi jika permukaan karbon aktif seluruhnya telah dimuati oleh surfaktan sehingga tidak akan terjadi lagi perubahan tegangan permukaan. Kondisi tersebut dicapai pada pada titik 0,5 CMC, dalam konteks ini dicapai pada larutan dengan konsentrasi *Ethylene Diamine* (EDA) sebesar 1.000 ppm.

Hasil analisis X-RD terhadap contoh karbon aktif dari Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (tekMIRA) sebelum dan sesudah dilakukan demineralisasi ditunjukkan pada Gambar 48. Analisis tersebut memperlihatkan bahwa karbon aktif masih mengandung silika ( $\text{SiO}_2$ ). Kondisi itu juga didukung oleh fotomikrograf hasil analisis SEM yang memperlihatkan adanya butiran silika dalam karbon aktif seperti pada Gambar 49. Walaupun dalam demineralisasi telah terjadi pengurangan mineral silika, perbesaran rongga pori (*d-spacing*) belum atau tidak menunjukkan tingkat perubahan diameter ( $\text{A}^\circ$ ) yang signifikan. Mekanisme perubahan kelompok fungsional karbon pada karbon aktif sebelum dan sesudah tahap penyiapan SMAC terlihat jelas pada spektrum FTIR pada Gambar 50, terutama pada kelompok fungsional oksigen  $1.300\text{--}1.000\text{ cm}^{-1}$  dan pada hidrogen aromatik  $900\text{--}700\text{ cm}^{-1}$  (Ibarra, Mufioz, & Moliner, 1996).



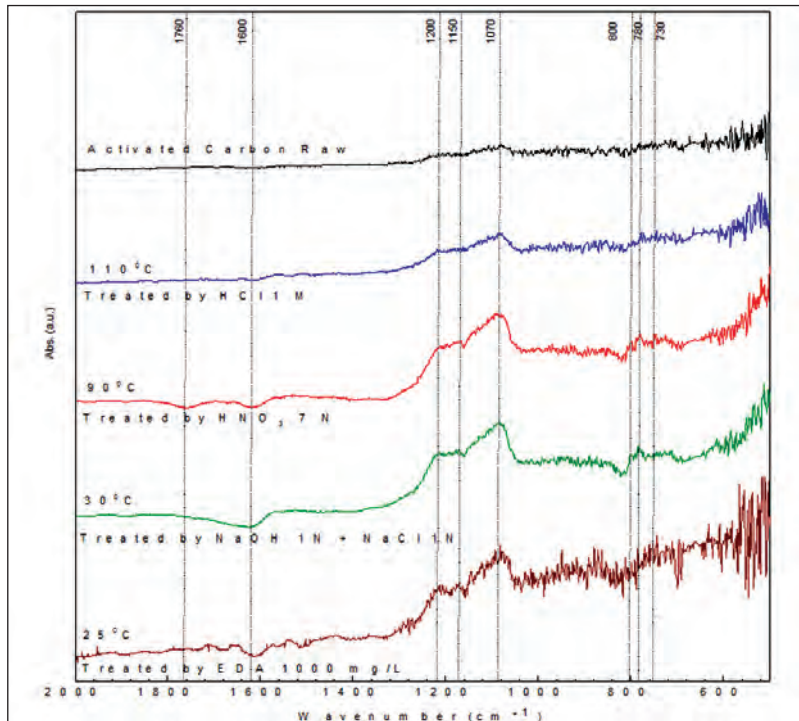
Sumber: Agustinus, Mursito, dan Sembiring (2013)

**Gambar 48.** Difraktogram X-RD Karbon Aktif dari Batu Bara Sebelum dan Sesudah Proses Demineralisasi



Sumber: Agustinus, Mursito, dan Sembiring (2013)

**Gambar 49.** Fotomikrograf SEM Contoh Karbon Aktif dari Batu Bara (Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral)



Sumber: Agustinus, Mursito, dan Sembiring (2013)

**Gambar 50.** Spektrum FTIR Karbon Aktif Sebelum dan Sesudah Penyiapan SMAC



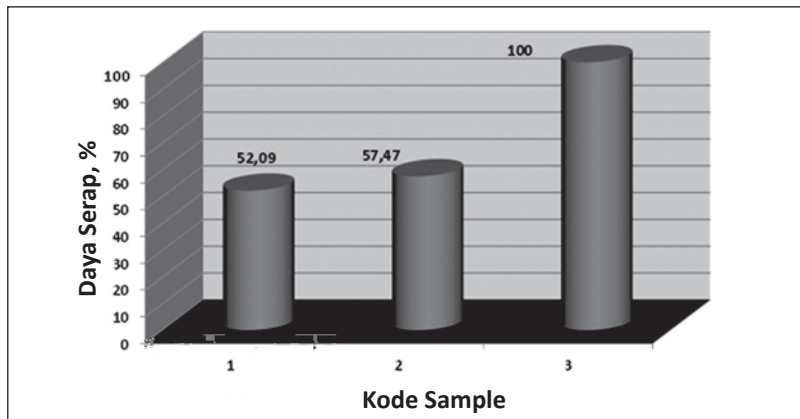
Peningkatan intensitas area relatif pada *aliphatic ether* ( $1.970 \text{ cm}^{-1}$ ), struktur C-O-R ( $1.150 \text{ cm}^{-1}$ ), peregangan C-O, dan ikatan O-H ( $1.200 \text{ cm}^{-1}$ ) terjadi karena oksidasi yang diakibatkan oleh penambahan asam dan panas (HCl dan  $\text{HNO}_3$ ). Terjadinya peningkatan intensitas area relatif pada kelompok fungsional oksigen tahap ini belum signifikan jika dibandingkan perlakuan terhadap  $\text{HNO}_3, 7\text{N}$  pada temperatur  $90^\circ\text{C}$  selama 4 jam. Pada saat  $\text{HNO}_3$  tersebut dipanaskan, kelompok asam oksigen -COOH, -OH, dan -COOR akan terbentuk terlebih dahulu, kemudian bereaksi dengan  $\text{H}^+$  untuk membentuk ion positif hidronium, seperti  $-\text{COOH}_2^+$ ,  $\text{H}_2^+$ ,  $-\text{C-OH}^+$ . Pada perlakuan pemanasan dengan  $\text{NaOH} + \text{NaCl}$  1N dalam suhu  $30^\circ\text{C}$  selama 48 jam,  $\text{H}^+$  dari karbon akan tergantikan oleh  $\text{Na}^+$ , dan menyebabkan penurunan tingkat keasaman permulaan. Penambahan EDA pada konsentrasi 1.000 ppm (1g/200 ml) pada suhu kamar, dengan kecepatan pengadukan 100 rpm selama 12 jam, dan pH 7 mengakibatkan perubahan intensitas area relatif pada kelompok fungsional karbon lebih intensif sebagai akibat terjadinya reaksi HNHR dengan kelompok permukaan  $\text{COCl}$ .

