

Manajemen Residu Bauksit: Pelaksanaan Tindakan Yang Terbaik

2015



WORLD
ALUMINIUM

International Aluminium Institute (IAI)

Saat ini jumlah anggota IAI meliputi lebih dari 60 persen pangsa produksi bauksit, alumina dan aluminium dunia. Sejak didirikan pada tahun 1972 (sebagai International Primary Aluminium Institute), anggota IAI terlibat secara aktif dalam produksi bauksit, alumina, aluminium, proses daur-ulang aluminium, atau fabrikasi aluminium, maupun sebagai mitra usaha terkait. Kendati IAI bekerja sama erat dengan berbagai asosiasi aluminium nasional dan regional yang anggotanya banyak menjadi anggota IAI, namun asosiasi-asosiasi tersebut bukanlah anggota IAI.

Tujuan utama Institut ini adalah untuk:

- Meningkatkan pangsa pasar aluminium melalui upaya peningkatan kesadaran masyarakat dunia akan keunikan produk serta keistimewaan kualitasnya.
- Menyediakan dan memfasilitasi forum global bagi produsen aluminium untuk mem bahas hal-hal yang menjadi perhatian bersama serta mengkoneksikan mereka den gan asosiasi aluminium regional dan nasional sehingga biaya untuk bekerjasama menjadi efisien dan efektif.
- Mengidentifikasi masalah yang berkaitan dengan kegiatan produksi, penggunaan dan proses daur-ulang aluminium serta mempromosikan kegiatan penelitian dan lainnya yang relevan.
- Mendorong dan membantu kemajuan berkelanjutan dalam kegiatan produksi alu minium yang sehat, aman dan ramah lingkungan.
- Mengumpulkan data-data statistik serta informasi yang relevan dan mengkomunikasikannya kepadapelaku industri serta para pemangku kepentingan lainnya.
- Mengkomunikasikan pandangan dan posisi industri aluminium kepada badan-badan inter nasional dan pihak terkait lainnya.

Melalui IAI, industri aluminium bukan hanya ingin mensosialisasikan pemahaman yang lebih luas mengenai industri aluminium dan menunjukkan rasa tanggung jawab terhadap lingkungan di dalam kegiatan memproduksi logam tetapi juga ingin membagi informasi mengenai potensi manfaat yang bisa diperoleh melalui penggunaannya lewat aplikasi yang berkelanjutan serta daur ulang.

www.world-aluminium.org

Pasal Sanggahan (Disclaimer):

Informasi yang diberikan dalam publikasi ini disajikan berdasarkan pengetahuan terbaik dari IAI, namun bukanlah suatu jaminan keberhasilan. Setiap penerapan metode, sistem, dan proses manajemen residu bauksit yang terdapat dalam publikasi ini berada di luar kendali dan tanggung jawab IAI dan harus mengacu pada kepatuhan terhadap aturan hukum lokal dan nasional yang berlaku.

Daftar Isi

I.	Pendahuluan	4
II.	Ciri-ciri residu bauksit	5 - 8
	a. Latar Belakang	5
	b. Produksi residu bauksit	5
	c. Komponen Penyusun	6 - 7
	d. Ciri-ciri	8
III.	Perencanaan dan desain jangka panjang	8 - 10
	a. Kriteria desain fasilitas penyimpanan	9
	b. Konstruksi	9
	c. Pengendalian rembesan	10
	d. Pengangkutan residu bauksit	10
IV.	Tata kelola	11 - 12
	a. Rencana aksi tanggap darurat	11 -12
V.	Pelacakan kinerja	13 - 15
VI.	Pembuangan dan penyimpanan residu bauksit	16 - 20
	a. Pengolahan sebelum pembuangan dan penyimpanan	16
	b. Pengangkutan	16
	c. Metode pembuangan dan penyimpanan	16 - 19
	d. Netralisasi	19
VII.	Pemanfaatan residu bauksit	21 - 26
	a. Aplikasi-aplikasi potensial	21 - 25
	b. Aplikasi-aplikasi komersial yang berpotensi secara nyata	25 - 26
VIII.	Pemulihan dan rehabilitasi	27 - 30
	a. Studi kasus: “Dari merah menjadi hijau dalam kurun waktu sepuluh tahun”	28 - 29
IX.	Studi-studi terbaru mengenai residu bauksit	31
	a. Metode-metode penilaian pelindian	31
X.	Referensi	32
XI.	Bibliografi	32
XII.	Tujuan sukarela residu bauksit	33

I. Pendahuluan

Residu bauksit telah diproduksi sejak pengembangan industri alumina/aluminium pada akhir abad ke-19. Produksi ini adalah salah satu hasil produk samping industri yang terbesar dalam sejarah masyarakat modern dengan jumlah produksi diperkirakan sekitar 3000 juta ton di seluruh dunia pada akhir tahun 2010 (Power et al, 2009). Proses pengembangan dan implementasi penyimpanan serta program-program pemulihan yang efektif tetaplah penting mengingat pertumbuhan produksinya diperkirakan mencapai 120 juta ton per tahun.

Ciri-ciri fisik dan kimia dari residu bauksit ditentukan oleh sifat bauksit dan efek dari proses Bayer. Teknologi dan prosedur operasi pada setiap kilang akan menentukan kadar air dan nilai pH dari produk buangan – dua faktor kunci dalam manajemen residu bauksit.

Publikasi ini menguraikan tentang industri aluminium yang bertujuan untuk memastikan bahwa tata kelola residu bauksit berdasarkan pada pelaksanaan tindakan yang terbaik yang sudah teruji secara global, memberikan penyimpanan yang aman dan mampu meminimalkan dampak sosial dan lingkungan selama proses operasi maupun pasca-penutupan.

Pelaksanaan tindakan yang terbaik merupakan cara terbaik dalam melakukan segala hal untuk satu lokasi pada waktu tertentu waktu tertentu. Prinsip pelaksanaan dan pendekatan terbaik harus terus berevolusi untuk mengakomodasi solusi-solusi inovatif yang berkembang.

‘Pelaksanaan tindakan yang terbaik bukanlah resep manajemen residu bauksit ‘satu ukuran cocok untuk semua’: Pelaksanaan tindakan yang terbaik melibatkan upaya pengelolaan setiap risiko dengan pendekatan teknologi terbaik yang sesuai dengan keadaan saat itu. Hal ini akan dipengaruhi oleh keadaan iklim, geografis dan lingkungan setempat serta kebijakan, kerangka peraturan pemerintah dan, penting pula, faktor-faktor kemasyarakatan.

Pengembangan aplikasi teknologi untuk perlakuan residu bauksit mampu merubah produk buangan yang dihasilkan, memungkinkan bagi pilihan-pilihan penyimpanan, remediasi dan penggunaan kembali jangka panjang yang berbeda-beda (misalnya, pengembangan filtrasi). Penelitian yang signifikan untuk mencari solusi remediasi atas bahan residu yang ada saat ini sedang dilakukan. Alkalinitas yang tinggi di banyak bahan timbunan menjadi aspek penting yang harus diselesaikan.

Rekomendasi dari praktik terbaik ini merupakan hasil dari serangkaian lokakarya yang diselenggarakan bersamaan dengan Lokakarya Kualitas Alumina (Alumina Quality Workshop) di Perth pada tahun 2012 dan Asosiasi Industri Logam Non-Ferrous Cina (China Non-Ferrous Metals Industry Association) di Nanning pada tahun yang sama. Para ahli teknik dan operasional dari industri alumina global mengidentifikasi desain dan kriteria operasional dan memformulasikannya menjadi praktik terbaik didalam penerapan manajemen residu bauksit yang berkelanjutan pada fasilitas penyimpanan. Kami ingin menyampaikan terimakasih kepada Ken Evans, Chris Handley, Leon Munro dan David Smirk atas kerjasama mereka didalam menyusun rekomendasi ini. Kami juga ingin menyampaikan terimakasih kepada Bruce Brown, Gary Bentel, Don Glenister, David Honey, Leon Munro, David Smirk dan Steve Vlahos atas kesediaannya memfasilitasi penyelenggaraan lokakarya-lokakarya tersebut.

IAI juga mengapresiasi kontribusi tulisan dari Ken Evans (ETCL) dan Eirik Nordheim (European Aluminium) dan para anggota IAI Bauxite & Alumina Committee serta kelompok EAA Alumina di beberapa bagian lain dari publikasi ini.

II. Ciri-ciri residu bauksit

a. Latar Belakang

Aluminium adalah satu bahan dengan produksi tahunan dunia mencapai sekitar 45 juta ton pada tahun 2011 dan diperkirakan hampir 50 juta ton pada tahun 2013. Logam aluminium tidak dihasilkan secara alami meskipun peringkat unsur aluminium berada di bawah oksigen dan silikon dalam hal jumlah keberadaannya di kerak bumi. Aluminium merupakan satu unsur dari banyak batuan, mineral dan



bijih mineral dan harus diekstrak dan diubah menjadi logam melalui kombinasi proses kimia dan elektrolitik. Bahan pembentuk logam aluminium secara normal adalah aluminium oksida (alumina) meskipun teknik produksi yang menggunakan aluminium klorida juga telah dikembangkan dan digunakan pada skala yang sangat kecil. Lebih dari 95 persen dari alumina yang diproduksi secara global berasal dari bauksit yang dihasilkan melalui proses Bayer. Sisanya diproduksi secara sangat terbatas dengan menggunakan proses lainnya misalnya proses VAMI dan jalur proses sinter yang dilakukan di Rusia dan China. Bauksit dan nepheline syenite adalah sumber bahan baku utama namun kegiatan-kegiatan eksperimen sedang dilanjutkan dengan menggunakan kaolin dan liat dengan kandungan alumina yang tinggi. Bahan sisa atau residu yang dihasilkan selama proses pembuatan

alumina tersebut: disebut lumpur merah atau 'red mud' bila proses ekstraksi bauksit Bayer, sementara yang dihasilkan melalui teknik/proses berbeda yang menggunakan bahan-bahan mengandung alumina akan menghasilkan residu yang dinamakan "Bellite" atau lumpur putih (White Mud).

Bijih bauksit tersedia dalam bentuk aluminium oksida dan hidroksida dengan kisaran kadar antara 30 dan 65 persen (diukur sebagai aluminium oksida). Saat ini perkiraan cadangan dunia yang diketahui adalah sekitar 30 miliar ton dengan cadangan yang belum terbukti diperkirakan diperkirakan jauh lebih tinggi lagi. Cadangan Bauksit ditambang di banyak negara di antaranya Australia, Brazil, Cina, Ghana, Yunani, Guinea, Guyana, Hongaria, India, Indonesia, Jamaika, Sierra Leone, Suriname, Venezuela dan Vietnam. Pada proses Bayer, bauksit dipanaskan pada kondisi suhu dan tekanan tinggi dalam suasana soda kaustik untuk membentuk larutan natrium alumina yang menyisakan residu tak larut. Natrium alumina kemudian disaring dan kristal-kristal aluminium hidroksida dipacu untuk terpresipitasi. Aluminium hidroksida terkadang dijual sebagai produk setengah jadi atau terkalsinasi membentuk aluminium oksida (alumina).



Lebih dari 90 persen dari alumina yang diproduksi di dunia digunakan untuk memproduksi logam aluminium disebut metalurgi atau smelter grade alumina (SGA); sisanya disebut non-metallurgical grade alumina (NMGA). Sejumlah besar aluminium hidroksida digunakan untuk membuat bahan kimia pengolahan air (tawas, polyaluminium klorida dan natrium alumina), zeolit, alumina aktif, sementara alumina kelas tertentu digunakan luas dalam berbagai aplikasi seperti produk-produk tahan panas, bahan keramik, amplas, ubin, dan kaca.

b. Produksi residu bauksit

Sejumlah residu bauksit yang dihasilkan oleh pabrik atau kilang alumina terutama tergantung pada sumber bauksit lalu kemudian pada kondisi ekstraksi yang digunakan oleh pabrik. Dalam tingkat ekstrem, residu yang dihasilkan bervariasi dari 0,3 ton hingga mencapai 2,5 ton per ton alumina yang dihasilkan, meskipun pada umumnya hanya berkisar antara 0,7 dan 2 ton residu per ton alumina yang dihasilkan.

Faktor yang paling menentukan adalah kandungan aluminium pada bauksit, jenis aluminium oksida/ hidroksida yang dikandung (misalnya gipsit, boehmite atau diaspora), serta kondisi suhu dan tekanan yang digunakan untuk ekstraksi. Dua faktor terakhir ditentukan oleh sifat dan bentuk alumina yang dikandung, biaya lokal atas energi yang dibutuhkan, serta jarak dan biaya pengangkutan bauksit. Bauksit yang memiliki kandungan boehmite tinggi membutuhkan suhu pengolahan yang lebih tinggi dan bauksit jenis diaspora bahkan membutuhkan kondisi suhu dan kaustisitas yang lebih tinggi. Suhu 140-150°C pada umumnya digunakan untuk pengolahan bauksit dengan kandungan gipsit tinggi dan suhu 220-270°C untuk bauksit boehmitic dan suhu 250-280°C untuk bauksit diaspora.

Proses Bayer telah dipergunakan sejak tahun 1893 dan saat ini ada sekitar 60 pabrik Bayer di seluruh dunia kecuali China. Sementara jumlah kilang alumina di China tumbuh begitu cepat dan mengalami peningkatan dari 7 kilang pada tahun 2001 menjadi 49 di tahun 2011. Terdapat lebih dari 100 pabrik yang beroperasi terkait proses ini. Jumlah pabrik alumina baru maupun ekspansi pabrik terus bertambah seiring dengan peningkatan permintaan dimana tingkat pertumbuhan dalam jangka panjang diproyeksikan mencapai lebih dari 6 persen per tahun. Diperkirakan generasi residu bauksit tahunan yang dihasilkan oleh semua pabrik ini adalah 120 juta ton per tahun.

Ada sekitar 30 kilang alumina Bayer yang telah ditutup dan telah meninggalkan warisan yang terkait lokasi residu bauksit. Diperkirakan jumlah residu bauksit yang dihasilkan selama proses produksi dan saat penutupan mencapai 3 miliar ton.

c. Komposisi

Komposisi utama residu bauksit terdiri dari oksida besi, titanium oksida, silikon oksida dan alumina tak larut bersama-sama dengan berbagai oksida lain yang bervariasi sesuai dengan negara asal bauksit. dari Senyawa besi di bauksit dengan konsentrasi tinggi memberikan karakteristik warna merah pada produk sampingannya, dan dikenal dengan istilah "lumpur merah" (red mud). Jenis komposisi kimianya ditunjukkan pada Tabel 1 dan komposisi jenis mineraloginya diperlihatkan pada Tabel 2.

Selain itu masih ada berbagai mineral lainnya yang terkadang ditemukan termasuk diantaranya hydrogarnet, chantalite, hidroksi-cancrinite, dan natrium titanate.

Berbagai komponen lainnya juga terdapat dalam jumlah yang sangat kecil didalam bauksit, khususnya oksida-oksida logam seperti arsenik, berilium, kadmium, kromium, tembaga, galium, timah, mangan, merkuri, nikel, kalium, thorium, uranium, vanadium, seng dan berbagai unsur logam tanah jarang atau rare-earth (dibahas kemudian). Sebagian dari unsur-unsur tersebut tetap tidak terlarut sehingga terbuang bersama dengan residu bauksit, sementara sebagian lainnya terlarut didalam proses Bayer, baik yang menumpuk didalam Bayer liquor, maupun terpresipitasi bersama-sama dengan aluminium hidroksida. Tergantung kepada suhu yang digunakan didalam proses ekstraksi maka beberapa unsur pada residu bauksit dapat meningkat konsentrasinya dan beberapa unsur lainnya justru menurun.

