Rekayasa Pencegahan Pembentukan Air Asam Tambang dan Beberapa Hal yang Perlu Diperhatikan

M Candra Nugraha Deni

Pendahuluan

Industri pertambangan mineral dan batu bara tidak bisa dipungkiri merupakan salah satu industri yang memberikan kontribusi signifikan pada perekonomian bangsa Indonesia. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), kontribusi sektor ini mencapai Rp2.198 triliun atau 10,5 persen dari total PDB Indonesia yang sebesar Rp20.892 triliun. Selain itu, berdasarkan data dari MODI ESDM, penerimaan negara dari sektor ini adalah sebesar 142,88 triliun rupiah pada tahun 2024, dan 172,13 triliun rupiah pada tahun 2023.

Terlepas dari keuntungan ekonomi tersebut, sebagai sebuah industri ekstraktif, sudah sangat jelas pertambangan memiliki potensi dampak negatif pada lingkungan hidup. Perubahan bentang alam karena pembukaan lahan, penggalian, penimbunan batuan, dan kegiatan pendukung lainnya selanjutnya memberikan dampak pada pola aliran dan kualitas air permukaan dan air tanah; kondisi tanah, flora, dan fauna; kualitas udara; dan lainnya. Selain itu, kegiatan pertambangan juga akan menghasilkan limbah B3 dan/atau limbah non-B3. Tidak saja pada masa tambang beroperasi, dampak pada lingkungan akan tetap ada meskipun tambang sudah tidak beroperasi atau pasca tambang, apabila tidak dilakukan pengelolaan lingkungan yang baik dan benar sesuai dengan peraturan, syarat, kaidah, panduan, dan petunjuk lainnya (Nugraha C, 2019).

Salah satu masalah penting yang menjadi perhatian pada setiap kegiatan pertambangan adalah mengenai pembentukan air asam tambang (AAT). Air bersifat asam ini sebenarnya bisa juga terjadi pada kegiatan lain selain pertambangan, seperti penggalian untuk pembangunan fondasi bangunan, pembangunan jalan, dan sebagainya. Namun karena jumlahnya yang relatif lebih besar terjadi di tambang, maka air asam dari pertambangan menjadi lebih umum dianggap sebagai masalah lingkungan.

AAT terbentuk karena teroksidasinya mineral sulfida yang terkandung dalam batuan oleh oksigen di udara bebas dan air melalui serangkaian reaksi kimia secara alami. Pada kegiatan penambangan di mana terjadi pemberaian batuan penutup (*overburden*) atau batuan sisa (*waste rock*) secara masif, potensi pembentukan AAT pada batuan yang memiliki kandungan mineral sulfida tinggi akan semakin meningkat. Air yang bersifat asam selanjutnya dapat meningkatkan kelarutan logam yang terkandung pada batuan. Jika air asam ini timbul atau mengalir di area reklamasi lahan bekas tambang, kandungan logam yang ada dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman di area tersebut.

Pembentukan AAT sulit untuk dihentikan dan dapat berlangsung untuk jangka waktu yang sangat lama, bahkan dapat melampaui umur tambang itu sendiri. Artinya, meskipun tambang telah selesai beroperasi atau pasca tambang, pembentukan AAT masih dapat terus berlangsung, seperti yang terjadi di area Iberian Pyrite Belt Spanyol (Nieto JM *et al.,* 2007) atau di tambang batu bara di Shanxi Cina (Wang Z *et al.,* 2020).

AAT yang keluar dari area pertambangan dan mengalir ke badan air seperti sungai akan mengakibatkan pengasaman air sungai serta pelarutan logam yang pada tingkat tertentu dapat mempengaruhi kualitas air dan peruntukannya sebagai bahan baku air minum, sebagai habitat biota air, sebagai sumber air untuk perkebunan, dsb.

Permasalahan AAT sebenarnya telah lama menjadi subjek penelitian dan penerapan hasil penelitiannya, baik oleh perusahaan, peneliti, akademisi, dan juga pemerintah. Telah banyak publikasi dalam bentuk buku, jurnal, maupun paparan secara verbal terkait topik ini. Namun demikian, seiring dengan perkembangan pengetahuan, ilmu, dan teknologi, tetap perlu dilakukan peningkatan pemahaman dan penerapan praktik terbaik yang ditekankan pada upaya pencegahan pembentukan AAT.

Tulisan ini membahas prinsip-prinsip penting dalam upaya pencegahan pembentukan AAT dengan fokus pada tempat penimbunan batuan (*overburden/waste rock*), termasuk upaya pemanfaatan limbah dari kegiatan lain untuk pencegahan pembentukan AAT.