Terjadinya peningkatan terbalik dan intensitas area relatif pada garis dasar spektrum FTIR ini mungkin telah terjadi pada saat pencucian dengan HCl, kemudian saat  $\text{HNO}_3$  dan  $\text{NaOH} + \text{NaCl}$ ,  $-1760 \text{ cm}^{-1}$  (COOH) dan  $-1.600 \text{ cm}^{-1}$  (COO-) akan meningkatkan penyerapan terhadap Cr. Kontrol pH pada saat penyerapan limbah cair yang mengandung Cr akan sangat krusial. Pada saat penggantian  $\text{H}^+$  oleh  $\text{Na}^+$ , adsorpsi  $\text{HCrO}_4$  dan  $\text{CrO}_4^{2-}$  kemungkinan reaksi yang akan terjadi:



Peningkatan penyerapan Cr terjadi karena lebih banyak kemasaman permukaan oksigen dan pengontrol pH yang diberikan oleh kelompok permukaan itu sendiri. Pengaruh pH terhadap penyerapan Cr sangat besar, dan hampir semua perlakuan karbon aktif memberikan daya serap tinggi pada pH 2. Semakin meningkatnya kondisi pH hingga pH netral, daya serap cenderung menurun.

Peningkatan daya serap terhadap Cr diuji dengan menggunakan larutan standar yang terbuat dari  $K_2Cr_2O_7$  dan larutan *diphenylcarbozid*. Hasil uji perbandingan daya serap antara contoh karbon aktif (1), hasil demineralisasi karbon aktif (2), dan hasil modifikasi karbon aktif menjadi SMAC (3) terhadap  $Cr^{VI}$  disajikan pada Gambar 51.



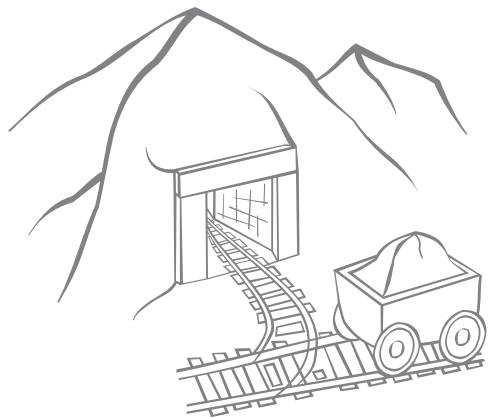
Sumber: Agustinus, Mursito, dan Sembiring (2013)

**Gambar 51.** Diagram perbandingan daya serap (1) karbon aktif biasa, (2) demineralisasi karbon aktif, dan (3) modifikasi karbon aktif menjadi SMAC.



# BAB V

## Pohon Industri Tumbuh Optimal



Indonesia dikenal kaya akan sumber daya mineral, batuan, dan batu bara, tetapi pemanfaatannya belum optimal. Jadi, sumber daya alam tersebut masih belum banyak memberikan pertambahan nilai bagi daya saing bangsa. Hingga saat ini, pemanfaatan sumber daya alam baru pada tingkat eksploitasi dengan kuantitas besar dan dijual dengan nilai sangat rendah. Kekayaan sumber daya alam seharusnya dapat digunakan sebagai bahan baku utama pembuatan material baru atau material substitusi bahan baku industri nasional berbasis mineral. Jika sumber daya tersebut dikelola dan diolah menjadi material baru atau material substitusi untuk bahan baku berbagai produk industri, tentunya akan memberikan nilai tambah secara signifikan.

Selain kekayaan sumber daya alam, letak geografis dan jumlah penduduk yang sangat besar membuat Indonesia menjadi pasar potensial bagi berbagai produk material baru berbasis mineral. Tidak dapat dipungkiri bahwa pada masa lalu hampir seluruh hasil tambang di Indonesia diekspor dalam kondisi mentah dan hanya sedikit pengolahan yang dilakukan di Indonesia. Kondisi tersebut berkaitan

erat dengan kemampuan sumber daya manusia dan teknologi untuk memprosesnya. Selain itu, tidak tersedia modal yang cukup besar untuk membangun fasilitas pengolahan. Hal ini diperparah dengan pasar yang dikuasai oleh pelaku tertentu sejak awal. Pelaku pasar ini bukan saja menentukan harga, melainkan juga menentukan produk yang akan dipasarkan. Kondisi seperti ini masih berlangsung, tetapi telah ada perubahan ke arah lebih baik dengan mensyaratkan bahwa produk harus memenuhi berbagai standar, di antaranya tidak merusak lingkungan.