Unsur-unsur non-logam yang mungkin dihasilkan dalam residu bauksit adalah fosfor dan sulfur.

Berbagai macam senyawa organik juga bisa timbul, ini berasal dari bahan nabati dan organik dalam bauksit dan termasuk diantaranya karbohidrat, alkohol, fenol, dan garam-garam natrium dari polibasa dan hydroxyacids seperti asam humat, fulvat, suksinat, asetat atau oksalat. Selain itu, sejumlah kecil dari beberapa senyawa natrium yang dihasilkan dari natrium hidroksida yang digunakan dalam proses ekstraksi akan tetap tergantung pada sistem pengeringan dan pencucian yang digunakan.

Proses Bayer membutuhkan unsur yang dinamakan soda kaustik sebagai senyawa utama dalam produksi alumina. Fokus utama dari proses refinery alumina adalah memaksimalkan besarnya pengambilan kembali soda kaustik dari residu untuk digunakan kembali dalam proses ekstraksi. Selain dari residu soda kaustik yang masih juga tersisa setelah proses pengambilan kembali, residu bijih hanya mengandung bahan-bahan aditif dalam sangat sedikit yang digunakan didalam proses ekstraksi flokulan. Spesies residu natrium terlarut, lebih dominan sebagai campuran natrium alumina dan natrium karbonat, menimbulkan peningkatan pH pada lumpur residu bauksit. Seiring dengan berjalannya waktu spesies residu natrium sebagiannya dinetralkan oleh karbon dioksida dari udara untuk membentuk natrium karbonat dan spesies karbonat logam lainnya, sehingga dapat menurunkan pH serta mengurangi tingkat bahaya.

Tabel 1 – Kisaran komposisi kimia (%) residu bauksit untuk komponen-komponen utama

Komponen	Kisaran umum (%)
Fe ₂ O ₃	20 - 45
Al ₂ O ₃	10 - 22
TiO ₂	4 - 20
CaO	0 - 14
SiO ₂	5 - 30
Na ₂ O	2 - 8

Tabel 2 – Kisaran komposisi mineralogi (%) untuk residu bauksit

Komponen	Kisaran umum (%)
Sodalite (3Na ₂ O.3Al ₂ O ₃ .6SiO ₂ .Na ₂ SO ₄)	4 - 40
Goethite (FeOOH)	10 - 30
Hematite (Fe ₂ O ₃)	10 - 30
Magnetite (Fe ₃ O ₄)	0 - 8
Silica (SiO ₂) crystalline and amorphous	3 - 20
Calcium aluminate (3CaO.Al ₂ O ₃ .6H ₂ O)	2 - 20
Boehmite (AlOOH)	0 - 20
Titanium Dioxide (TiO ₂) anatase and rutile	2 - 15
Muscovite (K ₂ O.3Al ₂ O ₃ . 6SiO ₂ .2H ₂ O)	0 - 15
Calcite (CaCO ₃)	2 - 20
Kaolinite (Al ₂ O ₃ . 2SiO ₂ .2H ₂ O)	0 - 5
Gibbsite (Al(OH) ₃)	0 - 5
Perovskite (CaTiO ₃)	0 - 12
Cancrinite (Na ₆ [Al ₆ Si ₆ O ₂₄].2CaCO ₃)	0 - 50
Diaspore (AlOOH)	0 - 5

Radioaktivitas

Bauksit mengandung naturally occurring radioactive materials (NORM) atau bahan radioaktif alami pada kadar yang sangat rendah; sebagai kehadiran seri uranium (²³⁸U) dan seri thorium (²³²Th), Kedua-duanya ditemukan pada sebagian besar bahan mineral mentah. Kadar ²³⁸U dan ²³²Th dalam bauksit normalnya berada pada kisaran mg/kg dan menimbulkan aktivitas radioaktif pada tingkatan yang amat sangat rendah, pada atau di bawah tingkatan radioaktivitas yang terjadi secara alami pada batuan granit di banyak wilayah di dunia.

Selama proses Bayer, sebagian besar uranium dan thorium tetap dalam residu tak-larut. Hal ini menyebabkan konsentrasi atau kadar spesies radioaktifnya secara proporsional lebih tinggi dibanding bijih awal. Kondisi inilah yang kerap disebut sebagai technologically enhanced naturally occurring radioactive material (TENORM) atau bahan radioaktif alami yang ditingkatkan dengan bantuan teknologi. Beberapa jenis konsentrasi radioaktif dalam bauksit yang ditimbulkan oleh ²³⁸U berkisar antara 0,03-0,06 Bq/g; dan yang ditimbulkan oleh ²³²Th adalah 0,03-0,76 Bq/g; Sedangkan didalam residu bauksit kadar radioaktif yang ditimbulkan oleh ²³⁸U umumnya berada pada kisaran 0,08-0,66 Bq/g dan akibat ²³²Th biasanya berada pada level 0,07-1,8 Bq/g. Kondisi ini sebanding dengan tingkat rata-rata di tanah untuk ²³⁸U dan ²³²Th yaitu 0,033 dan 0,045 Bq/g (UNSCEAR). Dampak dari tingkatan radioaktif ini telah dipertimbangkan didalam sejumlah aplikasi potensial untuk residu bauksit dan dibahas pada bab pemanfaatan residu bauksit. Tingkat paparan di atas permukaan tanah bagi pekerja tambang bauksit dan kilang alumina di

Australia Barat didapatkan tidak lebih dari 1 mSv/tahun, batas atas paparan yang diperbolehkan bagi anggota masyarakat.

d. Ciri-ciri

Bauksit yang digunakan akan berdampak besar terhadap ciri-ciri, distribusi ukuran partikel dan perilaku residu. Fraksi kasar (lebih besar dari 100 µm) yang tinggi kandungan kuarsanya dapat dipisahkan dari lumpur lempung yang lebih halus (biasanya 80%-nya kurang dari 10µm). Terkadang fraksi kasar ini diberi nama khusus seperti “pasir oksida merah” (red oxide sand) atau “residu pasir” (sand residue), dan fraksi halus disebut “lumpur merah” (red mud). Fraksi kasar maupun halus ditangani dengan sangat berbeda di pabrik. Pasir fraksi kasar biasanya digunakan untuk pembangunan jalan di area penimbunan residu, untuk memberikan lapisan drainase di bawah lumpur atau sebagai bahan penutup untuk membangun pembatas/tanggul pada lokasi residu. Fraksi kasar jauh lebih mudah untuk dicuci dan memiliki kemampuan drainase yang jauh lebih baik sehingga memiliki kandungan residu kaustik yang lebih rendah. Namun, jika dibiarkan menyatu, maka kemampuan drainase residu bauksit dapat menjadi jauh lebih baik. Bauksit yang berasal dari sejumlah wilayah, seperti dari Australia Barat, terutama kandungan fraksi kasar yang tinggi dan bahkan pada beberapa kasus dapat mencapai 50 persen dari komponen komposisi bauksit.

III. Perencanaan dan desain jangka panjang

Dasar untuk perencanaan bauxite residue storage area (BRSA) atau area penyimpanan residu bauksit dikarakterisasi secara menyeluruh dari sifat fisik dan kimia dari bahan residu serta kondisi geologi, profil lingkungan dan sosial di lokasi maupun di sekitar lokasi penyimpanan yang diusulkan. Perencanaan juga harus melibatkan pihak berwenang dan masyarakat lokal /pemangku kepentingan.

Semua potensi risiko lingkungan, sosial, ekonomi, dan keamanan harus diidentifikasi dan perencanaan-perencanaan untuk manajemen lingkungan, pemantauan, penutupan, dan rehabilitasi harus menghasilkan keluaran pelaksanaan tindakan yang terbaik bagi lingkungan yang dapat diterima dan berisi pula pelaksanaan tindakan yang terbaik didalam mengurangi risiko-risiko tersebut selama masa operasi maupun setelahnya.

Proses pengkajian risiko harus ditetapkan pada tahap awal perencanaan daerah penyimpanan residu bauksit (BRSA) yang baru dan harus mencerminkan metodologi penilaian risiko yang direkomendasikan oleh Baku Mutu Australia/New Zealand AS/NZS4360:2004⁽¹⁾:

- Penetapan konteks – secara geografis, sosial dan lingkungan, dan memutuskan kriteria desainya;
- Identifikasi bahaya – apa yang bisa terjadi, di mana dan kapan, serta bagaimana dan mengapa?;
- Analisa risiko – mengidentifikasi kontrol yang ada, menentukan kemungkinan dan konsekuensi serta tingkat risiko;
- Evaluasi risiko – membandingkan risiko dengan kriteria desain, melakukan analisis sensitivitas untuk menyoroti baik risiko yang utama maupun yang tidak penting, dan menetapkan apakah risiko-risiko tersebut perlu ditangani;
- Penanganan risiko yang dipilih – mengidentifikasi dan mengkaji pilihan-pilihan mitigasi, memper siapkan dan melaksanakan rencana-rencana perlakuan, menganalisis serta mengevaluasi risiko residu.

Perlu pertimbangan khusus atas kemungkinan terjadinya gempa bumi, tsunami, angin topan, dan badai yang bisa berdampak pada keutuhan sistem.

Kondisi saat ini yang perlu diukur dan dicatat untuk membangun basis data lingkungan sebelum pembangunan BRSA, dan harus mencakup:

- Tingkat dan kualitas air tanah
- Kandungan air dan kondisi geokimia dari pengetahuan dasar tentang tanah dan bebatuan
- Mutu udara
- Fauna dan flora
- Tingkat radiasi secara alami dan latar belakang dimana aktifitas radioaktif yang dengan sumber bahan bauksit

- Kondisi geologi dan hidrogeologi setempat
- Sejarah kejadian-kejadian cuaca ekstrem.

Karakteristik fisik dan kimia dari residu bauksit harus diidentifikasi, dipantau dan dilaporkan dari waktu ke waktu dimana setiap perubahan pada karakteristik ini harus dikaji dengan hati-hati untuk menilai ada/tidaknya potensi dampak pada praktik-praktik yang tengah berlangsung maupun terhadap manajemen lokasi di masa yang akan datang.

Para operator harus bertanggung jawab didalam upaya memenuhi baku mutu kinerja yang ditetapkan oleh pemerintah dan yang diharapkan untuk terus melakukan perbaikan yang dimungkinkan.

Dampak negatif pada lingkungan yaitu pada tanah, air, udara dan biota harus diupayakan untuk dapat dihindari, dan setiap dampak terhadap nilai-nilai lingkungan harus memenuhi kriteria yang telah disetujui.

Kesehatan dan keselamatan masyarakat tidak dapat dikompromikan. Program pemantauan dan pelaporan publik yang ketat harus digunakan untuk menunjukkan kemajuan menuju, dan pencapaian atas, sasaran lingkungan yang telah disetujui, sehingga memungkinkan untuk dilakukan tindakan korektif atau penegakan ketentuan jika sasaran lingkungan tersebut tidak tercapai..

Fasilitas yang berhubungan dengan residu bauksit harus menunjukkan kemampuan melalui implementasi sistem manajemen yang sesuai (termasuk rencana tanggap darurat) yang disertai dengan pelatihan dan alokasi sumber daya yang cukup demi memastikan praktik terbaik diterapkan pada lokasi tersebut.

a. Kriteria desain fasilitas penyimpanan ⁽²⁾

Kriteria kunci dari desain fasilitas penyimpanan residu bauksit meliputi:

- Laju produksi residu minimum, maksimum dan rata-rata pada mana sistem beroperasi (m³/h)
- Karakteristik geokimia yang dapat mempengaruhi pemilihan desain yang paling sesuai untuk operasi dan penutupan
- Konsentrasi padatan dan konsentrasi padatan rata-rata (persentase berat)
- Tonase residu tahunan dan total selama masa operasi
- Kapasitas maksimum terpasang dari sistem air bersirkulasi balik (m³/jam)
- Jarak ke pemukiman dan saluran-saluran air
- Kecenderungan aktivitas seismik dan tsunami
- Target-target kesehatan dan keselamatan masyarakat, kepatuhan lingkungan dan masyarakat, yang dirumuskan dengan berkonsultasi dengan para pemangku kepentingan termasuk yang menyangkut rembesan, kualitas air tanah, penghentian kegiatan operasi, persyaratan rehabilitasi/penuhupan, kualitas udara dan radioaktif
- Kebutuhan-kebutuhan operasi dan pemeliharaan.

b. Konstruksi ⁽²⁾

Fasilitas penyimpanan dirancang dan dibangun oleh kontraktor/staf yang memiliki kualifikasi dan berpengalaman, dengan satu pengawasan dan pengendalian mutu yang sesuai atas bahan-bahan bangunan – mengacu kepada spesifikasi rancangan yang sesuai dengan standar nasional/internasional dan yang mencerminkan kondisi setempat.

Pertimbangan utama untuk desain struktur bendungan residu bauksit adalah:

- kondisi pondasi
- parameter geoteknik dari bahan-bahan bangunan
- Stabilitas geoteknik lereng timbunan
- rembesan dan kebutuhan akan drainase internal atau blok tanah liat kedap air (clay cores) dan dinding kedap air (cut offs) ke pondasi di bawah dinding bendungan
- konstruksi bertahap, baik dengan cara peninggian dinding secara bertahap, penambahan sel-sel kedap air ataupun pembangunan fasilitas baru satu per satu
- pemilihan teknik konstruksi dan persyaratan peralatan
- Jaminan mutu atas proses konstruksi.

c. Pengendalian rembesan ⁽²⁾

Aspek-aspek berikut perlu dipertimbangkan didalam perancangan pengendalian rembesan secara memadai:

- karakteristik hidraulik pondasi di bawah fasilitas penyimpanan residu, termasuk keberadaan dan nilai air tanah, dan kebutuhan akan pelapis kedap air (liner)
- karakteristik hidraulik dinding bendung, termasuk kebutuhan untuk claycore dan cut off ke dasar di bawah dinding bendung
- dampak rembesan dari residu pada air permukaan maupun air tanah
- pencegahan pembentukan lensa-lensa atau lapisan-lapisan dengan permeabilitas rendah pada timbunan residu (residue beach) yang dapat mengakibatkan masalah rembesan ataupun stabilitas di masa yang akan datang
- drainase bawah (under-drainage) untuk menghilangkan gravitasi drainase dari residu yang disimpan
- sistem pengurusan didesain dan dioperasikan untuk membatasi penyimpanan air supernatan maupun air hujan yang jatuh di permukaan residu, sehingga dapat membatasi perembesan.

d. Pengangkutan residu bauksit ⁽²⁾

Pembahasan didalam dokumen ini hanya dibatasi pada transportasi lumpur residu (slurry) melalui jaringan pipa.

Residu sering dipompa sebagai lumpur melalui satu jaringan pipa ke fasilitas penyimpanan. Koridor dari jaringan pipa lumpur haruslah didesain untuk mampu menjaga lingkungan dari tumpahan akibat kebocoran/kegagalan atau pecahnya pipa serta akibat kegiatan pembersihan pipa yang tersumbat. Inspeksi rutin terhadap jalur-jalur jaringan pipa juga harus dilakukan secara berkala

Metode pengendalian pembuangan residu jika terjadi insiden-insiden, antara lain:

- pembuatan saluran penampung di sepanjang koridor jaringan pipa
- pelapisan jaringan pipa dengan pipa berdiameter lebih besar pada kondisi dimana jaringan pipa residu melintasi lingkungan yang sensitif (misalnya pada penyeberangan sungai);
- penggunaan sensor tekanan diferensial (differential pressure sensor) atau alat pengukur aliran
- serta sistem alarm untuk memberi peringatan kepada operator jika terjadi kegagalan fungsi jaringan pipa.