Pembentuk Air Asam Tambang pada Partikel dan Timbunan Batuan

Air asam tambang (AAT) atau dalam dunia pertambangan dikenal sebagai *acid mine drainage* (AMD), *acid rock drainage* (ARD), atau *acid and metalliferous drainage* (A&MD) adalah sebuah istilah yang dipakai untuk menjelaskan tentang air rembesan dan/atau air permukaan yang memiliki sifat asam dan umumnya mengandung logam terlarut yang tinggi. Air tersebut keluar dari lokasi di mana batuan yang mengandung mineral sulfida teroksidasi oleh air dan oksigen. Artinya, lokasi pembentukan AAT dapat terjadi di area penambangan (*pit*) tambang terbuka (*surface mine*) maupun tambang bawah tanah (*underground mine*), penimbunan batuan penutup/batuan sisa (*overburden/waste rock*) termasuk area yang telah direklamasi, penimbunan sementara bijih (*ore stockpile*), penimbunan *tailing*/sisa hasil proses *heap leach* (*spent ore*), jalan angkut (*haul road*) yang dibangun dengan menggunakan *overburden/waste rock*, dan sebagainya.

Prinsip Reaksi Oksidasi Mineral Sulfida

Mineral sulfida yang umum ditemukan pada kegiatan penambangan adalah Pyrite (FeS_2). Selain itu, mineral lain yang mengandung sulfida diantaranya adalah Chalcosite (Cu_2S), Covellite (CuS), Chalcopyrite ($CuFeS_2$), Galena (PbS), Sphalerite (ZnS), Arsenopyrite (FeAsS), dan sebagainya. Oleh karena itu, parameter penting yang menandakan adanya reaksi oksidasi adalah kandungan sulfat (SO_4^{2-}) pada air yang membawa hasil oksidasi mineral mengandung sulfida.

Reaksi oksidasi pyrite/pirit adalah seperti ditunjukkan oleh reaksi kimia berikut:

$$FeS_{2(s)} + \tfrac{7}{2} O_{2(g)} + H_2O_{(l)} \rightarrow Fe^{2+}{}_{(aq)} + 2SO_4{}^{2-}{}_{(aq)} + 2H^{+}{}_{(aq)} \quad [1]$$

$$Fe^{2+}{}_{(aq)} + \tfrac{1}{4} O_{2(g)} + H^{+}{}_{(aq)} \leftrightarrow Fe^{3+}{}_{(aq)} + \tfrac{1}{2} H_2O_{(l)} \quad [2]$$

$$Fe^{3+}{}_{(aq)} + 3H_2O_{(l)} \leftrightarrow Fe(OH)_{3(s)} + 3H^{+}{}_{(aq)} \quad [3]$$

$$FeS_{2(s)} + 14Fe^{3+}{}_{(aq)} + 8H_2O_{(l)} \rightarrow 15Fe^{2+}{}_{(aq)} + 2SO_4{}^{2-}{}_{(aq)} + 16H^{+}{}_{(aq)} \quad [4]$$

$$FeS_{2(s)} + \tfrac{15}{4} O_{2(g)} + \tfrac{7}{2} H_2O_{(l)} \rightarrow Fe(OH)_{3(s)} + 2SO_4{}^{2-}{}_{(aq)} + 4H^{+}{}_{(aq)} \quad [5]$$

Reaksi 1

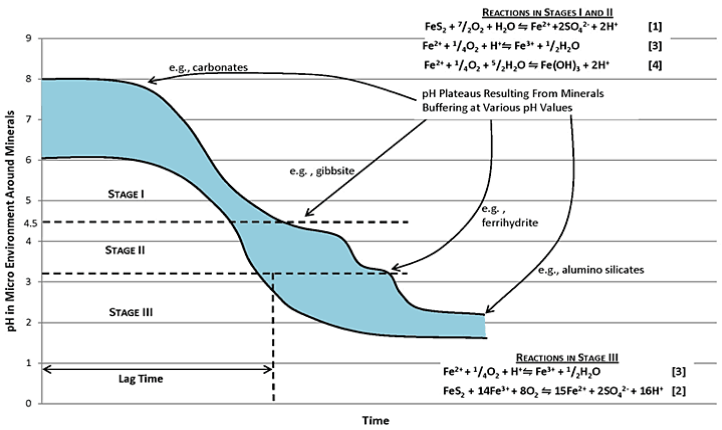
Reaksi pertama adalah proses oksidasi pirit menjadi sulfat dan *ion ferrous* (Fe^{2+}). Dari reaksi ini dihasilkan dua mol keasaman (H^+) dari setiap mol pirit yang teroksidasi. Oksigen dari atmosfer bertindak sebagai oksidan, termasuk oksigen yang terlarut dalam air meskipun jumlahnya terbatas. Selain itu, juga dihasilkan ion sulfat yang menjadi salah satu indikator penting dari pembentukan AAT.