Bahan mentah banyak terdapat di Indonesia sebagai produk gunung api, hasil pelapukan dan sedimentasi serta alterasi hidrotermal. Oleh karena itu, perlu dikembangkan kebijakan dan rencana penerapannya di sektor industri. Lebih jauh, perlu dilakukan upaya penelitian dan pengembangan material baru atau material substitusi berbasis mineral dalam rangka mendukung dan memenuhi kebutuhan bahan baku industri nasional. Hal ini agar Indonesia tidak hanya sebagai bangsa pengimpor, tetapi juga ikut menikmati pertumbuhan ekonomi akibat perkembangan teknologi berbasis mineral. Jika semua rangkaian industri ini dapat dikuasai teknologinya, semua produk yang diekspor bukan lagi dalam bentuk mentah yang bersifat *bulky*, melainkan bahan baku industri yang siap pakai dan dalam kemasan yang efisien. Dengan demikian, peningkatan nilai tambah mineral, batuan, dan batu bara dipandang sebagai tantangan bagi para peneliti saat ini dan nanti.

Metode rekayasa benefisiasi merupakan solusi yang ditawarkan untuk peningkatan nilai tambah mineral dan batuan bagi usaha pertambangan skala kecil. Penelitian yang telah dilakukan merupakan bagian dari transformasi teknologi sebagai upaya meningkatkan daya saing industri-industri dalam negeri. Upaya yang telah dilakukan adalah memutus mata rantai ketergantungan bahan baku impor dengan memberdayakan mineral dan batuan sebagai material baru

(substitusi) yang dibutuhkan oleh industri-industri dalam negeri. Hasil kajian enam studi kasus menunjukkan bahwa sudah terbentuk prototipe produk material baru berbasis mineral dan batuan, dan dua di antaranya sudah mencapai tahap akhir dan diapresiasi oleh masyarakat industri. Meskipun ada banyak kendala yang dihadapi dalam penerapan studi kasus ini, rekayasa benefisasi menjadi penting untuk diterapkan dan menjadi tantangan bagi para peneliti muda untuk menyusun rencana strategis masa mendatang.

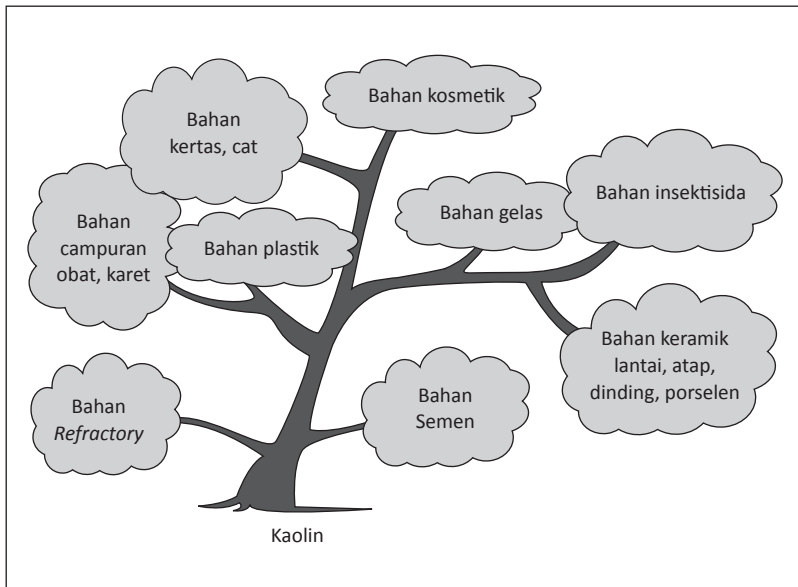
Hasil kegiatan ini juga memberikan dampak yang strategis bagi beberapa pihak. Bagi industri yang mengolah air limbah dengan metode biologi, informasi dari hasil kegiatan ini berguna untuk memaksimalkan penyimpanan bakteri sebagai cadangan *seeding*. Bagi masyarakat, informasi dalam buku ini membuka peluang untuk mengembangkan pemanfaatan mineral dan batuan sebagai bahan baku industri berbasis mineral. Bagi pemerintah, hasil kajian ini akan merangsang masyarakat dan industri untuk meningkatkan pemanfaatan mineral dan batuan sebagai preservasi bakteri pengolah air limbah industri sehingga dapat mengendalikan kualitas lingkungan akibat pencemaran industri.

Pertambahan nilai mineral, batuan, dan batu bara erat kaitannya dengan konsep kemandirian. Jika cabang pohon industri dapat memanfaatkan semua bahan mentah, Indonesia dapat memenuhi berbagai kebutuhan tanpa harus selalu tergantung pada pihak lain. Dalam konsep kemandirian, saling memerlukan adalah hubungan yang wajar, tetapi tidak tergantung pada yang lainnya. Jika Indonesia tidak lagi mengeksport bahan mentah berupa komoditas mineral dan pohon industri tumbuh optimal, berarti upaya pemrosesan mineral dan batuan dengan melibatkan teknologi rekayasa sudah berhasil dan nilai tambah sudah dapat dilaksanakan secara optimal.

Konsep peningkatan nilai tambah dalam industri mineral menjadi penting karena industri merupakan kelanjutan dari kegiatan pertam-

bangun sehingga pohon industri dapat bercabang banyak dan tumbuh optimal. Ilustrasi pertumbuhan pohon industri dari bahan baku kaolin disajikan pada Gambar 52.