Rekomendasi Pelaksanaan Tindakan Yang Terbaik

Perencanaan terpadu

- * Para perancang rencana residu, manajemen fasilitas dan kelompok yang bekerja pada masa penutupan harus bekerjasama dan berkomunikasi untuk mencapai indikator utama kinerja yang disingkat dengan KPI (Key Performance Indicator).
- * Akuntabilitas dan penunjukan koordinator adalah penting.

Desain penyimpanan

- * Kapasitas harus didasarkan pada kinerja dan sejalan dengan penilaian tingkat risiko.

Neraca air

- * Mengintegrasikan satu rencana siklus air (life cycle).
- * Menetapkan standar untuk manajemen air tanah dan air permukaan.

Ruang

- * Ruang harus mencukupi untuk memenuhi perkiraan kebutuhan selama masa pengolahan/produksi. Rencana penyimpanan residu (termasuk waktu pengeringan, ruang yang diperlukan) perlu dikaitkan/sejalan dengan rencana operasi (misalnya dalam peningkatan kapasitas).



Area Penyimpanan Residu Bauksit Rusal, Aughinish, Irlandia

IV. Tata kelola

Harus ada akuntabilitas manajemen yang jelas terhadap setiap aktivitas residu bauksit pada level senior, dengan pemahaman menyeluruh tentang tujuan desain, operasi dan penutupan.

Satu panduan operasi harus disediakan di setiap fasilitas penyimpanan - dan selaras dengan maksud dan tujuan desain fasilitas tersebut – untuk menjadi panduan bagi para operator fasilitas di dalam melakukan operasi sehari-hari, serta untuk perencanaan ke depan mengenai operasi dan pemeliharaan fasilitas.

Panduan operasi harus menjelaskan, dan para operator harus mendapatkan pelatihan dalam hal:

- pengoperasian fasilitas sehari-hari
- pembuangan residu – pengeringan lapisan untuk memaksimalkan kekuatannya dan meminimalkan rembesan
- Manajemen air dalam kolam pengurasan (decant pond) dan penggunaan air yang efisien didalam pengendalian stabilitas debu
- prosedur-prosedur yang terkait dengan tindakan pencegahan khusus, seperti urutan yang benar didalam pembukaan/penutupan katup pengatur untuk menghindari terjadinya penyumbatan pada jaringan pipa residu prosedur untuk mengubah dan membilas jaringan pipa residu
- indikator-indikator utama yang digunakan untuk memantau keberhasilan pengoperasian fasilitas
- peran dan tanggung jawab operator didalam mendukung rencana pengelolaan residu
- pemeliharaan terjadual dan yang bersifat pencegahan untuk menjaga peralatan penting tetap operasional
- perekaman dan penyimpanan data hasil pemantauan dan kinerja
- pelaporan setiap kejadian yang tak terduga, tak diinginkan atau tidak sesuai rencana kepada seorang penyelia (supervisor), dan menindaklanjutinya dengan tindakan tanggap dan manajemen risiko.

Pemantauan fasilitas residu bauksit harus mencakup:

- Instalasi peralatan pemantauan air tanah di bawah dan di sekitar fasilitas
- Pengambilan contoh air permukaan dan air tanah bagi pemeriksaan mutunya, yang berada di arah hulu dan hilir dari fasilitas residu

Inspeksi harian dari semua fasilitas penyimpanan residu bauksit dan semua yang terkait dengan sistem pemompaan dan jaringan pipa harus dilakukan dan hasil observasi tersebut harus tercatat dengan baik. Observasi terhadap kejadian yang tidak biasa ataupun adanya kebutuhan untuk pemeliharaan yang diluar perkiraan harus didokumentasikan dan tindakan yang sesuai dilakukan, termasuk pelaporan kepada pihak yang berwenang serta masyarakat. Pemeriksaan harus mencakup:

- Posisi kolam air kurusandan observasi yang terkait dengan kebutuhan tinggi jagaan (free board) yaitu jarak vertikal dari puncak tanggul hingga permukaan air
- Pemeriksaan visual dan operasi terhadap indikator-indikator utama seperti tingkat kelembaban, rembesan, dan erosi
- status sistem deteksi kebocoran dan sistem penahanan (containment) sekunder
- Status pengukuran aliran otomatis dan tanda bahaya atas terjadinya kerusakan
- keutuhan bendungan/tanggul/parit
- Kondisi sistem pompa dan jaringan pipa
- Pengkajian dampak atas kawanan burung dan kehidupan alam bebas lainnya ataupun ternak

a. Rencana aksi tanggap darurat⁽²⁾

Semua fasilitas penyimpanan residu bauksit harus dilengkapi dengan satu rencana aksi tanggap darurat. Hal ini untuk memastikan bahwa jika terjadi satu kegagalan yang tidak diharapkan, maka tindakan yang memadai dapat segera dilakukan untuk meminimalkan risiko terhadap keselamatan masyarakat yang berada baik di dalam maupun di luar lokasi, serta untuk meminimalkan dampaknya atas lingkungan melalui penanganan kecelakaan dengan cara yang sistematis dan terorganisasikan. Pada masyarakat Ekonomi Eropa (EU), ketika area limbah residu telah ditetapkan sebagai lokasi yang berbahaya maka

peraturan EU mewajibkan penyediaan informasi mengenai penanganan keadaan darurat kepada pihak-pihak yang berwenang.

Rencana aksi tanggap darurat harus meliputi:

- mengidentifikasi kondisi-kondisi yang mungkin dapat menimbulkan situasi darurat, seperti badai, tsunami, sabotase
- menyusun prosedur untuk menyelamatkan masyarakat dari bahaya, termasuk peringatan dan evakuasi terhadap masyarakat yang berada di hilir
- mengidentifikasi rencana tanggap darurat untuk memitigasi dampak, seperti rencana pembersihan (clean-up) dan sumber daya yang dibutuhkan untuk mengimplementasikan rencana dan aksi tanggap darurat
- mengidentifikasi kebutuhan pelatihan tanggap darurat bagi pihak-pihak tertentu yang memegang peran kunci dan mendokumentasikan lokasi-lokasi alarm peringatan serta kebutuhan pemeliharaan guna memastikan berfungsinya semua peralatan dan pelayanan setiap saat.

Rekomendasi Pelaksanaan Tindakan Yang Terbaik

Tata kelola harus mencakup keseluruhan daur-hidup fasilitas, termasuk:

- * desain operasi,
- * konstruksi,
- * operasi dan
- * penutupan dan pasca-penutupan

Tata kelola harus berpedoman kepada proses-proses tingkat tinggi berikut:

- * memahami apa yang harus dilakukan – matriks penilaian tanggung jawab yang disingkat dengan RACI (responsibility assessment matrix)
- * mengetahui keseluruhan macam kegiatan
- * memahami bagaimana melakukannya – metode dan prosedur kerja standar, indikator kinerja yang jelas
- * audit dilakukan pada semua tingkatan terhadap semua tujuan yang jelas.

Sistem Manajemen Perubahan

- * menetapkan secara jelas proses perubahan manajemen– khusus fokus kepada manajemen terhadap perubahan-perubahan kecil
- * proses manajemen perubahan yang jelas dan sederhana.

Rencana Aksi Tanggap Darurat

- * rencana aksi tanggap darurat berdasarkan penilaian risiko tersedia dan dilatih-ulang.

Akuntabilitas Manajemen Senior

- * pastikan adanya tautan yang jelas antara bahaya dengan pandangan manajemen senior;
- * ada struktur manajemen serta akuntabilitas yang jelas didalam pengelolaan fasilitas.

Manajemen Produksi dan Residu Terpadu

- * proses penyulingan dan residu berkaitan erat
- * keputusan selalu dibuat pada level yang benar dalam organisasi
- * analisis skenario dan pelatihan
- * aksi-aksi pemicu didefinisikan dengan jelas

Manajemen Perekaman

- * memelihara rekaman data historis (history of records)
- * memiliki prosedur manajemen perekaman yang sesuai
- * memiliki proses audit rekaman dan arsip yang sesuai

V. Pelacakan kinerja

Pelacakan atau evaluasi kinerja (performance tracking) diperlukan dalam setiap operasi yang berupaya untuk mencapai praktik terbaik di dalam pengelolaan residu guna mempertahankan keselarasan operasional dengan rencana dan tujuan desain.

Kewaspadaan diperlukan untuk memastikan bahwa indikasi penyimpangan dari rencana manajemen residu dapat diantisipasi sedini mungkin guna memberikan peluang untuk mengkaji, dan jika diperlukan, menyusun rencana tanggap darurat pada saat yang tepat.

Hal ini meliputi:

1. penghitungan sejauh mana rencana manajemen deposisi (penimbunan residu) diimple mentasikan;
2. kombinasi observasi lapangan secara tetap oleh petugas pendukung teknis dan operasional yang terlatih dengan penyediaan data secara otomatis menggunakan peralatan yang sesuai dan terkalibrasi. Frekuensi inspeksi harus ditentukan setelah dilakukan suatu pengkajian risiko.

Hal ini dimaksudkan untuk memberikan umpan balik yang berguna bagi petugas operasional untuk melaksanakan rencana manajemen deposisi jangka pendek. Semua tingkatan manajemen operasional perlu menyadari dan memahami peran dan tanggung jawab mereka yang terkait dengan pelacakan kinerja dan kriteria kunci di dalam manajemen residu.

Aspek kunci dari data pelacakan kinerja perlu dikomunikasikan dan dipahami oleh pengelola fasilitas guna memastikan pembuatan rencana dan prakiraan jangka panjang yang realistis. Demikian pula, akuntabilitas dan tanggung jawab untuk akuisisi data, pelaporan, manajemen dan tindakan yang diperlukan di dalam indikator-indikator data utama perlu didokumentasikan, dipahami dan disepakati secara jelas, di semua tingkatan.

Satu dokumen yang menguraikan kompetensi dan akuntabilitas utama yang diperlukan yang mencakup seluruh tingkatan suatu organisasi adalah sangat penting bagi kelanjutan pelacakan kinerja dan pelaporan. Lebih lanjut, pentingnya kewajiban-kewajiban untuk mempertahankan pelacakan kinerja yang bermutu dan berkelanjutan perlu sepenuhnya dipahami dan diperhatikan. Pengkajian secara rutin terhadap ketersediaan arus informasi yang memadai dibutuhkan untuk memastikan adanya konsistensi kepatuhan terhadap aturan-aturan didalam sistem. Penggunaan sistem KPI sangat disarankan guna menyediakan satu perangkat kinerja yang mudah dilacak dan progresif.

Manajemen data haruslah:

- Transparan – lengkap, tidak diringkas dan semua lembar kerja dapat diaudit hingga ke sumber data mentahnya;
- Mudah untuk diakses – tersedia bebas untuk setiap anggota organisasi sesuai dengan
- kualifikasi pekerjaan masing-masing dan tidak dibatasi hanya untuk satu departemen atau bahkan pada satu perangkat computer tertentu saja. Penelusuran data secara aktual atau real-time diperlukan untuk semua aspek operasi yang dapat mengarah kepada kebutuhan akan satu skenario tanggap darurat guna memastikan adanya peringatan dini yang tepat waktu atas risiko yang sudah dapat diperkirakan sebelumnya;
- mewakili – semua data yang dikumpulkan perlu memberikan satu gambaran real istis tentang kondisi aktual dan pelacakan kinerja serta (sedapat mungkin) tidak diturunkan dari atau hasil penghitungan kebelakang dari model-model teoritis sampai saat penyelar asan data lapangan dengan model tersebut telah divalidasi secara memadai;
- menyeluruh - sejauh yang memungkinkan semua kumpulan data itu sendiri telah lengkap dan tidak tergantung pada perhitungan-perhitungan atau interpretasi berikutnya dari model atau pihak luar agar ia dapat dipahami, diterapkan atau untuk menutup siklus-siklus kontrol atau arus.

Alokasi anggaran untuk evaluasi kinerja harus dirumuskan berdasarkan antisipasi risiko, NPV dan skenario kerugian dan tidak dibatasi hanya pada penilaian jangka pendek. Kendati banyak metode yang sederhana, efektif dan murah didalam melakukan pelacakan atau evaluasi data lapangan secara manual, namun sistem pengumpulan atau akuisisi data otomatis lebih dipilih dibandingkan dengan cara pengumpulan data oleh operator agar lebih terjamin didapatkannya data penelusuran yang berkelanjutan pada kisaran kondisi yang lebih luas. Oleh karena itu, teknik akuisisi data yang paling sesuai dan paling dapat diandalkan yang perlu dipilih dan bukan teknik yang paling murah atau mudah.

Proses audit, baik yang dilakukan secara internal maupun oleh pihak ketiga harus menggunakan metodologi-metodologi yang dipakai untuk akuisisi data pelacakan kinerja guna memastikan:

- resolusi dan kesesuaian data yang mencukupi sebagaimana ditentukan dalam pedoman-pedoman yang berlaku;
- keterkaitannya dengan mitigasi atau pengkajian risiko;
- Rancangan kinerja yang menyeluruh.

Asumsi-asumsi yang mendasari prinsip-prinsip perencanaan dan manajemen perlu divalidasi sepenuhnya, mudah didapatkan dan dikaji kembali begitu terjadi perubahan-perubahan didalam operasi-operasi ataupun perubahan pada kualitas dan/atau kuantitas residu.

Tinjauan atau penilaian tersebut harus mempertimbangkan⁽²⁾:

- kinerja dibandingkan dengan desainnya – ketinggian lereng dan pantai timbunan residu, tonase residu dan volume yang terpakai
- penilaian stabilitas pada keadaan beban normal dan seismik serta peristiwa-peristiwa meteorologis yang sudah diperhitungkan, parameter-parameter residu in situ (kepadatan, kekuatan dan permeabilitas) serta posisi permukaan air bawah permukaan (freatik)
- kinerja dari peralatan pengendalian rembesan seperti drainase-bawah atau under-drain (untuk kontrol rembesan), atau saringan-saringan internal (yang mengendalikan erosi internal atau erosi 'pipa')
- kondisi bahan pelapis atau liner – jika digunakan
- riwayat kejadian-kejadian meteorologi yang ekstrem
- status dan kondisi sistem pemantauan, kinerjanya didalam mendeteksi perubahan atas indikator-indikator utama (lingkungan dan/atau struktural), dan analisis serta evaluasi data hasil pemantauan dibandingkan dengan tren atau kecenderungan yang diprediksi sebelumnya
- hasil-hasil pemantauan air tanah – perbandingan ketinggian dan kualitas air tanah terhadap basis data dasar serta terhadap kriteria desain dan penutupan, dengan menimbang:
 - » Rembesan lateral dekat permukaan yang mungkin bisa menyebabkan tekanan pada vegetasi ataupun menimbulkan ketidakstabilan pada dinding bendungan
 - » Rembesan vertikal yang dapat menciptakan gundukan lokal di bawah lokasi penyimpanan
- Kinerja operasional - praktik-praktik pengendapan residu (lapisan tipis) dan pengendalian air permukaan (air simpanan yang sesedikit mungkin serta pemeliharaan yang disyaratkan bagi terjaganya ketinggian maksimum permukaan residu atau freeboard)
- pengkajian insiden-insiden operasional dan rekomendasi untuk perbaikan atau modifikasi guna memperbaiki kekurangan-kekurangan.