Reaksi 2

Pada kondisi pH>4, ion ferrous (Fe^{2+}) yang dihasilkan pada reaksi (1) dapat mengalami oksidasi dan hidrolisa dan membentuk ion ferric (Fe^{3+}).

Kondisi pH>4 ini dipengaruhi oleh kandungan dan jenis mineral sulfida (sebagai pembentuk asam) dan karbonat (sebagai pembentuk basa) pada batuan. Mineral sulfida yang memiliki reaktifitas tinggi adalah pirit (FeS_2) dalam bentuk framboidal, yaitu bentuk struktur luar yang bulat atau sub-bulat, terdiri dari banyak kristal berukuran mikro yang sering kali sama ukurannya (Butler IA dan Ricka D, 2000). Sedangkan mineral karbonat yang memiliki respon cepat terhadap kondisi asam dan dapat menjaga atau menaikan nilai pH adalah calcite ($CaCO_3$), dolomite ($CaMg(CO_3)_2$), magnesite ($MgCO_3$), aragonite ($CaCO_3$ – dengan struktur kristal, berbeda dengan calcite), dan brucite ($Mg(OH)_2$). Reaksi karbonat umumnya terjadi lebih cepat pada kondisi air asam dibandingkan dengan air netral, terutama karena lebih banyak ion hidrogen (H+) yang bereaksi dengan ion karbonat (CO_3^{2-}) untuk membentuk ion bikarbonat (HCO_3^-) (Nordstrom DK, 2017). Pelarutan mineral karbonat melepaskan kalsium, magnesium, mangan, besi, dan kation lain yang hadir sebagai substitusi larutan padat atau sebagai pengotor, dan meningkatkan alkalinitas air (Blowes DW et all., 2003). Alkalinitas yang tinggi juga akan membantu mengontrol pertumbuhan bakteri yang bekerja mempercepat reaksi oksidasi. Selain mineral karbonat, mineral lain seperti gibbsite, ferrihydite, dan alumnino silicates juga dapat berperan menciptakan kondisi pH>4 namun dengan kemampuannya yang lebih rendah. Rentang pengaruh mineral untuk menjaga nilai pH adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pada kondisi pH>4, reaksi [2] tidak akan terjadi dan akan menghentikan reaksi [4], atau dengan kata lain, pembentukan AAT hanya berlangsung sesaat atau tidak terjadi sama-sekali karena adanya reaksi penetralan.

Secara total, keberadaan mineral sulfida dan mineral karbonat pada batuan akan menentukan klasifikasi batuan tersebut, yang umumnya dibagi menjadi 2 (dua) yaitu *Non Acid Forming* (NAF) atau tidak memiliki potensi pembentuk asam, dan *Potentially Acid Forming* (PAF) atau memiliki potensi pembentuk asam (Amira International, 2002).



Gambar 1. Pengaruh mineral alkali pada nilai pH lingkungan pembentukan air asam tambang (Sumber: Dold, 2017)

Penetapan klasifikasi tersebut dilakukan melalui pengujian laboratorium yang dikenal dengan uji geokimia statik. Ada beberapa pengujian yang umum digunakan untuk menentukan klasifikasi potensi pembentukan asam dari batuan. Selain mengacu pada standar dari Amira International (2002), salah satu standar acuan yang bisa digunakan adalah SNI 6597.2021 tentang Uji Karakteristik Batuan Untuk Penentuan Potensi Pembentukan Air Asam Tambang. Beberapa penjelasan tambahan terkait prosedur pengujian tersebut adalah sebagai berikut:

- Pengujian dilakukan terhadap sampel dengan ukuran <75 µm atau lolos saringan ukuran 200 mesh.
- Pada pengujian pH pasta atau *paste pH*, perbandingan sampel

batuan dan air adalah 1 : 2. Penggunaan air (H_2O) dimaksudkan untuk mengetahui potensi pembentukan AAT dibawah kondisi alami/natural, yang hasilnya dapat dibandingkan dengan hasil uji NAG test yang menggunakan hidrogen peroksida (H_2O_2). Prinsip dari uji NAG test adalah 'oksidasi yang dipercepat' dengan menggunakan oksigen tambahan yang berasal dari H_2O_2.