Gambar tersebut memperlihatkan rangkaian produk berbasis kaolin. Peningkatan kualitas kaolin dimulai dari ukuran butir yang paling kasar, semen, bata tahan api, dan ukuran yang lebih halus lagi (keramik). Dengan tingkat kehalusan yang sama, diperoleh rangkaian produk berupa bahan penggosok gigi (pasta), cat, pencampur plastik dan karet, serta berbagai produk kimia dan obat-obatan. Melalui peningkatan kualitas yang lebih tinggi lagi, dihasilkan gelas, detergen, filter, dan insektisida. Ukuran yang paling halus adalah produk-produk kosmetik. Melalui penambahan sejumlah bahan aditif (bauksit, talk, dan pirofilit) terhadap kaolin, diperoleh keramik berteknologi tinggi (*advanced ceramic*).



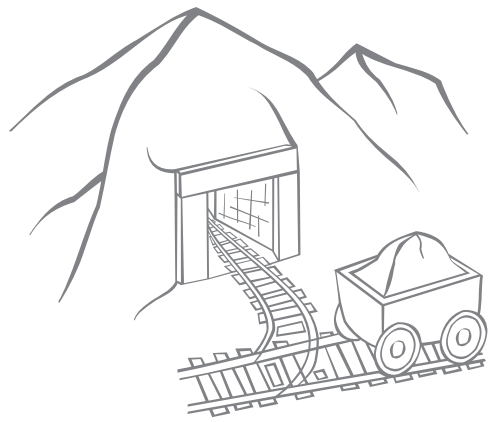
**Gambar 52.** Ilustrasi Pohon Industri Berbasis Mineral Kaolinit

Sebenarnya terdapat berbagai produk kimia yang dapat dihasilkan dari batu bara dan mineral minyak bumi. Namun, sejauh ini batu bara dan minyak bumi sekadar digunakan sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik. Sebenarnya nilainya jauh lebih tinggi jika dipakai sebagai bahan baku industri polimer, terutama dengan adanya imbuhan mineral jarang sehingga dapat menghasilkan berbagai produk material pintar (*smart materials*), seperti melamin, teflon, dan berbagai jenis busa. Namun, diperlukan riset untuk menguasai teknologi pemanfaatannya. Bisa dibayangkan bahwa nilai sejumlah satuan yang sama—yang diimpor kembali sesudah menjadi produk akhir—dapat berlipat ganda harganya. Oleh karena itu, konsep nilai tambah harus selalu diupayakan untuk dapat diterapkan dalam industri mineral Indonesia pada masa mendatang.

Buku ini berkontribusi secara nyata terutama dalam memberikan informasi untuk mengantisipasi kebutuhan bahan baku impor, baik dalam upaya peningkatan nilai tambah sumber daya mineral, batuan, dan batu bara maupun dalam upaya mengatasi terjadinya degradasi lingkungan. Buku ini diharapkan bermanfaat bagi semua pihak, terutama bagi para mahasiswa, peneliti, dan perekayasa yang berkecimpung dalam pemrosesan mineral. Selain itu, diharapkan buku ini dapat digunakan sebagai bahan acuan bagi para pemangku kepentingan (*stakeholder*) dalam memberikan nilai tambah sumber daya marginal yang berwawasan lingkungan di Indonesia.







## DAFTAR PUSTAKA

- Agustinus, E. T. S. (2007). Bata keramik suhu bakar rendah sebagai bahan bangunan konstruksi ringan. Dalam *Prosiding Seminar Geoteknologi, Kontribusi Ilmu Kebumihan dalam Pembangunan Berkelanjutan*. Bandung: Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.
- Agustinus, E. T. S. (2009a). Sintesis hidrotermal atapulgit berbasis batuan gelas vulkanik (perlit) dari Tasikmalaya: Tingkat perolehan dan daya serap terhadap bakteri *E. coli*. Bandung: Universitas Padjadjaran.
- Agustinus, E. T. S. (2009b). Sintesis hidrotermal atapulgit berbasis batuan gelas vulkanik (perlit): Perbedaan perlakuan statis dan dinamis pengaruhnya terhadap kuantitas dan kualitas kristal. Dalam *Prosiding Seminar Material Metalurgi*. Jakarta: Pusat Penelitian Metalurgi LIPI.
- Agustinus, E. T. S. (2016). Teknologi rekayasa untuk meminimalkan pembentukan kerak silika pada pipa re-injeksi lapangan panas bumi Dieng, Provinsi Jawa Tengah, Indonesia. Bandung: Universitas Padjadjaran.
- Agustinus, E. T. S. (2017). Multi blending technology (MBT): Mineral processing method for increasing added value of marginal reserve. Dalam GCGE. *Prosiding Geoteknologi LIPI*.