Rekomendasi Pelaksanaan Tindakan Yang Terbaik

Kebijakan dan perencanaan

- * pastikan struktur organisasi dan sumber daya yang tersedia sejalan dan melengkapi kemampuannya untuk dapat mempertahankan rencana jangka panjang.

Pelatihan dan akuntabilitas

- * didefinisikan dengan jelas untuk memastikan semua tingkatan didalam organisasi memiliki kualifikasi yang memadai untuk bertanggung jawab dalam pelacakan kinerja; informasi dikumpulkan dan disusun dengan cara yang berarti guna memastikan tujuan dari kegiatan pelacakan kinerja terpenuhi sehingga dapat mendukung baik tujuan jangka pendek maupun jangka panjang dan konsisten dengan rencana jangka panjang yang telah ditetapkan.

Manajemen data

- * data dikumpulkan dengan cara yang tepat (menyeluruh dan representatif) dan dikelola untuk memastikan terlaksananya komunikasi yang efektif di antara semua tingkatan manajemen (transparan dan mudah diakses).

Anggaran

- * pastikan bahwa justifikasi atas pengeluaran dijalankan guna menerapkan dan memelihara Perangkat Pelacakan Kinerja dan perlengkapan-perengkapan.

Audit kinerja

- * dilakukan pada frekuensi yang tepat oleh pihak ketiga yang independen untuk memastikan operasi berkelanjutan selaras dengan rencana jangka panjang dan validasi berkelanjutan atas asumsi-asumsi yang digunakan;
- * audit internal yang sedang berjalan terhadap semua aspek kinerja manajemen residu perlu dilakukan diperlukan dengan audit eksternal dilakukan setidaknya setiap tahun oleh pihak ketiga yang berkompeten, dimana mereka bukanlah bagian dari kelompok penunjang operasional sehari-hari untuk dapat menghindari terjadinya hal-hal yang berkaitan dengan konflik kepentingan.

Perencanaan Kedepan

- * Tujuan-tujuan praktik terbaik harus dikembangkan untuk mendorong satu budaya perbaikan secara terus-menerus. Tolak ukur (benchmarking) lintas operasional harus dilaksanakan dengan menggunakan pengukuran-pengukuran baku yang disepakati (seperti intensitas pengendapan tahunan didalam area penimbunan limbah aktif) untuk memastikan teknik-teknik pembuangan serupa adalah yang terbaik kinerjanya.



Gedung Jamaica Bauxite Institute terbuat dari batubara residu bauksit

VI. Pembuangan dan penyimpanan residu bauksit

a. Pengolahan sebelum dibuang dan disimpan

Soda api merupakan saran utama dan menjadi didalam proses ekstraksi dan pabrik selalu berusaha untuk mengambil kembali sebanyak mungkin sehingga bisa digunakan kembali didalam proses Bayer. Keinginan untuk memproduksi residu dengan kandungan residu soda yang semakin rendah bahkan telah mendorong tren ini lebih jauh lagi. Terjadi peningkatan yang progresif dan kini tingkat Pengambilan kembali pada umumnya lebih dari 96 persen.

Kelly filters dan alat pencuci multi-ruang (multi-chamber washers) memungkinkan digunakannya bahan pengental Super (Super thickeners), alat pencuci kerucut dalam (deep cone washers), penyaring pelat hampa (vacuum disc filters), penyaring drum hampa (vacuum drum filters), penyaring pelat dan bingkai (plate and frame filters); Kandungan padatan residu yang dihasilkan kini telah meningkat dari sekitar 20% menjadi sekitar 77 persen.

b. Transportasi

Karakteristik penanganan dan metode pengurusan adalah factor-faktor utama didalam metode yang digunakan untuk mengangkut residu bauksit. Jika kandungan padatan berada di atas sekitar 75% maka diperoleh potongan-potongan yang mudah ditangani (handleable cake), yang dapat dimuat ke dalam truk-truk atau banberjalan (conveyor belt). Jika residu mengandung kelembaban lebih dari 28% maka akan muncul perilaku thixotropic dimana viskositas atau kepekatan residu turun ketika mengalami getaran atau agitasi mekanik.

c. Metode-metode pembuangan dan penyimpanan

Residu bauksit yang dihasilkan saat ini untuk digunakan kembali dengan berbagai cara hanya dalam jumlah kecil. Topik tentang pemanfaatan residu bauksit akan dibahas kemudian. Penanganan dan penyimpanan residu bauksit ditentukan oleh faktor-faktor seperti usia pabrik, ketersediaan lahan, kedekatannya dengan laut, keberadaan fitur-fitur lokal (seperti tambang-tambang tua), iklim, logistik, sifat residu, dan peraturan-peraturan setempat.

Secara historis, pabrik akan membuang residu bauksit baik di lokasi operasi itu sendiri atau di lahan yang berdampingan. Residu ini dapat dimanfaatkan untuk mengisi cekungan, lembah dan lubang-lubang tambang. Ketika tidak ada lokasi yang cocok, maka dibuatlah lokasi-lokasi yang dikelilingi oleh dinding-dinding atau tanggul penahan (yang sering disebut sebagai kolam/bendungan penampung atau impoundment). Lokasi-lokasi semacam ini jarang sekali diberi alas pelindung (liners), sehingga dalam banyak kejadian, cairan yang tinggi kadar alkalinya merembes keluar dari lokasi penimbunan residu tersebut. Dengan berjalannya waktu, sejumlah perbaikan yang cukup berarti berhasil dilakukan baik didalam hal manajemen, pengawasan, maupun pemantauan dari lokasi-lokasi penimbunan residu ini, didalam upaya meminimalkan risiko pencemaran di luar lokasi dan agar upaya restorasi di akhir masa penggunaannya menjadi lebih mudah dan efektif. Sejalan dengan kemajuan yang dicapai dunia industri, perencanaan dan pemikiran yang cukup berarti telah dilakukan menyangkut strategi penutupan lokasi penimbunan residu, yang kini merupakan satu syarat utama bagi semua jenis operasi modern dewasa ini.

Pembuangan ke laut

Praktik pembuangan residu bauksit ke laut baik melalui jaringan pipa dari pantai maupun ke dalam palung laut dalam sesungguhnya dilakukan di sejumlah kecil tempat saja. Metode ini secara bertahap dihapus kendati berdasarkan hasil penelitian di Laut Mediterania maupun Samudera Pasifik menunjukkan bahwa metode ini memiliki efek samping yang minimal terhadap lingkungan laut. Pembuangan ke Sungai Mississippi ataupun Muara Severn sempat dilakukan oleh pabrik alumina Gramercy dan Newmont tetapi sudah dihentikan pada pertengahan tahun 1970.

Lagooning atau Kolam Penampungan

Lagooning dilakukan dengan memompa lumpur yang relatif encer (dengan kandungan padatan antara 15-30%, seringkali 18-22%) ke dalam cekungan-cekungan, bekas galian tambang tua, daerah-daerah yang dibendung dengan tanggul atau lembah yang dibendung. Cara-cara tersebut merupakan metode pembuangan tradisional yang dipraktekkan oleh hampir semua pabrik alumina lama.

Di beberapa lokasi penggunaan lapisan pelindung dilakukan guna mencegah perembesan ke dalam air tanah, namun di banyak lokasi lama lainnya cara ini tidak dilakukan. Padatan akan mengendap dan larutan cairan dikembalikan ke pabrik agar dapat digunakan kembali atau dikeringkan dengan menggunakan alat demisters. Dalam jangka waktu yang lama kolam-kolam ini akan terus diisi, padatan akan terkonsolidasi sehingga lokasi tersebut kemudian bisa direhabilitasi. Rehabilitasi ini dapat dilakukan dengan memberikan timbunan penutup (*capping*) atau dengan menggunakan pendekatan seperti pemberian gipsum untuk mendorong proses revegetasi. Profil permukaan lokasi rehabilitasi biasanya dirancang sedemikian rupa sehingga air hujan melimpas ke luar daerah rehabilitasi dan tidak dibiarkan untuk terkontaminasi. Sering terjadi cairan lindi (*leachate*) yang bersifat basa dari area tersebut tetap perlu dikumpulkan dan dibuang dengan cara yang aman selama beberapa dekade; kegiatan ini mungkin melibatkan upaya pengumpulan, netralisasi dan filtrasi untuk membuang padatan terpresipitasi, atau mengembalikan cairan lindi tersebut ke kilang pengolahan ataupun langsung di olah di sistem pembuangan limbah.

Resiko nyata pada metode pembuangan ini yaitu ketika area yang dibendung (*impounded area*) bisa saja mengandung lumpur yang tidak terkonsolidasi serta mengandung cairan basa atau alkali dalam jumlah banyak. Jika terjadi kegagalan pada bendungan akibat gempa tremor, hujan sangat lebat, tsunami, konstruksi atau pemeliharaan yang buruk maka kandungan dam tersebut dapat mencair dan lumpur serta cairan yang ada mengalir keluar melalui lubang-lubang retakan pada dinding atau tanggul bendungan. Dalam kondisi cair seperti ini lumpur bisa mengalir hingga jarak yang cukup jauh. Kerugian lainnya dari penggunaan metode pembuangan ini adalah terjadinya sterilisasi terhadap lahan yang telah digunakan ketika areal tersebut diisi serta biaya berjalan untuk kegiatan pengumpulan, pengolahan dan pemantauan cairan lindi serta pemantauan lokasi penimbunan dan wilayah sekitarnya.

Penimbunan Lumpur Kering

Ketika sistem laguna tidak memungkinkan dikarenakan keterbatasan ruang, maka penimbunan dipergunakan sebagai prosedur pembuangan. Misalnya di Inggris, metode lama "penimbunan lumpur kering" dipakai pada tahun 1941 oleh pabrik British Aluminium Company di Burntisland. Sebuah alat pres pelat dan bingkai digunakan dan lumpur yang dihasilkan diangkut melalui jalan darat ke lokasi pembuangan terdekat yang merupakan bekas tambang tua. Pada pertengahan 1960, Giuliani GmbH menggunakan sistem penumpukan lumpur kering untuk pabrik mereka di Ludswighafen, Jerman, setelah lumpurnya disaring menggunakan alat filter vakum berputar.

Konsep yang lebih umum mengenai penimbunan tailing industri ditemukan pada pertengahan 1960 saat sistem pembuangan limbah kental tailing dikembangkan oleh Dr E I Robinsky dan terus berkembang selama bertahun-tahun. Konsep ini pertama kali dipakai di Ontario, Kanada pada pertengahan tahun 1970 di pertambangan Kidd Creek. Sistem pembuangan limbah kental tailing ini melibatkan upaya pengurangan kadar air tailing di bawah satu level kritis sehingga menghasilkan konsentrasi residu padatan yang lebih tinggi dan mengembalikan lebih banyak cairan hasil olahan kembali ke pabrik. Ketika tailing digelontorkan, limbah ini masih akan mengalir namun tanpa pemisahan. Aliran ini akan berhenti pada satu sudut yang landai dimana targetnya adalah untuk mencapai 2-6 persen kemiringan lereng yang tergantung kepada kondisi iklim. Dalam kondisi iklim yang sangat kering, lereng yang lebih curam dapat dicapai. Jumlah yang lebih besar dari padatan dapat disimpan di area yang tersedia sehingga biaya pembuatan tanggul atau bendungan dapat berkurang. Keuntungan lainnya adalah ketika kekentalannya mencukupi, residu tidak akan mudah kembali menjadi lumpur cair sehingga hujan akan melimpasi permukaan dan dapat dikumpulkan lalu dibuang, sehingga memungkinkan terjadinya pengeringan oleh udara dan juga membantu terjadinya konsolidasi. Metode Robinsky dimana lumpur dialirkan dari satu titik tunggal secara terus-menerus ke satu permukaan timbunan kemudian dikenal sebagai metode timbunan atau onggokan basah (*Wet Stacking*), sistem yang diadopsi pada daerah beriklim basah bertemperatur rendah.

Persyaratan bagi terciptanya satu timbunan lumpur yang dapat ditumpuk adalah bahwa timbunan itu dikentalkan hingga tingkatan yang cukup tinggi sehingga tegangan luluh (*yield stress*) yang dihasilkan dapat mengakibatkan timbunan itu menumpuk pada satu sudut positif terhadap bidang horizontal. Kandungan padatan yang ditargetkan akan bergantung kepada karakteristik residu, terutama pada distribusi ukuran partikelnya. Sebagaimana yang telah dibahas di atas, di beberapa kilang alumina, lumpur dipisahkan dari fraksi pasir kasarnya sementara di pabrik-pabrik lainnya fraksi tersebut tidak

dipisahkan untuk pembuangan. Fraksi halus dari residu bauksit dapat dikentalkan menjadi lumpur berkepadatan tinggi (48–55% padatan atau lebih) dengan menggunakan pengental mutakhir dan teknologi flokulasi di pabrik alumina.

Ketika disimpan sebagai satu timbunan bertumpuk, air hujan akan cenderung melimpas keluar sehingga meminimalkan cairan yang tersimpan di areal pembuangan. Air yang direklamasi dari permukaan timbunan tersebut dipompa kembali ke pabrik guna mengikat garam-garam natrium yang mudah larut. Areal penumpukan residu kerap kali dilakukan pengeringan melalui penirisan (under-drain) guna meningkatkan konsolidasi residu dan mendapatkan lebih banyak air daur-ulang sehingga bisa digunakan kembali di pabrik pengilangan. Kombinasi sistem penumpukan berdrainase baik menghasilkan deposit residu yang sangat stabil.

Pengurangan air secara signifikan dapat diperoleh dengan cara “bertani” lumpur. Pada salah satu metoda, parit-parit digali pada interval, katakanlah 25 m, di areal deposit lumpur dan air dibiarkan mengalir keluar menuju parit-parit pembuangan. Lumpur-lumpur yang dihasilkan mulanya berkadar air sangat tinggi dan alat pengangkut yang digunakan haruslah berjenis amfibi. Pengurangan air di lapisan-lapisan permukaan dapat dilakukan dengan melintasi areal penimbunan tersebut dengan kendaraan-kendaraan yang memiliki rol-rol (amphiroles) yang sangat besar yang dapat ‘memeras’ air dari lapisan permukaan lumpur yang dilintasi. Parit-paritnya secara berkala diperdalam sejalan dengan bertambahnya air yang mengalir keluar dan material residu mengkonsolidasi sehingga dapat dipindahkan ke lokasi lain untuk penyimpanan. Kandungan padatan dari material ini berkisar 60-65 persen. “Pertanian lumpur” atau mud farming juga telah digunakan dengan satu cara yang menguntungkan untuk meningkatkan karbonasi sehingga dapat mengurangi pH lumpur; pada satu prosedur tertentu yang umum dilakukan, lumpur dibajak dan digaru setiap hari selama satu periode tertentu guna meningkatkan kontak antara udara dan lumpur.

Dalam iklim yang lebih panas, dimana penguapan dapat memainkan peran yang lebih besar, ‘timbunan lapisan tipis’ terbentuk. Cara ini diadopsi pada pertengahan tahun 1980 di Jamaika dan Australia Barat, dan pada tahun 1992 di Gove serta pada tahun 2007 di QAL (Queensland Alumina Limited). Ketika iklimnya sesuai, cara itu merupakan metode yang lebih dipilih untuk pembuangan serta digunakan pada banyak kilang yang baru dibangun. Dalam sistem ini lumpur teditutupi dengan lumpur baru sebelum mencapai kadar kekeringan yang ditargetkan, sekitar 70 persen.