- Agustinus, E. T. S., & Sembiring, H. E. (2014). Teknologi rekayasa untuk peningkatan nilai tambah Silika Amorf (SiO<sub>2</sub>) lapangan panas bumi Dieng sebagai geomaterial. Dalam *Prosiding Pemaparan Hasil Penelitian Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI*, Bandung. Bandung: Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.
- Agustinus, E. T. S., Mursito, A. T., & Sembiring H. (2013). Peningkatan daya serap karbon aktif terhadap ion logam *Hexavalent Chromium* (CrVI) melalui modifikasi dengan *Cationic Surfactant* (Ethyline Diamine). *Ris. Geol. dan Pertamb. Vol. 23*(1).
- Agustinus, E. T. S., Sembiring, H., & Effendi. (2014). Aplikasi material preservasi mikroorganisme dalam pemrosesan limbah cair organik pada instalasi pengolahan air limbah. *Ris. Geol. dan Pertamb. 24*, 65–76.
- Agustinus, E. T. S., Sembiring, H. E., & Listiyowati, L. N. (2010). Prototipe produk *ground enhancement material* (GEM) berbahan baku Nabentonit Karangnunggal, Tasikmalaya sebagai bahan substitusi GEM impor. *Ris. Geol. dan Pertamb. Vol 20*(2), 81–93.
- Al-Otoom, & Al-Harashsheh. (2015). *Minerals processing & beneficiation*. New Delhi, India: Daya Publishing House and Centre for Science and Technology of the Non-Aligned and Other Developing Countries (NAM S&T Centre).
- Ardha, I. G. N., Ningrum, N. S., Damayanti, R., Suprpto, S., Handayani, S., & Wahyudi, T. (2011). *Kamus pertambangan*. Bandung: Puslitbang Teknologi Mineral dan Batu bara.
- Arifin, D. N., & Hartanto, P. (2011). Pengembangan zeokeramik sebagai bahan bangunan ramah lingkungan: Klasifikasi mutu *paving block* berdasarkan SNI. Dalam *Prosiding Pemaparan Hasil Penelitian Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI*. Bandung: Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.
- Badan Geologi. (2012). Peta panas bumi vulkanik dan vulkano-tektonik. Diakses pada 7 November 2017 dari <http://geomagz.geologi.esdm.go.id/file/2012/09/GEOMAGZ-VOL-3-NO-3-SEPTEMBER-2013.pdf>.

- Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35(4), 658–670.
- Balbich, H., & Davis, H. A. (1981). Phenol: A review of environmental and health risk regular. *Toxicol Pharmacol.* 1, 90–190.
- Choi, H. D., Jung, W. S., Cho, J. M., Ryu, D. G., Yang, J. S., & Baek K. (2009). Adsorption of Cr+6 on to cationic surfactant modified activated carbon. *J. Hazard Mate.* 166, 642–6.
- Davidovits, J. (1989). Geopolymers and geopolymeric materials. *J. Therm. Anal.*, vol 35, 429–444.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis* 37.
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1966). *An introduction to the rock forming minerals*. London: Longman Group Limited.
- Fair, G. M., Geyer, J. C., & Okun, D. A. (1968). *Water and wastewater engineering*. New York: John Wiley and Sons.
- Gaudin, A. (1971). *Principles of mineral dressing*. New Delhi, India: Tata McGraw Hill.
- Gubernur Jawa Barat. (1999). SK Gubernur Jawa Barat No 6 Tahun 1999 Baku Mutu Limbah Cair Bagi Kegiatan Industri di Jawa Barat.
- Hartanto P. (2016). Perubahan permeabilitas zeokeramik akibat penambahan abu sekam padi. *J. Teknol. Miner. dan Batu bara TEKMIIRA*, 12(1), 59–68.
- Hertanto, H. B. (2013). Persebaran barang tambang di Indonesia. Diakses pada 8 November 2017 dari <http://geoenviron.blogspot.com/2013/02/persebaran-barang-tambang-di-indonesia.html>.
- Hirawan, F. (2007). *Riset bergulirlah proses ilmiah menuju penemuan baru dan orisinal*. Bandung: Unpad Press.
- Ibarra, J. V., Mufioz, E., & Moliner, R. (1996). FTIR study of the evolution of coal structure during the coalification process. *Org. Geochem*, 24, 725–35.

- Ismayanto, A. F. & Agustinus, E. T. S. (2007). Batuan perlit Karangnunggal sebagai bahan sintesis hidrotermal. *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan*, 17(2), 1–17.
- Johnstones, S. J., & Johnstones, M. G. (1961). *Perlite in mineral for the chemical and applied industries* (2<sup>nd</sup> ed). London: John Wiley & Sons.
- Kelly, E. G., & Spottiswood, D. J. (1982). *Introduction to mineral processing*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Laurén, Susanna. (2019). *Surface and interfacial tension - What is it and how to measure it?*. Diakses pada 22 Mei 2019 dari Biolin Scientific <https://www.biolinscientific.com/hubfs/Pdf/Attention/White-papers-case-studies/surface-and-interfacial-tension-what-is-it-and-how-to-measure-it.pdf?hsLang=en>.
- Lenny, M., & Agustinus, E. T. S. (2003). Zeolit alam sebagai matriks pembuatan lantai keramik: Penelitian pendahuluan. *J. Ris. Geol. dan Pertambangan*, Vol. 13(1), 65–75.
- NOAA. (1997). Pacific ring of fire. USGS. Diakses pada 2 November 2017 dari [https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/05fire/background/volcanism/media/tectonics\\_world\\_map.html](https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/05fire/background/volcanism/media/tectonics_world_map.html).
- Pemerintah Republik Indonesia. (1995). UU No. 51 Tahun 1995 tentang Baku Mutu Limbah Cair.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2009). UU No. 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batu Bara.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2010a). UU No 24 tahun 2010 tentang Pelaksanaan Kegiatan Usaha Pertambangan Mineral dan Batu bara.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2010b). UU No. 23 Tahun 2010 tentang Pelaksanaan Kegiatan Usaha Pertambangan Mineral dan Batu bara. Diakses pada 22 November 2017 dari [jdih.esdm.go.id/peraturan/PP No. 23 Thn 2010.pdf](http://jdih.esdm.go.id/peraturan/PP%20No.%2023%20Thn%202010.pdf).
- Pemerintah Republik Indonesia. (2012a). UU No. 08 Tahun 2012 tentang Peningkatan Nilai Tambah Mineral melalui Kegiatan Pengolahan dan Pemurnian.