Pertanian Lumpur (Mud Farming) Rusal, Aughinish, Irlandia

Teknologi “Super-thickening” telah dikembangkan oleh Alcoa dengan menggunakan alat pengental gravitasi berdiameter besar untuk menguras air lumpur untuk menghasilkan padatan dengan kandungan > 50 persen. Residu dengan kandungan padatan yang tinggi ini masih dapat dipompa namun biasanya dengan menggunakan surfaktan.

Limbah/Pembuangan Kering

Residu bauksit dapat divakum atau disaring dengan bertekanan tinggi hingga membentuk semi-dry cake (>65% padatan); jika diperlukan air atau uap dapat digunakan untuk menurunkan alkalinitas sebelum diangkut, disimpan atau digunakan. Filer-filter pelat dan bingkai telah digunakan sejak 1930-an sedangkan penyaring-penyaring hampa berputar mulai digunakan sejak 160-an. Penyempurnaan didalam hal peralatan, terutama pada filtrasi bertekanan, menghasilkan kandungan padatan material yang lebih tinggi (lebih dari 70% di Gardanne dan Distomon) sehingga lebih mudah ditangani. Beberapa uji coba juga telah dilakukan dengan menggunakan filtrasi uap tekanan sangat tinggi atau Hyperbaric (Hi-Bar). Peralatan tersebut merupakan pengembangan dari prinsip filter piringan dengan menggunakan satu perbedaan tekanan hingga 6 bar dan yang telah berhasil digunakan pada lumpur batubara halus. Diklaim kandungan padatan dapat mencapai 77 persen.

d. Netralisasi

Netralisasi residu secara parsial maupun menyeluruh terkadang diterapkan. Hal ini dapat tercapai dengan menggunakan zat asam (biasanya asam sulfat atau asam hidroklorida), karbondioksida, sulfurdioksida, air laut atau air asin terkonsentrasi (proses Virotec). Netralisasi parsial dari residu bauksit dapat mengurangi potensi bahaya yang berhubungan dengan deposit dan dapat membantu revegetasi lahan selama proses pemulihan. Potensi ini bisa jadi pilihan menarik bagi sejumlah pabrik tetapi tergantung pada lokasi pabrik serta kedekatan dengan laut atau sumber-sumber karbondioksida atau gas-gas buang. Dalam hal proses Virotec, satu produk yang tidak berbahaya yang bernama Bauxsol® diproduksi dengan mereaksikan residu bauksit dengan air asin terkonsentrasi.

Di sejumlah kawasan pantai (seperti pada Queensland Alumina Limited dan fasilitas Rio Tinto Alcan Yarwun - keduanya terletak di Gladstone, Queensland), air laut digunakan untuk mengurangi pH dari cairan lindi yang bersifat alkalin (alkaline leachate). Dalam kebanyakan kasus cairan atau larutan ini diolah hingga mencapai tingkat atau kadar tertentu yang memungkinkan untuk dibuang ke laut atau ke muara. Jenis-jenis residu natrium larut (residual soluble sodium) dalam residu bauksit bereaksi dari waktu ke waktu dengan karbondioksida di udara untuk membentuk natrium karbonat/bikarbonat di sana sehingga dapat mengurangi pH lumpur. Cara ini memiliki manfaat tambahan dari perspektif perubahan iklim yaitu dengan mengunci karbondioksida. Dengan jangka waktu yang cukup cara ini dapat mereduksi pH permukaan kolam yang kering hingga kurang dari 10.

Sarana untuk mempercepat ini telah dipikirkan selama bertahun-tahun. Reduksi pH pada sulfurdioksida menggunakan gas buang telah digunakan oleh sejumlah pabrik, misalnya Eurallumina, Sardinia sejak pertengahan tahun 1970 dengan banyak manfaat.

Netralisasi parsial oleh air laut dapat secara efektif menurunkan pH antara 8-8,5 dan menurunkan konsentrasi hidroksil dan anion-anion aluminat sehingga membentuk senyawa kalsium dan magnesium seperti kalsit, aragonit, brucite, hydrotalcites, alumino hydrocalcite, hydrocalumite, pyroaurite. Penambahan kalsium, magnesium dan kalium bersamaan dengan pengurangan pH akan membantu revegetasi meskipun air hujan dibutuhkan guna mengurangi kadar natrium lebih lanjut. Bahkan pH dari residu yang lebih rendah dapat dicapai dengan menggunakan asam-asam mineral, dan residu-residu yang mengandung pH 7,5 dapat dicapai dengan menggunakan asam klorida.

Rekomendasi Pelaksanaan Tindakan Yang Terbaik

Meskipun teknologi terus berkembang namun perlu disepakai bahwa perubahan metoda pembuangan bauksit bagi pabrik masih kesulitan. Faktor-faktor seperti kedekatan dengan laut; ketersediaan lahan yang sesuai; sifat dan karakter residu; curah hujan tahunan; karakteristik penguapan air (evaporasi) oleh matahari maupun angin sesuai dengan iklim di tempat dimana pabrik berada; ketersediaan bahan-bahan penurun pH yang ekonomis seperti karbondioksida, sulfurdioksida, air laut, dan larutan asam, kesemuanya mempengaruhi proses pengambilan keputusan. Sebagian dari fasilitas-fasilitas penimbunan itu sudah tidak mungkin lagi untuk diubah, sementara sebagian lainnya bisa menjadi tidak ekonomis lagi untuk dioperasikan.

Setiap pabrik adalah penting untuk melakukan satu pengkajian risiko dengan mempertimbangkan karakteristik padat-cair dari residu, jumlah yang disimpan, sifat berbahaya dari material yang disimpan (terutama pH), ketinggian dan tipe bendungan/tanggul yang digunakan untuk menampung material, risiko daerah tersebut terkena gempa bumi, hujan deras, angin topan, badai siklon, tsunami, sabotase, dll.

Pembuangan residu bauksit ke laut/muara akan berhenti pada tahun 2016 yang disepakai berlaku secara umum.

Sifat Residu Bauksit

- * harus ada tujuan menyeluruh untuk mengurangi dan/atau menstabilkan kadar residual soda (dan cairan-cairan terkait);
- * jika dimungkinkan, sebuah lokasi tambang harus melakukan netralisasi residu guna mencegah material/ limbah masuk ke dalam kategori berbahaya.

Pengangkutan Residu

- * jika dimungkinkan, pisahkan jalan-jalan angkutan di lokasi dengan jaringan pipa residu aktif;
- * mengontrol, memuat atau mengisolasi jaringan pipa residu dengan memasang pelat-pelat pengaman kebocoran, tanggul-tanggul pengaman atau menjauhkan lokasinya dari daerah lalu lintas;
- * menetapkan satu tolak ukur untuk pemantauan sistem distribusi/ pengangkutan;
- * mempersiapkan dan prosedur uji tanggap darurat atas kemungkinan terjadinya tumpahan, kebocoran serta kegagalan atau kecelakaan lainnya.

Pengendalian Buangan dan Manajemen Endapan

- * menetapkan prosedur pengendalian endapan yang optimal untuk setiap operasi;
- * mendokumentasikan dan melakukan pembenaran atas tugas-tugas yang diperlukan bagi kinerja BRSA yang berkelanjutan.



Filter bertekanan di Pengilangan Gardanne, France

VII. Pemanfaatan Residu Bauksit

Sepanjang sejarah produksi alumina, telah ada keinginan untuk memanfaatkan residu bauksit yang timbul akibat proses Bayer baik dengan memanfaatkan produk tambahan dari proses tersebut ataupun dengan langsung menggunakannya. Paten asli Karl Josef Bayer pada tahun 1887 didalam hal pengolahan bauksit untuk menghasilkan aluminium hidroksida membuat rujukan atas penggunaannya dalam produksi besi. Paten pertamanya melibatkan proses kalsinasi bauksit sebagai langkah pertama, sementara pada paten berikutnya di tahun 1892 dia merujuk kepada penggunaan soda kaustik sebagai ekstraktan (bahan pengikat). Namun ketika biaya penyimpanan, pemulihan, rehabilitasi dan pemantauan naik, ruang lahan menjadi satu penentu utama, (dan metode pembuangan ke laut secara bertahap dilarang penggunaannya), maka dorongan untuk memanfaatkan sebanyak mungkin residu bauksit kian menguat.

Ratusan paten telah dikeluarkan dan ribuan percobaan telah dilakukan untuk berbagai penggunaan, beberapa aplikasi tersebut telah dikomersialisasikan tetapi upaya mempertemukan tonase residu yang terus meningkat setiap tahunnya dengan aplikasi komersial yang cocok, merupakan dan akan terus menjadi satu tantangan utama. Dalam banyak kasus kemungkinan penggunaan residu berkaitan dengan upaya mengganti bahan baku lain yang juga murah sehingga meskipun konsepnya secara teknis layak namun dari sisi biaya dan risiko penggunaan residu bauksitnya tidak dapat diterima. Adalah sangat penting untuk mempertimbangkan semua komponen biaya: biaya berjalan untuk pemeliharaan lokasi, keamanan, implikasi K3L (Kesehatan, Keselamatan Kerja dan Lingkungan), risiko atas masalah-masalah yang berlangsung menyangkut penyimpanan, rehabilitasi dan pemantauan terhadap lokasi-lokasi yang telah ditutup juga harus diperhitungkan ketika mempertimbangkan kelayakan dari aplikasi-aplikasi tertentu.

Departemen pada Kementerian Perindustrian dan Informasi China menerbitkan “rencana lima tahun penggunaan serbaguna secara ruah limbah padat industri” (yang kedua belas dari jenisnya) pada tanggal 5 Januari 2012. Kementerian ini telah menetapkan satu laju pemanfaatan secara ruah limbah padat industri ini pada tingkat 50 persen. Residu bauksit termasuk didalam kategori ini dan target nasionalnya adalah 15 persen di tahun 2015 serta 20 persen pada tahun 2020. Tingkat pemanfaatan residu bauksit di China pada 2012 diperkirakan 4 persen dari 40 juta ton residu bauksit yang dihasilkan meskipun beberapa pabrik alumina mencapai angka yang jauh lebih tinggi. Sejumlah pabrik di China saat ini mengoperasikan skema pemulihan besi (iron recovery) secara signifikan.

Aplikasi

Penggunaan-penggunaan yang diusulkan masuk ke dalam beberapa kategori yang berbeda: mengekstrak beberapa komponen, seperti misalnya besi atau logam tanah jarang (rare-earth); menggunakannya sebagai sumber komponen tertentu (misalnya besi dan alumina pada semen); menggunakan material untuk karakteristik tertentu (contohnya warna); sebagai material konstruksi (misalnya batubata, ubin, blok-blok agregat, bahan pengganti kayu); atau sebagai bahan kedap air yang masal untuk menimbun TPA (tempat pembuangan akhir). Mayoritas dari paten yang diajukan terkait dengan penggunaan residu bauksit untuk konstruksi, bangunan atau industri pertanian.

Upaya yang cukup besar telah didedikasikan untuk mendapatkan aplikasi pemanfaatan residu bauksit namun sejumlah faktor kunci mempengaruhi kelayakan dan keekonomian dari penggunaannya. Pengklasifikasian sebagai bahan berbahaya atau tidak berbahaya merupakan hal yang penting bagi keekonomian dan kemungkinan pengecualian dalam aplikasi tertentu. Selain komposisi kimia, parameter lainnya yang mempengaruhi pemanfaatan dalam berbagai aplikasi adalah jenis natrium yang masih tersisa, ukuran partikel dan kadar air.

a. Penggunaan Yang Berpotensi

Area aplikasi utama yang telah dievaluasi terangkum secara singkat di bawah ini dan garis besar pekerjaan yang dilakukan juga dijelaskan.

Produksi semen

Pemanfaatan residu bauksit dalam semen Portland telah berlangsung selama lebih dari 75 tahun. Kandungan aluminium dan besi memberikan manfaat berharga untuk semen dalam hal kekuatan dan karakteristik pengerasan meskipun keberadaan ion natrium bisa menimbulkan satu masalah. Kandungan kromium dari residu bauksit, meskipun rendah, dapat menjadi satu masalah apabila menggunakan

proporsi yang terlalu tinggi.

Kandungan besi yang tinggi, pembuatan semen dengan tujuan khusus melalui peningkatan kekuatan (jika dibandingkan dengan semen Portland) telah dibuat dengan tingkat residu bauksit hingga 50 persen yang berasal dari Renukoot, India, bersama dengan bauksit dan gipsum.

Sejumlah besar residu bauksit dari pabrik alumina AdG Alumina di Distomon, Yunani, yang sebelumnya dibuang ke laut, kini ditujukan untuk industri semen lokal.

Konstruksi jalan

Jika dikeringkan, dipadatkan dan dicampur dengan satu bahan pengikat yang cocok, residu bauksit dapat menjadi bahan konstruksi jalan yang baik dan telah dipergunakan untuk membangun jalan tambang di daerah-daerah residu bauksit selama bertahun-tahun. Di bagian selatan Perancis, residu bauksit dari kilang alumina Gardanne (produknya disebut Bauxaline®) telah digunakan untuk pembangunan beberapa ruas jalan dan landasan-landasan.

Sejumlah 25 ribu meter kubik Red Sand® dari Alcoa telah digunakan didalam pembangunan jalan raya Perth - Bunbury yang dibuka pada tahun 2009. Uji coba kini tengah berlangsung di Jamaika menggunakan residu bauksit dari Ewarton oleh Jamaican National Works Agency.

Konstruksi Bendungan/Tanggul

Sifat impermeabilitas yang baik dari residu bauksit ketika dikeringkan dan dipadatkan merupakan satu keuntungan bagi pembangunan dinding bendungan atau tanggul dan digunakan didalam pembangunan kolam-kolam penampungan untuk menampung residu bauksit. Material tersebut terkadang dicampur dengan bahan limbah lainnya, seperti abu batubara (fly ash), dan kemudian ditutup dengan tanah liat untuk mengurangi masuknya air (ingress) dan meningkatkan pertumbuhan vegetatif. Praktik ini telah diadopsi secara luas di seluruh dunia.

Produksi batubata

Pencampuran dengan tanah liat, serpihan lempung (shale), pasir, dan fly ash telah diusulkan dan dievaluasi untuk pembuatan batubata oleh berbagai tim kerja dan telah dilakukan dengan menggunakan residu bauksit dari Jamaika, Sardinia, Hongaria, dan Korea. Adanya kandungan tinggi dari ion natrium akan mengurangi kemampuan tahan-lapuk dan daya tahan batubata dalam jangka panjang sehingga penggantian ion natrium dengan kalsium dapat secara signifikan memperbaiki sifat-sifatnya. Batubata telah dibuat dengan kandungan residu bauksit lebih dari 90 persen bila menggunakan suhu pembakaran 1000°C. Formulasi yang dibuat baik dengan memakai pengikat anorganik maupun organik telah berhasil diproduksi: pengikat anorganik yang digunakan meliputi batu kapur, semen, dan gipsum; dan yang organik meliputi juga PVA dan PMMA.

Agregat berbobot ringan juga telah diproduksi dengan memasukkan zat-zat yang dapat menghasilkan busa (foaming agents) ke dalam campuran yang biasanya mengandung fly ash. Sementara itu, batu-batu genteng telah diproduksi di Turki yang bahannya berasal dari residu bauksit yang dihasilkan oleh pabrik alumina Seydisehir.

Pada pertengahan tahun 1990, sebuah proyek untuk membangun satu paviliun olahraga menggunakan batubata yang terutama terbuat dari residu bauksit dilaksanakan oleh Jamaika Bauxite Institute dan Jamaican Building Research Institute dengan menggunakan residu bauksit dari Ewarton. Batubata yang dibuat dari sistem silikon berikat dan semen lumpur merah pozzolan memiliki karakteristik yang baik dan bahkan bangunannya masih digunakan hingga sekarang. Kandungan trasi bahan radioaktif yang tersisa di dalam residu bauksit memunculkan beberapa kekuatiran di Jamaika namun sebuah investigasi menunjukkan bahwa penggunaan 100 persen residu bauksit dosis setara sedikit lebih dari 2 mSv/tahun dan yang dipandang sebagai dosis yang dapat diterima. Hasil penelitian lainnya terhadap bauksit Hungaria merekomendasikan penambahan maksimal 15 persen residu bauksit guna menghindari tercapainya dosis yang melebihi 0,3 mSv/tahun.

Ameliorasi tanah

Penambahan residu bauksit pada tanah-tanah masam dan berpasir dapat bermanfaat dalam banyak hal dan banyak kegiatan dalam hal ini telah dilakukan di Australia Barat oleh Alcoa. Residu bauksit pada tingkat lebih dari 250 t/ha ditambahkan ke tanah berpasir bersama dengan 5 persen gipsum. Penambahan

tersebut ke dalam tanah, meningkatkan daya ikat (retensi) tanah terhadap air dan kemampuan pemanfaatan nutrisi. Peningkatan retensi amonium dan fosfor secara nyata diperoleh yang menunjukkan bagaimana penggunaan pupuk dapat dikurangi.

Manfaat retensi fosfat yang baik untuk residu bauksit yang sebagian dinetralkan menjadi di bawah pH 8 terbukti telah ditunjukkan dengan baik oleh Alcoa di Peel-Harvey Estuary di Australia Barat. Residu bauksit dikomersialisasikan pada tahun 1993 dengan nama Alkaloam[®] yang merupakan bahan yang terbuat dari proses karbonasi residu bauksit halus dengan karbon dioksida. Selain menjamin kuatnya adsorpsi fosfor, manfaat lainnya adalah mampu mereduksi atau mengurangi pelindian senyawa fosfor, yang berarti juga jumlah fosfor yang mengalir ke Peel Inlet dan Harvey Estuary sehingga menurunkan tingkat pertumbuhan ganggang dan matinya ikan-ikan. Alkaloam[®] juga bereaksi dalam cara yang mirip dengan kapur pertanian. Setelah pencucian, residu bauksit kasar terkarbonasi dinamakan Red Sand[®] atau Pasir Merah; material ini digunakan sebagai bahan isian umum konstruksi termasuk untuk konstruksi pondasi jalan.

Kekhawatiran timbul sehubungan dengan tingkat pelindian (leachability) logam berat dan radionuklida dari residu bauksit sehingga upaya yang signifikan telah dilakukan untuk menentukan apakah hal tersebut menjadi masalah. Semua studi riset mengindikasikan bahwa tidak ada masalah didalam tingkat pelindian logam berat atau radioaktivitas. Salah satu studi tersebut meneliti padatingkat-tingkat ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²²⁸Th, and ²²⁸U yang mungkin timbul dari residu bauksit didalam tanaman yang ditumbuhkan dan tidak terdeteksi adanya penyerapan unsur-unsur ini bahkan hingga tingkat penambahan residu bauksit sebesar 480 t/ha.

Residu dengan kandungan yang tinggi telah digunakan untuk mengolah tanah yang mengandung asam sulfat di Gladstone Port Authority dan bendungan tailing QAL, dianggap sebagai cara yang dapat diterima untuk membuang tanah sulfat masam dari kegiatan-kegiatan konstruksi.

Restorasi lahan rawa

Beberapa bagian dari wilayah Louisiana tergenang air setiap tahunnya dan mengakibatkan hilangnya tanah karena erosi sedimen; residu bauksit dari Gramercy dipandang sebagai material pengganti sedimen tersebut.

Material penutup permukaan TPA

Aplikasi lain yang memanfaatkan impermeabilitas residu bauksit bilamana dikeringkan adalah pencungkupan (capping) dari TPA (Tempat Pembuangan Akhir), terutama pada lokasi-lokasi di kota; pemanfaatan seperti ini telah banyak digunakan di daerah Marseille dengan menggunakan Bauxaline[®] dari Gardanne. Pada salah satu lokasi Gardanne, gas limbah metana yang dikeluarkan dikumpulkan di bawah lapisan penutup Bauxaline[®]. Praktik serupa telah dilakukan di Louisiana dimana residu bauksit yang telah berkurang pH-nya itu dicampur dengan tanah liat.

Produksi besi

Tingginya kadar oksida besi dari residu bauksit, hingga 60 persen, menjadikannya satu bidang yang menarik banyak kegiatan dan percobaan-percobaan. Banyak metode yang sudah diajukan dan daftar di bawah ini hanyalah sebagian kecil diantaranya:

- Produksi serbuk besi dengan mereduksikannya dengan hidrogen, karbon monoksida ataupun bahan bakar gas kota pada suhu 300-400°C;
- Pengambilan kembali besi mencapai 90 persen dengan menggunakan tanur listrik untuk memanaskan campuran residu bauksit dan batubara jenis coke pada suhu 1600-1700°C;
- Besi, aluminium dan titanium diekstraksi dari residu bauksit Jamaika dengan mengkalsinasi residu bauksit dan natrium karbonat dan kemudian melarutkan natrium aluminat dengan air – besi kemudian diambil kembali menggunakan magnetic separasi setelah dikonversi ke satu kondisi feromagnetik melalui satu proses reduksi;
- Mengisi satu tungku cerobong (shaft kiln) dari atas dengan residu bauksit dan kemudian memasukan hidrogen, amonia, dan bahan bakar gas dari bawah;
- Proses klorinasi residu bauksit dan selanjutnya ke langkah pemisahan titanium dan aluminium klorida;
- Perlakuan dengan karbon monoksida dan hidrogen pada suhu <350°C, lalu penambahan kalsium klorida dan pemanasan hingga suhu 530-600°C, perlakuan dengan air besi, titania, dan silica terpisah.

Komponen kasar dari residu bauksit, pasir oksida merah (red oxide sand) telah digunakan sebagai sumber bijih besi ketika bahan baku dengan kualitas lebih baik tidak tersedia, misalnya selama waktu perang.

Drainase asam tambang dan penyerapan logam berat

Kemampuan residu bauksit untuk bereaksi dengan logam berat, terutama dari lokasi-lokasi tambang dan pengolahan mineral telah diuji oleh sejumlah kelompok di seluruh dunia. Di Italia dengan menggunakan residu dari pabrik Eurallumina, penyerapan logam berat yang baik diperoleh dengan menetralkan material tersebut dengan air laut. Dalam beberapa formulasi, residu bauksit dicampur dengan fly ash yang mampu meningkatkan penyerapan arsenik.

Sebuah perusahaan Australia, Virotec, telah melakukan sejumlah besar pekerjaan dengan memilih menggunakan air asin (brines) daripada air laut untuk memproduksi bahan yang netralisasi sebagian, yang disebut Bauxsol®, yang memiliki karakteristik penyerapan logam berat yang baik.

Di Korea, pekerjaan membuat pellet dilakukan dengan perlakuan panas terhadap campuran residu bauksit, polypropylene, natrium metasilikat, magnesium klorida dan fly ash pada suhu 600°C memiliki sifat-sifat penyerapan logam berat yang baik khususnya untuk timah, tembaga dan kadmium.

Mencampur residu bauksit dari San Ciprian dengan gipsium ternyata menghasilkan material yang memiliki kemampuan yang baik untuk mengangkat tembaga, seng, nikel dan kadmium dari aliran-aliran limbah.

Pengilangan fosfat

Baik Bauxsol® maupun residu bauksit yang telah diperlakukan dengan asam telah terbukti efektif menghilangkan fosfat dan di Chinapenelitian-penelitian netralisasi parsial dengan menggunakan asam klorida dan kemudian dipanaskan menunjukkan terjadinya pengurangan kadar fosfor di air hingga lebih dari 99 persen. Uji coba di pabrik pengolahan limbah di Inggris menemukan bahwa kandungan fosfor pada level yang sangat rendah (<0.06mg/L) bisa dicapai dalam limbah akhir setelah penggunaan Bauxsol® dalam bentuk pelet yang bertindak sebagai penyerap fosfat; hal ini membuat air limbah tersebut memenuhi ketentuan (Habitats Directive) yang dikeluarkan oleh Uni Eropa untuk tingkat fosfor yang akan sulit diraih bila menggunakan cara-cara konvensional.

Bahan refraktori pada baja

Di Rumania terdapat 60-70 ribu ton per tahun residu bauksit dari pabrik Tulcea digunakan di lokasi setempat didalam produksi baja sebagai bahan titaniferous yang dimasukkan ke dalam tungku-tungku untuk mereduksi penggunaan ilmenite yang dibutuhkan untuk melindungi tungku refraktori terhadap pengikisan.

Aplikasi pigmen

Kandungan besi yang tinggi dan pemisahan yang jelas dari red mud telah menarik minat penggunaannya sebagai pigmen di dalam berbagai jenis material.

Penambahan beberapa persen bauksit residu yang kaya kandungan besi oksida pada batubata, 2-5 persen, telah dilakukan untuk mengurangi biaya bahan baku dan memberi warna merah yang seragam pada batubata. Penambahan kecil pada ubin pernah cukup nyata tetapi permintaan terhadap jenis ubin ini, yang semula banyak digunakan untuk kusen jendela dan lantai, kini telah menyusut jauh.

Residu bauksit telah digunakan sebagai pigmen di dalam plastik, khususnya PVC untuk pipa air limbah.

Sebuah pabrik yang beroperasi di Larne, Irlandia Utara selama bertahun-tahun memanfaatkan tungku-tungku pembakarannya setelah pabrik Bayer tidak lagi memproduksi pigmen untuk industri genteng, cat, dan plastik.

Manufaktur katalis

Tampak adanya minat yang cukup besar kepada kemampuan residu bauksit untuk menjadi katalis besi oksida dan titania yang murah, memiliki nilai luas permukaan yang tinggi, dan 'bersifat sekali pakai'. Kemampuan ini telah terkonfirmasi melalui sebuah uji coba penggunaan residu bauksit sebagai katalis untuk menekan pembentukan coke pada proses pengolahan bahan baku dengan kandungan hidro karbon yang tinggi di dalam penyulingan minyak bumi.

Uji coba lainnya telah dilakukan pula dalam hidro-deklorinasi, hidrogenasi dan pembersihan gas buang.

Pengganti kayu

Hasil yang baik telah dicapai oleh Advanced Materials and Processes Research Institute di Bhopal dengan menggunakan residu bauksit dari Nalco yang mengandung 50 persen serat alami dan resin polyester untuk membuat produk substitusi kayu untuk aplikasi-aplikasi bangunan. Produk-produk dengan kemampuan tinggi serta baik dalam hal resistensi terhadap air, kemampuan cuaca dan tahan api pun telah diperoleh.

Geopolimer

Geopolimer memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan dengan semen Portland konvensional, khususnya mengurangi produksi karbondioksida selama proses manufaktur. Pembentukan geopolimer melibatkan pelarutan jenis-jenis silika dan alumina dalam media alkali dan mempengaruhi proses polimerisasi dari satu rantai polimer $(-\text{Si-O-Al-O-})_n$. Keberadaan aluminium serta jenis-jenis silikon dengan spesies yang mengandung alkali yang tinggi dalam residu bauksit dapat membuka peluang menarik bagi pembuatan material-material konstruksi.

Ekstraksi logam tanah jarang dan logam lainnya

Pasar yang berkembang pesat dan tingginya harga unsur-unsur tertentu dari logam tanah jarang (LTJ) beberapa tahun terakhir ini telah membangkitkan kembali minat untuk melakukan ekstraksi logam-logam tersebut dari residu bauksit. Unsur-unsur logam tanah jarang atau rare-earth elements dibagi menjadi LTJ ringan seperti lanthanum, cerium, neodymium, samarium, praseodymium, promethium dan europium, dan LTJ berat seperti gadolinium, terbium, holmium, erbium, lutetium, thulium, ytterbium, dysprosium. Selain itu, terdapat dua unsur LTJ yang bukan merupakan bagian dari seri lantanida yaitu skandium dan yttrium. Residu bauksit akan bervariasi dalam komposisi unsur-unsur tersebut tetapi satu residu bauksit dari Jamaika telah ditemukan mengandung (semua nilai dalam mg/kg): skandium 135, lanthanum 500, cerium 650, neodymium 250, samarium 65, europium 15, TB 10, ytterbium 30, lutetium 5, tantalum 10.

Peluang untuk mengekstraksi LTJ dari residu bauksit Jamaika sangat besar sepanjang tahun 1980-an tetapi harganya jatuh dan skema utamanya anjlok. Jalur ekstraksi LTJ dengan tipe berbasis ekstraksi menggunakan asam untuk melepaskan sebagian besar besi dan titanium, lalu diikuti oleh ekstraksi dengan pelarut selektif terhadap larutan yang dihasilkan. VAMI, yang bekerjasama dengan Pabrik alumina Uralsk telah mengoperasikan satu jalur magneto-hidrokimia untuk mengekstrak skandium oksida dari residu bauksit di tahun 1980-an dan baru-baru ini satu rute ekstraksi asam sukses diuji-coba di pabrik alumina Bogoslovsk. Saat ini tengah berlangsung aktivitas signifikan di China dalam hal mereklamasi unsur-unsur tersebut dari re-sidu bauksit di dalam kegiatan operasi sejumlah pabrik berskala kecil. Sebuah proyek baru telah diresmikan pada awal 2013 yang merupakan proyek kerjasama antara Jamaika Bauxite Institute dan Nippon Light Metals untuk mengekstraksi LTJ dari residu bauksit di Jamaika; pembangunan satu pabrik percontohan di laboratorium Jamaika Bauxite Institute dijadualkan selesai pada pertengahan tahun 2013. Pada akhir 2012, Orbite Aluminae mengajukan paten untuk mengekstrak LTJ dari residu bauksit dan tanah liat menggunakan satu jalur atau rute ekstraksi asam klorida dan pada awal 2013 mengumumkan usaha patungannya dengan Veolia Environmental Services dengan tujuan untuk membangun satu pabrik untuk memulihkan dan mendaur ulang LTJ, serta komponen-komponen lainnya yang ditemukan di dalam residu bauksit.