- Pemerintah Republik Indonesia. (2012b). UU No. 11 tahun 2012 Kegiatan Pengolahan dan Pemurnian Mineral.
- Presiden Republik Indonesia. (2013). Instruksi Presiden (Inpres) No. 3 Tahun 2013 tentang percepatan Peningkatan Nilai Tambah Mineral melalui pengolahan dan Pemurnian di dalam Negeri. Diakses pada 19 September 2017 dari m.antaranews.com <https://www.antaranews.com/berita/402178/hilirisasi-industri-tingkatkan-pertumbuhan-ekonomi-nasional>.
- Rosana, F. M. (2017). Eksplorasi sumber daya geologi: *Eksplorasi dan konservasi untuk pembangunan yang berkelanjutan*. Bandung: Unpad Press.
- Sembiring, H., & Agustinus, E. T. S. (2012). Pelletisasi Bentonit sebagai preservasi bakteri pengurai limbah organik cair: Rekayasa dan prototipe. Dalam *Prosiding Pemaparan Hasil Penelitian Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI*. Bandung: Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.
- Setijadji, L. D. (2010). Segmented volcanic arc and its association with geothermal fields in Java Island, Indonesia. Dalam *Proceedings World Geothermal Congress*. Bali.
- Sudjana. (1980). *Desain dan analisis eksperimen*. Bandung: Tarsito.
- Sudradjat, A. (1999). *Teknologi & manajemen sumberdaya mineral*. Bandung: Penerbit ITB.
- Simatupang, M., & Sigit, S. (1991). *Pengantar pertambangan Indonesia (1<sup>st</sup> ed)*. Jakarta: Asosiasi Pertambangan Indonesia, Pusat Dokumentasi dan Informasi Ilmiah LIPI.
- Supardi. (2013). *Aplikasi statistika dalam penelitian: Konsep statistika yang lebih komprehensif*. Jakarta: Change Publication.
- Suprpto, S., Handayani, S., & Wahyudi T. (2007). *Kamus pengolahan mineral dan batu bara Puslitbang Teknologi Mineral dan Batu bara*. Bandung: Badan Litbang Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Suyartono. (2003). *Good mining practice, konsep tentang pengelolaan pertambangan yang baik dan benar (2<sup>nd</sup> ed)*. Semarang: Studi Nusa.

Zulkarnaen, I., & Agustinus, E. T. S. (1996). Temperature control in system MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, X-Ray diffracton evidentes. Dalam *Dampak regionalisasi dan globalisasi industri dan perdagangan terhadap lembaga litbang, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geoteknologi LIPI*. Bandung: Prosiding Seminar Nasional Geoteknologi LIPI.

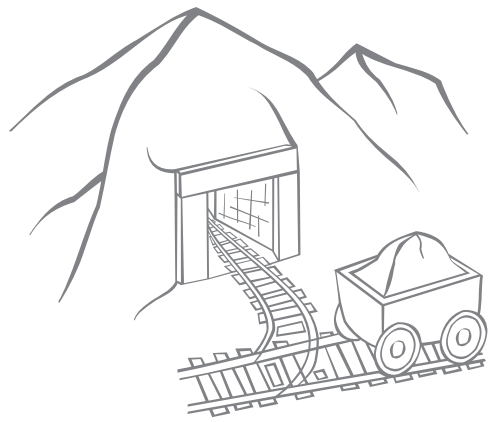


## DAFTAR SINGKATAN

BB	: Bahan Baku
BP	: Bahan Pelarut
BUMN	: Badan Usaha Milik Negara
BOD	: <i>Balanced Oxygen Demand</i>
COD	: <i>Chemical Oxygen Demand</i>
CMC	: <i>Critical Micelle Concentration</i>
CWF	: <i>Coal Water Fuel</i>
CWM	: <i>Coal Water Mixer</i>
DHL	: Daya Hantar Listrik
<i>E. coli</i>	: <i>Escherichia coli</i>
EDA	: Ethylene Di-amine
ESDM	: Energi Sumber Daya Mineral
FTIR	: <i>Fourier Transformer Infra Red</i>
GEM	: <i>Ground Enhancement Material</i>
HKI	: Hak Kekayaan Intelektual
IPAL	: Instalasi Pengolahan Air Limbah
INPRES	: Instruksi Presiden



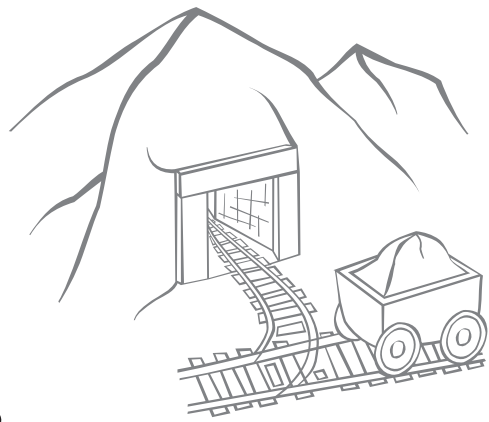
IUP	: Izin Usaha Pertambangan
IUPK	: Izin Usaha Pertambangan Khusus
KTI	: Karya Tulis Ilmiah
LIPI	: Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
LAN	: <i>Local Area Networks</i>
MENKO	: Menteri Koordinasi
MPMO	: Material Preservasi Mikro-Organisme
MW	: <i>Megawatt</i>
NPK	: Nitrogen Phosphate Kalium
PEMDA	: Pemerintah Daerah
PG	: Pabrik Gula
PP	: Peraturan Pemerintah
PERMEN	: Peraturan Menteri
PLTP	: Pusat Listrik Tenaga Panasbumi
PLTU	: Pusat Listrik Tenaga Uap
PNT	: Peningkatan Nilai Tambah
RENSTRA	: Rencana Strategis
RAL	: Rancang Acak Lengkap
RHA	: <i>Rice Hush Ash</i>
SBC	: <i>Special Blended Cement</i>
SDM	: Sumber Daya Manusia
SMAC	: <i>Surfactant Modified Activated Carbon</i>
SEM	: <i>Scanning Electron Microscope</i>
SV 30	: <i>Salvage Value</i> selama 30 menit
TPA	: Tempat Penampungan Akhir
TSS	: <i>Total Suspended Solid</i>
UV	: Ultra Violet
UPT	: Unit Pelayanan Teknis
UU	: Undang Undang
WAN	: <i>Wide Area Networks</i>
XRD	: <i>X-Ray Diffractometer</i>
ZA	: <i>Zink Amonium</i>