Setiap LTJ memiliki kegunaan masing-masing sehingga pertumbuhannya tidak akan terjadi seragam. Sebuah pasar yang sangat besar tersedia bagi neodymium dan praseodymium didalam magnet-magnet yang sangat kuat untuk pembuatan ponsel, dll. Cerium dan lanthanum dimasukkan ke dalam mantel cuci alumina untuk katalis emisi otomatis. Terjadi peningkatan besar penggunaan scandium didalam campuran logam aluminium untuk pesawat udara. Europium dan terbium secara luas digunakan sebagai fosfor untuk layar plasma. Penggunaan utama lainnya adalah pada campuran logam untuk baterai sehingga jika mobil listrik diluncurkan maka akan ada yang bertumbuh pesat – kali ini samarium. Penggunaan LTJ pada tahun 2010 adalah 134 ribu ton; perkiraan penggunaan hingga 2015 adalah 165 ribu ton bahkan bisa lebih. Pemulihan LTJ dari residu bauksit bisa membentuk bahan yang berharga dari muatan tersebut. Produk-produk sampingan yang dibentuk sebagai hasil dari proses pemulihan asam akan sangat berbeda sifatnya dibandingkan dengan residu bauksit yang saat ini dibuang dan akan mendukung upaya untuk memulihkan komponen-komponen lain yang terkandung di dalam residu bauksit, misalnya silika yang digunakan sebagai bahan pengisi (filler) serta juga titanium dan besi yang berharga tersebut.

b. Penggunaan komersial dengan potensi yang signifikan

Banyak aplikasi di atas, meskipun secara teknik menarik serta sudah jelas layak, tidak mampu untuk memanfaatkan residu bauksit dalam jumlah signifikan. Aplikasi lain, seperti pemulihan LTJ dan scandium bisa saja sangat menarik secara ekonomi, namun kedua jenis logam ini tidak berdampak pada pengurangan residu bauksit dalam volume besar yang dihasilkan setiap tahun oleh pabrik pengolahan alumina kecuali jika dilakukan hal yang sama terhadap besi, titanium dan silikon dioksida. Hal ini bukan untuk menyatakan bahwa, untuk pabrik tertentu, kedua jenis logam ini tidak memberikan peluang untuk membantu mengurangi biaya pembuangan, namun tidak akan berdampak signifikan terhadap volume residu bauksit yang perlu ditangani oleh pabrik tersebut.

Ada beberapa kasus dimana konstituen atau sifat-sifat residu bauksit memberikan manfaat yang unik, sehingga peluang aplikasi volume besar hanya mungkin terjadi pada kasus-kasus tertentu. Mereka harus menyediakan bahan baku atau kombinasi sifat yang lebih ekonomis dibandingkan limbah atau bahan baku mentah/alami lainnya disamping tetap mempertimbangkan risiko dan kekuatiran yang ada atas penggunaan residu bauksit. Risiko yang dimaksud termasuk yang ditimbulkan oleh alkalinitas, kristal silika, konstituen logam dan radioaktivitas tingkat rendah. Alkalinitas dapat diatasi dengan netralisasi parsial atau dengan meningkatkan kualitas pengolahan dan pencucian. Para pekerja pada proyek pemanfaatan residu bauksit dalam aplikasi-aplikasi komersial tidak terpapar kristal silika, logam atau radiasi tingkat rendah pada level yang dianggap berbahaya bagi manusia, asalkan metode-metode aman untuk bekerja yang tersedia diadopsi seperti yang akan digunakan saat bekerja dengan material konvensional. Sejumlah residu bauksit mungkin tidak sesuai untuk bahan bangunan perumahan karena adanya radiasi tingkat rendah. Penting dicatat bahwa tingkat kekuatiran dapat saja tetap tinggi kendati para ahli sudah menerangkan kepada masyarakat bahwa risikonya rendah.

Tidak ada data yang telah dipublikasikan terkait volume residu bauksit yang telah dimanfaatkan setiap tahun namun IAI berencana untuk melakukan survei rutin terhadap para anggotanya di masa depan; saat ini, pemanfaatan tersebut diperkirakan sekitar 2 juta ton per tahun, namun angka ini terus bertumbuh pesat dengan adanya inisiatif-inisiatif baru, terutama di China.

Penggunaan terbesar saat ini berada pada: produksi semen, dengan perkiraan 400 ribu ton/tahun, di Yunani, Ukraina, Georgia, Moldova, Belarusia; dan pemulihan besi, khususnya di China. Pencungkupan (capping) TPA dilakukan di Perancis namun penggunaannya bervariasi dan terbatas pada radius yang relatif kecil dari pabrik alumina; penggunaannya lebih dari 100 ribu ton/tahun. Penggunaan residu bauksit dari Tulcea, Rumania untuk produk-produk refraktori sekitar 500 ribu ton/tahun. Volume yang besar telah digunakan, seringkali bersama dengan fly ash, untuk konstruksi jalan misalnya jalan raya di Perancis tetapi terdapat volume besar yang digunakan secara internal di dalam pabrik alumina/area pembuangan residu untuk konstruksi jalan dan bendungan/tanggul. Ameliorasi tanah terhadap tanah-tanah masam dan berpasir menawarkan banyak peluang seperti halnya pemulihan terhadap sejumlah komponen tertentu, seperti besi dan titanium, dari residu bauksit dan kemudian menghasilkan limbah yang tidak berbahaya yang dapat digunakan sebagai kondisioner tanah.

Potensi terbesar penggunaan di masa depan diprediksi sebagai berikut:

- Ameliorasi tanah;
- Produksi semen;
- pemulihan besi;
- restorasi TPA;
- pembangunan jalan;
- Bahan bangunan, kemungkinan besar tidak sebagai komponen utama tetapi sebagai fraksi yang cukup besar untuk memastikan bahwa semua ketakutan tentang radioaktivitas mereda.

Kuantitas yang cukup besar juga dapat digunakan dalam pelapisan refraktori dan ameliorasi TPA yang terkontaminasi atau bekas tambang tua. Industri alumina hendaknya mempertimbangkan upaya untuk bekerjasama dengan perusahaan lain atau lembaga-lembaga penelitian, mungkin juga dengan dukungan pemerintah untuk mempercepat adopsi beberapa aplikasi ini. Dalam hampir semua kasus, pabrik-pabrik tidak akan bersaing satu sama lain karena pemanfaatan tersebut hanya akan berada dalam jarak beberapa ratus kilometer saja dari masing-masing pabrik. Salah satu manfaat terbesar dari peningkatan utilisasi residu bauksit dari red mud adalah kontribusinya yang signifikan didalam meningkatkan keberlanjutan industri aluminium/alumina.

VIII. Pemulihan dan Rehabilitasi

Hambatan yang paling penting untuk remediasi, penggunaan kembali dan keberlanjutan jangka panjang dari manajemen residu bauksit adalah alkalinitasnya yang tinggi. Melanjutkan penelitian tentang penurunan/remediasi pH residu saat ini didanai oleh International Aluminium Institute di bawah koordinasi dari IAI Bauxite & Alumina Committee (BAC) dan Alumina Technical Panel (ATP).

Pekerjaan di bidang remediasi lapangan telah berlangsung selama beberapa waktu pada kegiatan-kegiatan kolaboratif maupun upaya-upaya penelitian yang dilakukan masing-masing perusahaan. Proyek AMIRA International P1038 yang baru saja selesai dilaksanakan merupakan satu kajian pustaka yang bertujuan untuk mengidentifikasi, dengan menggunakan pustaka umum yang tersedia, cara-cara yang dimungkinkan dimana remediasi insitu dari residu bauksit bisa dilakukan dan khususnya untuk menentukan tujuan-tujuan yang spesifik bagi industri didalam konteks jalur-jalur penelitian yang paling menjanjikan hasilnya. Ulasan ini mengusulkan bahwa jalur yang paling menjanjikan untuk rehabilitasi insitu adalah bioremediasi berdasarkan strategi-strategi yang dikembangkan bagi tanah salin-sodik, dengan fokus pada peningkatan teknik-teknik rehabilitasi permukaan.

Menindaklanjuti hasil satu tinjauan terhadap proyek AMIRA P1038, Dewan IAI telah menerima rekomendasi dari BAC/ATP untuk mendanai penelitian lanjutan yang dilakukan oleh School of Earth and Environment di University of Western Australia dalam hal pemulihan insitu dari residu bauksit. Pekerjaan yang telah dimulai oleh School of Earth and Environment (dimana posisi professor didanai oleh Alcoa dan BHP Billiton) tersebut sudah berjalan ke arah sini. Secara keseluruhan proyek ini bertujuan mengatasi kebutuhan untuk pengembangan metode-metode untuk memodifikasi residu yang sudah ada tersimpan saat ini melalui kombinasi netralisasi dan konkresi, tanpa adanya gangguan besar terhadap keseluruhan masa residu tersebut, dengan maksud untuk meningkatkan stabilitas kimia dan fisiknya dalam jangka panjang. Hal ini dapat dicapai dengan cara pelindian yang dipercepat, ameliorasi biologis alami sebagai satu perpanjangan dari rehabilitasi permukaan, atau pun reaksi-reaksi konkresi jika cukup dapat diketahui tentang sifat-sifat kimia dan geomekanik dari endapan yang tersimpan.



Dokumentasi foto dari pertumbuhan sebagian dari vegetasi di atas residu bauksit di Linden, Guyana: a) Batas tajam antara bagian yang tertutup rerumputan dan semak-semak serta residu tandus dalam area penyimpanan residu bauksit yang lebih tua (perhatikan bahwa pepohonan hijau pekat di belakang rerumputan adalah vegetasi asli di luar area deposit residu); b) Detail dari vegetasi menunjukkan pohon jambu biji berdaun lebar (*Psidium guajava*) dan tanaman menjalar seperti semanggi (kanan bawah) di dalam padang yang padat rerumputan; c) Profil menunjukkan tanah pucuk coklat, berpasir dan mengandung humus di atas residu bauksit yang mengandung liat; d) Sejumpt rumput yang terisolasi dan tetap tumbuh di luar pinggiran vegetasi.

Studi kasus: “Dari merah ke hijau dalam sepuluh tahun – remediasi residu bauksit di Jamaika”⁽³⁾

Alcan (sekarang Rio Tinto Alcan) memiliki sejarah panjang di Jamaika, membangun pabrik alumina pertama (Kirkvine) di sana pada tahun 1952, dan kedua pada tahun 1959, di Ewarton. Pada tahun 2001 Alcan menjual tambang bauksit dan pabrik alumina di Jamaika tetapi tetap menjaga tanggung jawab terhadap lokasi-lokasi residu bauksit dengan maksud memulihkan secara aman lokasi tersebut hingga mencapai standar yang disepakati dan menyerahkan kepemilikan kepada pemerintah Jamaika. Tujuan yang disepakati adalah penggunaan area secara maksimum untuk tumbuhnya keanekaragaman hayati daripada untuk perumahan ataupun pertanian.

Kirkvine

Sekitar tiga belas kolam red mud perlu ditutup: enam diklasifikasikan sebagai kolam-kolam ‘terbuka’ dan tidak ada upaya restorasi dilakukan, satu diantaranya telah direstorasi sebagian dan sisa tujuh lainnya diklasifikasikan sebagai kolam ‘tertutup’ dan telah direstorasi baik atau secara alamiah telah ditumbuhi kembali oleh berbagai vegetasi. Selain itu, ada pula satu tempat penyimpanan asbestos dan kuvuran beton untuk penyimpanan oksalat yang perlu di remediasi.

Di Kirkvine, residu bauksit (konsentrasi khasnya 47% Fe₂O₃, 16% Al₂O₃, 7% CaO, 6% TiO₂, 4% SiO₂, 3% Na₂O, 2% P₂O₅, dan 14% hilang pijar yang dikenal dengan nama LOI (loss of ignition)) telah ditimbun di dalam cekungan-cekungan hasil penambangan bauksit. Ketika ditimbun, residu tersebut memiliki kandungan padatan sekitar 20 persen tetapi ia dikeringkan dengan cara yang pada kebanyakan kasus, ketika telah penuh dan berumur, tidak ada lagi air kolam yang tersisa yang mengakibatkan permukaannya menjadi relatif kering dan pH sekitar 11.

Uji Coba Kolam 6 Kirkvine

Pada tahun 1996, uji coba dilakukan pada kolam 4 hektar ini dimana pembuangan red mud baru saja dihentikan. Empat plot besar, 30 m x 18 m, dan 16 petak kecil, 2 m x 2 m diperlakukan dengan berbagai dosis gipsum dan pupuk. Red mud kering dibajak 2 kali hingga kedalaman 15 cm guna memecah permukaan dan kemudian dilalui dengan dozer D6 untuk memecah lebih lanjut gumpalan-gumpalan besarnya. Target akhir adalah campuran dari ukuran 2-5 cm dengan bahan halus diantara keduanya untuk membantu proses perkecambahan. Diyakini bahwa adanya material kasar akan memastikan permeabilitas yang baik dan meminimalkan pelepasan natrium yang terperangkap. Gipsum yang digunakan memiliki analisis berikut: kalsium sulfat 46%, anhidrit 47%, silika 3,7%, magnesium 0,8%, pH 7,8.

Keempat plot besar dicampurkan dengan muatan gipsum sebanyak 10, 20, 40 dan 60 t/ha sementara plot yang lebih kecil dicampurkan dengan gipsum sebanyak 40, 60, 80 dan 100 t/ha.

Daya hantar atau konduktivitas listrik pada tanah tersebut menunjukkan bahwa walaupun ada penurunan substansial terhadap nilai pH ketika tingkat perlakuan dinaikkan dari 10 ke 20 t/ha, namun hanya ada sedikit perbaikan ketika tingkat perlakuan dinaikkan menjadi 40 t/ha dan nyaris tidak ada peningkatan ketika perlakuan dinaikkan menjadi 60 t/ha.

Sekitar lebih dari setahun setelah gipsum itu disebarkan ke plot-plot besar, kotoran unggas ditaburkan pada tingkat dosis 4 t/ha pada setengah plot dan 2 t/ha pada setengah lainnya; amonium sulfat ditaburkan pada tingkat 0,062 t/ha. Tiga bulan kemudian, penanaman benih dengan menggunakan tangan dilakukan dengan campuran benih sebagai berikut:

Cynodon dactylon (Bermuda Grass) 21 kg/ha
Brachiaria decumbens (Brachiaria) 31 kg/ha
Leucaena leucocephala (Leucaena or Lead Tree) 10 kg/ha
Ricinus communis (Castor Bean) 4 kg/ha
Haematoxylum campechianum (Logwood) 1 kg/ha

Kirkvine pond 6, 2005 (atas);
Kirkvine pond 6, 2011 (bawah)

Bermuda Grass dipilih sebagai spesies utama berdasarkan pH dan nilai konduktivitas listrik dan berdasarkan pengalaman sebelumnya di Aljam. Brachiaria decumbens telah digunakan sebelumnya untuk merehabilitasi lahan yang material bauksitnya telah ditambang habis dan juga digunakan sebagai pembanding. Pohon-pohon Logwood telah ada tumbuh mengelilingi area tersebut dan beberapa benih

yang terbawa angin sudah tampak berkecambah. Biji Bermuda Grass yang bentuknya lebih padat, berkecambah jauh lebih cepat daripada Brachiaria tetapi meskipun perkecambahan lambat, dalam waktu tiga bulan Brachiaria telah tumbuh hingga ketinggian 0,6 m dengan kedalaman akar 0,1 m. Bermuda Grass tumbuh produktif dengan tinggi sekitar 0,2 m dan panjang akar 0,1 m. Logwood, Castor Bean dan Leucaena semuanya tumbuh hingga sekitar 0,12 m dalam jangka waktu yang sama tetapi daun-daun Leucaena menguning (chlorotic).

Pada tahun 2004 sebuah penelitian yang dilakukan oleh University of the West Indies terhadap perkembangan vegetatif dari lima spesies yang disemai pada tahun 1998 menunjukkan bahwa hanya Haematoxylum campechianum (Logwood) dan Leucaena leucocephala (Lead Tree) yang dapat ditemui. Kondisi ini mengejutkan karena dua tahun setelah ditanam pada tahun 1998 Bermuda Grass dilaporkan telah memiliki tingkat pertumbuhan yang sangat baik serta menjadi spesies tanaman yang paling banyak tumbuh. Selain itu, tingkat perkecambahan dan pertumbuhan Lead Tree pada waktu itu juga lambat bersamaan dengan munculnya gejala klorosis pada dedaunannya. Penelitian tahun 2004 menunjukkan setidaknya 53 spesies tanaman yang masuk kedalam 28 famili, didominasi oleh Lead Tree dan rumput Panicum maximum. Keberhasilan Lead Tree disebabkan kemampuannya melakukan fiksasi nitrogen. Selain itu, Lead Tree juga menggunakan mekanisme pelepasan benih yang memberikan keuntungan yang berbeda pada kondisi dimana tanah sudah kehabisan nitrogen dan tutupan vegetasinya rendah.