# INDEKS

- Adsorpsi, 53, 107, 109, 123, 124, 128  
Aluminosilikat, 118, 119, 120
- Bahan Aditif, 26, 83–5, 87, 91, 93, 96, 103, 105, 119, 120, 134  
Batuan Serpentine, 92  
Batubara, 2, 16, 17, 19, 20, 23, 25, 29, 30, 33, 35, 39, 45, 82, 86, 90, 92, 100, 123, 124, 126, 127, 131–33, 135, 141, 148  
Benefisiasi, 26, 28, 47, 49, 50, 57, 75, 82, 83, 85, 86, 90–2  
Bentonit, 2, 16, 17, 20, 78, 92, 102, 103–10, 138  
Bijih, 2, 12–5, 20, 21, 25, 31, 36, 39, 42, 43, 49, 51, 52, 54–70, 73, 74, 77–82  
Bijih Emas, 65, 66  
Cadangan Marginal, 25, 29, 45  
Degradasi Lingkungan, 22, 25, 29, 117, 135
- Ekonomi, 9, 10, 21–3, 27, 30, 32, 33, 36, 39, 41, 43, 44, 47, 50, 51, 57, 81, 91, 98, 105, 132, 141  
Eksperimen, 84, 85, 87–9, 97–100, 103–05, 124, 141  
Ekstraksi, 26, 43, 44, 48, 49, 56, 78, 80, 81  
Filtrasi, 67, 68  
Forsterite, 85, 92, 93  
GEM, 85, 92, 102–05, 138, 143  
*Geopolymer*, 118, 119, 139  
Gunung Api, 2, 5, 6, 14–8, 33, 72, 99, 132  
Hidrotermal, 10, 14, 16, 19, 33, 95–8, 106, 132, 137, 140  
Ilmenit, 9, 58, 73  
Industri, 22, 28, 30, 31, 37, 40, 42–4, 47–51, 54, 71, 72, 80, 82, 91, 95, 99, 105, 113, 115, 119, 123, 131–35, 141  
Interkalasi, 106, 107  
Ion Positif, 118, 128

Kalkopirit, 12–14  
 Kalsit, 12, 13, 16, 20, 33  
 Kaolin, 19, 20, 34, 72, 77, 119, 120, 134  
 Karbon Aktif, 103, 123, 124  
 Khlomite, 92  
 Konsentrat, 20, 33, 36, 50, 56, 58, 59, 62, 63, 66, 68, 73, 78, 79, 80, 91  
 Konservasi, 25, 29  
 Kristalisasi, 2, 78, 95  
 Kuarsa, 2, 9, 12, 20, 34, 77, 84  
  
 Limbah Cair, 40, 105, 106, 109, 110, 112, 115, 117, 118, 123, 128, 138  
  
 Mikroorganisme, 39, 81, 106, 107–11, 138  
 Mineral, 1, 2, 6–14, 16, 18–23, 25–45, 47–58, 62–5, 67, 69, 71, 73–83, 85, 86, 90–2, 95–7, 99, 102, 106, 107, 109, 110, 117, 126, 131–35, 139,–41, 148  
 Mineral Ikutan, 2  
 Mineral Logam, 1, 8, 20, 91  
 Mineral Non-Logam, 16  
 Monazit, 9, 58  
  
 Na-Bentonit, 103–06, 138  
 Nutrisi, 109, 111, 112  
  
 Paradigma, 5, 26–8  
 Parameter, 43, 84, 88–90, 97, 103, 109, 110, 112, 124  
 Patahan, 11, 12, 13  
 Pembangunan Berkelanjutan, 22  
 Pemurnian, 26, 27, 29–31, 35–9, 42, 47–52, 56, 59, 60, 66, 68, 71, 73, 86, 91, 148  
 Penelitian Ilmiah, 86  
  
 Pengolahan, 30, 32, 36, 48, 49–51, 58–61, 64–73, 77, 79, 80, 82, 91, 140, 141, 143  
 Perlit, 17, 20, 33, 94, 95, 97, 137, 140  
 Pertambangan, 2, 20, 21, 25, 28–31, 33–6, 38–40, 42, 43, 45, 47, 50, 51, 74, 82, 132, 133, 138, 141  
 Plutonik, 16, 18, 19, 33  
 Polutan, 113, 123, 124  
 Presipitasi, 67, 68, 69, 70  
  
 Silika Amorf, 12, 92, 117, 118  
 Silikon, 61, 118  
 Sintesis Hidrotermal, 95, 96, 137  
*Sludge*, 58, 117, 118, 119  
 SMAC, 85, 92, 123, 126, 127, 129, 144  
 Sumber Daya, 1, 2, 34, 42, 45  
 Sumber Daya Mineral, 1, 2, 6, 7, 21, 22, 25–9, 33, 34, 39, 42, 45, 47, 85, 131, 135  
 Surfaktan, 107, 124, 125, 126  
  
 Tablet MPMO, 107  
 Tektonik, 2, 4–7, 138  
 Timbal, 20, 68, 79, 80  
  
 Ultra Basa, 19  
  
 Variabel Bebas, 84, 87, 88–90, 100, 103  
 Variabel Respons, 84, 88–90, 97, 100, 103  
 Vulkanisme, 2  
  
 Xenotim, 58  
  
 Zeokeramik, 85, 92, 99–101  
 Zeolit, 16, 20, 71, 92, 99–101  
 Zirkon, 9, 20, 58, 71, 73



## BIOGRAFI PENULIS



**Eko Tri Sumarnadi Agustinus** dilahirkan di Magelang pada 1 Maret 1954, adalah putra pertama dari Bapak Makpul Somowardoyo (alm.) dan Ibu Sri Sumarni (almh.). Menikah dengan Tenang Juvita Sitepu M. Keb., dan dikaruniai dua orang putri, yakni Karina Melias Astriandhita, S.Kel., M. T. dan Beata Metami Triandhita. Menamatkan

Sekolah Dasar Negeri Tempuran II di Magelang, Sekolah Menengah Pertama Kanisius di Muntilan, dan Sekolah Menengah Atas Kanisius Pendowo di Magelang pada 1972. Memperoleh gelar Sarjana Tambang dari Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta pada 1983.

Bergabung dengan Lembaga Geologi dan Pertambangan Nasional (LGPN) LIPI pada 1984. Ia terlibat dalam berbagai penelitian dan tugas-tugas struktural di LGPN, di antaranya menjadi Kepala Laboratorium Fisika Mineral. Institusi ini kemudian berubah menjadi Pusat Penelitian dan Pengembangan Geoteknologi pada 1996. Kemudian,

berubah menjadi Pusat Penelitian Geoteknologi. Pada 2006 hingga 2011 menjabat Kepala Bidang Sumber Daya Bumi dan Rekayasa Mineral. Kompetensi Teknik Sumber Daya Geologi menjadi dasar kiprahnya dalam bidang pemrosesan mineral. Guna memperdalam kompetensinya, pada 2008 mengikuti program magister di Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, Bandung dan memperoleh gelar Magister Teknik pada 2009. Tahun 20013 kembali mengikuti Program Doktor di Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, Bandung dan memperoleh gelar Doktor pada 2016. Di samping sebagai peneliti bidang pemrosesan mineral, ia juga mengajar dan membimbing mahasiswa serta sebagai penguji dalam sidang sarjana pada Sekolah Tinggi Teknologi Mineral Indonesia (STTMI) Bandung dan sebagai pembimbing dan penguji dalam sidang pascasarjana (S2) pada Institut Teknologi Bandung (ITB).

Sejumlah kerja sama penelitian dilakukan, di antaranya dengan Kyoto University, Jepang, melalui program JSPS pada 1985 dan 1990 di bidang pemrosesan mineral. Sejak saat itu, kompetensi pemrosesan lebih intensif dan terfokus pada benefisiasi mineral, batuan, dan batu bara. Melaksanakan sejumlah penelitian yang pendanaannya diperoleh, baik melalui program kompetensi inti Puslit Geoteknologi, program kompetitif LIPI maupun program KNRT dan program DIKTI. Melalui kegiatan tersebut, benefisiasi dikaji dengan melibatkan teknologi rekayasa yang disebut sebagai rekayasa benefisiasi. Metode rekayasa benefisiasi ini mempunyai konsep, yakni tidak melakukan peningkatan kualitas atau pemurnian sumber daya tersebut, melainkan untuk memperoleh prototipe produk material baru. Dengan demikian, pemanfaatan sumber daya mineral, batuan, dan batu bara menjadi lebih efisien karena semua bahan yang digunakan dalam proses terpakai. Metode rekayasa benefisiasi ini cukup relevan untuk meningkatkan nilai tambah sumber daya mineral, batuan, dan batu bara yang termarginalkan.

# REKAYASA BENEFISIASI

PEMROSESAN MINERAL UNTUK MENINGKATKAN  
NILAI TAMBAH SUMBER DAYA MINERAL MARGINAL

**E**ksplorasi sumber daya mineral yang tak terkendali berdampak terhadap terjadinya degradasi lingkungan dan menyisakan sumber daya marginal. Oleh karena itu, pemanfaatan sumber daya marginal perlu dilakukan secara efektif dan efisien. Buku ini memberikan informasi inovasi baru tentang pemrosesan mineral yang secara ekonomi menguntungkan. Rekayasa benefisiasi tidak meningkatkan kualitas atau memurnikan mineral, batuan, dan batu bara, tetapi menghasilkan material baru. Kelebihan metode ini adalah pemanfaatan sumber daya mineral, khususnya sumber daya marginal, menjadi lebih efisien sehingga dapat memacu pertumbuhan cabang-cabang pohon industri.

Diharapkan buku ini dapat menjadi tambahan pengetahuan bagi para pemangku kepentingan (*stakeholder*), yakni pemerintah, masyarakat, dan industri yang berkecimpung di bidang pengelolaan sumber daya mineral. Selain itu, buku ini juga dapat menjadi acuan bagi mereka yang terjun ke dunia pertambangan, seperti mahasiswa, peneliti, dan perekayasa.



**Diterbitkan oleh:**

LIPI Press, anggota Ikapi  
Gedung PDDI LIPI, Lantai 6  
Jln. Jend. Gatot Subroto 10, Jakarta Selatan 12710  
Telp.: (021) 573 3465  
E-mail: [press@mail.lipi.go.id](mailto:press@mail.lipi.go.id)  
Website: [lipipress.lipi.go.id](http://lipipress.lipi.go.id)

ISBN 978-602-496-054-4



9 786024 960544