Rhizosfer atau lingkungan perakaran didalam komunitas vegetasi tampaknya saat ini dibatasi oleh kedalaman karena kedalaman maksimum dimana akar masih tumbuh adalah 1,4 m meskipun penyebaran luas permukaan didapati pada radius 0,93 m. Sayangnya, ada keprihatinan bahwa studi sebelumnya tidak meliputi beberapa tanaman yang kemudian diperbandingkan terhadap lima jenis

tumbuhan yang ditanam di dalam kolam dan juga tidak memasukkan jenis yang berkaitan dengan kolam yang ada pada lereng cekungan.



Menyusul kajian tersebut, bagian-bagian dari Kolam 6 dimana vegetasi buruk pertumbuhannya, kemudian direvitalisasi pada tahun 2005 dengan penambahan gipsum pada tingkat 40 t/ha, kotoran ayam pada 0,69 kg/m² dan disebar kembali benih-benih Brachiaria, Bonavista Bean dan Guinea Grass. Pada tahun 2011 telah

terjadi satu peningkatan drastis di dalam pertumbuhan – peningkatan yang terjadi di seluruh area. Sebuah kajian vegetasi lanjutan pada Kolam 6 yang dilakukan pada tahun 2011 mendapatkan 56 spesies, yang merupakan satu komposisi yang dapat dibandingkan dengan kondisi hutan kapur kering (dry limestone forest) di Jamaika.

Hasil dari metode bebas tanah pucuk (topsoil free) mendorong Rio Tinto Alcan untuk mengadopsi metode serupa di keenam kolam sisa yang hanya terisi oleh red mud. Alasan utama untuk menggunakan metode ini adalah sangat kurangnya ketersediaan lapisan tanah pucuk di area tersebut; adalah tidak sesuai dengan logika dari sudut pandang kelestarian untuk memanfaatkan tanah pucuk yang langka dan berkualitas untuk memulihkan lahan yang telah terkontaminasi. Tiga dari kolam-kolam ini masih meliputi area-area di bawah air yang perlu dikeringkan sebelum pengukuran profil kembali dilakukan; kedalaman maksimal, bagaimanapun, adalah <2m. Proses ini dilakukan secara berurutan pada kolam-kolam itu sehingga pelajaran atas temuan dari kolam pertama dapat diterapkan pada kolam-kolam berikutnya.



Rekomendasi Pelaksanaan Tindakan Yang Terbaik

Faktor-faktor yang harus dipertimbangkan ketika merencanakan penutupan, penghentian operasi dan rehabilitasi satu fasilitas penyimpanan residu bauksit adalah:

- * lingkungan dan iklim di mana fasilitas penyimpanan residu berada;
- * penggunaan lahan pasca-penutupan;
- * stabilitas bentang lahan jangka panjang, termasuk stabilitas geoteknik dan erosi;
- * mengelola limpasan permukaan dan pengolahan, dan kebutuhan akan satu jalur pembuangan air pasca penutupan tambang (closure spillway);
- * rembesan jangka panjang air yang berpotensi terkontaminasi terhadap lingkungan;
- * potensi pembentukan debu sebelum dan setelah rehabilitasi;
- * perlakuan permukaan dan vegetasi pada lapisan puncak fasilitas penyimpanan residu;
- * pembuatan profil, perlakuan permukaan dan vegetasi dari undakan lereng luar;
- * penggunaan lahan pasca-penutupan tambang, misalnya dipulihkan kembali bagi habitat flora asli, pemanfaatan maksimum untuk keanekaragaman hayati, tanaman produktif dan rekreasi;
- * jika dianggap perlu, pengumpulan dan perlakuan air lindi atau leachate (misalnya, netralisasi, pembangunan lahan-lahan rawa);
- * pengujian dan pemantauan yang sedang berjalan atas rezim air permukaan dan air tanah demi memenuhi aturan-aturan yang dipersyaratkan;
- * manajemen, pengamanan dan kontrol atas lokasi-lokasi ketika kilang tidak ada lagi.

Rencana

- * tetapkan rencana penutupan dengan masukan dari masyarakat;
- * biaya-biaya penutupan diidentifikasi dan dialokasikan;
- * pemilik atau penanggung jawab rencana penutupan jelas diidentifikasi;
- * tetapkan proses pelibatan masyarakat.

Biaya

- * perlu dipertimbangkan residu sebagai satu sumber daya potensial; baik untuk penggunaan langsung seperti ameliorasi tanah, pencungkupan lahan atau land capping, dan penggunaan-penggunaan untuk lokasi-lokasi residu yang sudah ditutup;
- * transparansi akuntansi terhadap sumber-sumber daya yang diperlukan untuk kegiatan penutupan sehingga bisa diimplementasikan rezim biaya murah terbaik yang berkelanjutan.

Pendidikan

- * Interaksi dengan para penentu kebijakan – kerap tidak memiliki pengalaman terkait residu bauksit, sehingga mungkin mereka perlu diberikan penyuluhan tentang itu;
- * pendidikan kimia/lingkungan bagi masyarakat luas;
- * Menyoroti contoh-contoh keberhasilan dari fasilitas-fasilitas yang sudah ditutup.

Komposisi Residu

- * memulihkan sebanyak mungkin natrium;
- * daftarkan semua unsur; dimana dimungkinkan konversi menjadi bentuk yang tidak berbahaya.

IX. Penelitian terbaru pada residu bauksit

a. Metode-metode pengkajian pelindian

Sebuah laporan perihal metode-metode pengkajian pelindian (leaching) untuk pembuangan dan penggunaan residu bauksit disusun oleh HA Van Der Sloot dan D.S. Kosson pada tahun 2010 melalui satu proyek konsultasi untuk IAI. Tujuannya adalah untuk membangun pengetahuan lebih lanjut dan pemahaman tentang isu keberlanjutan di dalam segmen bauksit-alumina dari industri aluminium

Kendala-kendala utama lingkungan adalah pelepasan-pelepasan melalui air, dan pengangkutan setelahnya serta potensi dampak akibat pelindian. Tujuan dari laporan ini adalah untuk meninjau status saat ini, pemahaman dan pendekatan untuk penilaian pencucian yang dapat memfasilitasi perbaikan didalam penggunaan dan pembuangan residu bauksit, dengan memberikan penekanan atas teknik-teknik pengkajian yang baru muncul di Uni Eropa dan Amerika Serikat.

Berikut ini adalah rekomendasi untuk industri aluminium yang merupakan hasil dari tinjauan ini:

- Membuat satu program karakterisasi pelindian dasar untuk residu bauksit yang diproduksi di fasilitas-fasilitas yang berbeda. Hal ini akan memungkinkan perbandingan dan pemahaman akan kesamaan dan perbedaan di antara para produsen residu bauksit dan memberikan landasan untuk memperbaiki perlakuan, penggunaan dan pembuangan serta pengendalian mutu. Karakterisasi pelindian dasar mencakup ketergantungan pH, perkolasi, dan pengujian perpindahan massa. Pengujian tambahan harus mencakup sifat-sifat fisik yang cukup untuk memahami kinerja geoteknik dan hidrolik.
- Membangun satu basis data umum perihal pelindian dan sifat-sifat terkait yang bisa dihubungkan dengan persamaan dan perbedaan didalam proses-proses produksi residu bauksit, sumber-sumbernya dan skenario-skenario pengelolaannya. Basisdata ini juga mencakup observasi lapangan terhadap air pori dan air lindian dari skenario pengelolaan residu bauksit yang mewakili. Satu basisdata Leach XS yang akan cocok untuk database seperti itu.
- Jika informasi pada studi lysimeter atau data lapangan baik pada TPA maupun penggunaan yang bermanfaat tersedia, data hasil observasi tersebut harus dievaluasi sesuai konteks dengan data uji laboratorium yang lebih luas. Jika informasi tersebut tidak tersedia atau tidak mencukupi, maka disarankan untuk mencari atau mendapatkan data uji lapangan guna memverifikasi basis bagi upaya memperkirakan kinerja jangka panjang.
- Pengalaman dapat diperoleh dari informasi di daerah-daerah lain (tanah, limbah, konstruksi), untuk memfasilitasi perkiraan pelepasan jangka panjang dari pembuangan dan pemanfaatan residu bauksit. Hal ini berkaitan dengan efek karbonasi, oksidasi, aliran prefensial, dan interaksi antar material di dalam satu campuran.
- Penetapan acuan pada pemantauan pengendalian mutu residu bauksit yang mencakup penilaian pelindian yang disederhanakan serta memenuhi kemungkinan kebutuhan penggunaan dan skenario-skenario pembuangan.
- Mengembangkan dan memvalidasi sejauh masih praktikal satu model spesiasi geokimia untuk residu bauksit Hal ini akan memudahkan evaluasi berbasis simulasi terhadap kinerja dalam kondisi penggunaan dan pembuangan yang berbeda-beda, termasuk pencampuran residu bauksit dengan bahan lain, sebelum melakukan uji konfirmasi, dan dengan demikian memungkinkan pertimbangan berbagai aplikasi yang lebih luas pada pengurangan biaya pengujian.

X. Referensi

(1) Australia/New Zealand Standard® Risk Management - AS/NZS 4360:2004

(2) Australian Government: Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry – Tailings Management (2007)

(3) Produced from a paper for ICSOBA International Seminar on Bauxite Residue 2011 by the following authors: P.A. Lyew-Ayee – Executive Director, Jamaica Bauxite Institute, S.D. Persaud – Senior Environment Officer, Jamaica Bauxite Institute, K.A. Evans – Technology Director, Specialty Aluminas, Rio Tinto Alcan, R.G. Tapp – Project Manager, HSEC, Rio Tinto

(4) H.A. Van Der Sloot (Hans van der Sloot Consultancy, Langedijk, Netherlands) and D.S. Kosson (Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, USA): Leaching Assessment Methodologies for Disposal and Use of Bauxite Residues (April 2010), research report for the International Aluminium Institute (IAI), London UK

XI. Bibliografi

Aluminum Association (2000), "Technology Roadmap for Bauxite Residue Treatment and Utilization"

Banvolgyi, G., Huan, T. M., "De-watering, disposal and utilization of red mud: state of the art and emerging technologies"

Cooling, D.J., "Improving the Sustainability of Residue Management Practice", from Paste 2007, Proceedings of the Tenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings, edited by Fourie, A. B., and Jewell, R. J.

Gray, "Engineering Properties and Dewatering Characteristics of Red Mud Tailings", (1974) University of Michigan, DRDA project 340364.

Jamaican Bauxite Institute and the University of the West Indies, "Bauxite Tailings "Red Mud", Proceedings of International Workshop Kingston, Jamaica, October 1986.

Jones, B.E. H., and Haynes, R.J., "Bauxite Processing Residue: A Critical Review of Its Formation, Properties, Storage, and Revegetation", (2011) Critical Review Environ. Sci. and Tech., (41) 271-315.

Klauber, C., Grafe, M., and Power, G., "Review of Bauxite Residue "Re-use" Options", CSIRO Document DMR-3609 (2009).

Pinnock, W.R.: "Measurement of Radioactivity in Jamaican Building Materials and Gamma Dose Equivalents in a Prototype Red Mud House", J. Health Physics, (1991), 61 (5), 647-651.

Power, G., Grafe, M., and Klauber, C., "Review of Current Bauxite Residue Management, Disposal and Storage: Practices, Engineering and Science." CSIRO Document DMR-3609 (2009).

Purnell, B.G., "Mud disposal at the Burntisland alumina plant", Light Metals (1986), 157-159.

Saxena, M., Asokan, A., "Utilisation of Bauxite Red mud in Wood Substitute Composites", ICSOBA Newsletter June 2010.

See, J., Feret, F., and Dube, P. "A Comparative Study of Analytical Methods of Trace Elements in Bauxites and Red Mud" (2010) ICSOBA.

Summers, R.N., Rivers, M.R., and Clarke, M.F., "The Use of Bauxite Residue to Control Diffuse Phosphorus Pollution in Western Australia – A Win – Win – Win Outcome" Proceedings of the Sixth International Alumina Quality Workshop (2002).

Tujuan sukarela Residu Bauksit

International Aluminium Institute (IAI)
Diadopsi pada 17 Mei 2011

Dewan Direksi IAI (atas rekomendasi dari Komite Bauksit & Alumina IAI) mengadopsi lima tujuan sukarela didalam hal pengelolaan atau manajemen residu bauksit.

Tujuan 1 – Integritas Terjamin atas Fasilitas-Fasilitas Penyimpanan Residu Yang Ada Saat Ini:

Untuk menilai kembali integritas dari seluruh fasilitas penyimpanan residu termasuk lokasi-lokasi tambang warisan masa lalu atau yang sudah ditutup – dan memastikan memadainya proses pemantauan, manajemen, dan kontrol demi menghindari insiden di masa depan;

Tujuan 2 – Penyediaan dukungan berbasis industri:

untuk terus mengidentifikasi dan menyediakan satu kumpulan pakar industri guna (a) membantu otoritas pengelolaan atas lokasi-lokasi warisan dan (b) memberi dukungan operasional kepada para pelaku industri untuk kegiatan-kegiatan tertentu jika diminta;

Tujuan 3 – Manajemen praktik terbaik:

untuk mengelola residu bauksit sesuai praktik terbaik industri (termasuk tingginya tingkat kepadatan penyimpanan/rendahnya tingkat kaustik penyimpanan dan netralisasi, jika layak), dan mencerminkan iklim lokal, geografis, peraturan, sifat residu dan kondisi lainnya;

Tujuan 4 – Penghentian pembuangan padatan residu bauksit ke laut dan lingkungan perairan:

Industri ini berkomitmen untuk menutup sejumlah kegiatan pembuangan di perairan dan laut yang masih tersisa pada tahun 2016;

Tujuan 5 – Pengembangan teknologi:

Melalui tindakan kolaboratif maupun individual, melanjutkan penelitian dan pengembangan inovatif residu bauksit menuju remediasi, rehabilitasi, penggunaan kembali, dan pilihan-pilihan penyimpanan yang tidak berbahaya pada skala industri – dan untuk menyebarluaskan hasil penelitian pada satu tingkat global.

Tujuan-tujuan Sukarela telah dimasukkan ke dalam IAI's Aluminium for Future Generations Sustainable Development Programme (AFFG). Diluncurkan pada tahun 2003 dalam kemitraan dengan asosiasi-asosiasi aluminium nasional dan regional, inisiatif AFFG ini terdiri dari tujuan sukarela dalam kinerja sosial, ekonomi, dan lingkungan meliputi semua tahapan dan daur hidup aluminium. Saat ini ada 19 tujuan sukarela dan telah disetujui oleh Direksi IAI. Kinerja industri diukur setiap tahun terhadap metrik kuantitatif atau indikator-indikator pembangunan berkelanjutan. Pekerjaan tengah dilakukan untuk lebih memperkuat kinerja industri global di lapangan dalam manajemen residu bauksit, termasuk opsi pemanfaatan/penggunaan kembali dan pemulihan/rehabilitasi dari fasilitas-fasilitas residu bauksit.