- *Nett acid producing potential* (NAPP) dihitung sebagai hasil pengurangan nilai *maximum potential acidity* (MPA) oleh nilai *acid neutralizing capacity* (ANC), (NAPP= MPA – ANC), dalam satuan kg H_2SO_4/ton batuan.
- Perhitungan nilai MPA berdasarkan kandungan sulfur, dan sulfur pada batuan dapat berbentuk sebagai mineral sulfur-sulfida (misalnya pyrite, chalcopyrite, dll.), mineral sulfate (misalnya gypsum – $CaSO_4$, jarosite - $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$, dll.), sulfur organik (misalnya kerogen). Sulfur-sulfida adalah sulfur yang berkorelasi langsung dengan pembentukan AAT, sehingga perlu diketahui kandungannya agar perhitungan potensi AAT bisa lebih tepat. Jika kandungan sulfur-sulfida tidak bisa didapatkan (karena memerlukan alat uji yang lebih kompleks), dapat digunakan nilai Total Sulfur (Total S) yang berasal dari pengujian dengan X-Ray Fluoresence (XRF), metode LECO, atau metode Eschka (SNI 13-3481-1994). Perhitungan dengan nilai Total Sulfur tentunya dapat menghasilkan nilai MPA yang lebih tinggi dibandingkan dengan sulfur-sulfida karena nilai Total Sulfur berasal dari keseluruhan kandungan sulfur, bukan hanya sulfur-sulfida. Namun demikian, untuk kehati-hatian, perhitungan potensi pembentukan asam dengan lebih nilai besar akan lebih baik.

  Nilai MPA (dalam satuan kg H_2SO_4/ton batuan) dihitung dengan rumus perhitungan 30,6 x kandungan sulfur (dalam satuan %). Nilai 30,6 berasal dari perhitungan stoikiometri reaksi FeS_2 menghasilkan H_2SO_4, di mana 1 mol sulfur (32 gram) akan menghasilkan 1 mol H_2SO_4 (98 gram). Artinya, 1 gram sulfur akan menghasilkan 3,06 gram H_2SO_4, Sehingga untuk 1 ton batuan, jika

mengandung 1% sulfur (yang berarti mengandung 10 kg sulfur) dan akan menghasilkan 30,6 kg H_2SO_4/ton batuan.

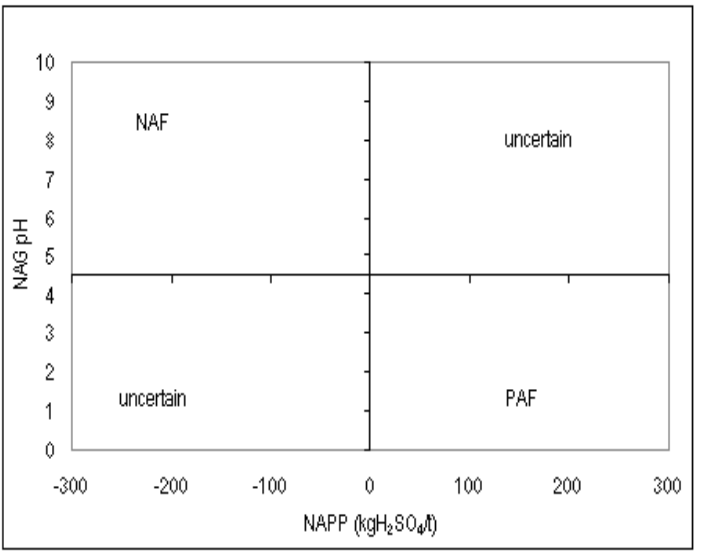
- Pengujian ANC diawali dengan *Fizz Rating Test*, yaitu pengujian untuk melihat/mengobservasi reaktivitas dari sampel terhadap asam klorida (HCl) yang ditambahkan. Semakin tinggi kandungan penetral, semakin terlihat reaktivitasnya terhadap penambahan asam. Pengujian ini dapat bersifat subjektif dengan hasil pengamatan yang bisa berbeda untuk setiap orang. Oleh karena itu, pengujian ini perlu pengalaman atau pengulangan untuk menentukan hasil yang relatif akurat. Namun demikian, karena *Fizz Rating Test* ini bertujuan untuk mengetahui acuan awal konsentrasi dan volume HCl yang akan digunakan pada pengujian ANC, kesalahan pengamatan tidak bersifat mutlak karena kesalahan ini tidak akan mempengaruhi perhitungan akhir nilai ANC. Nilai ANC dihitung berdasarkan volume dan molaritas HCl dan NaOH yang digunakan, sebagaimana dijelaskan pada prosedur yang tersedia.
- Pada beberapa pengujian, hasil perhitungan akhir ANC dapat bernilai negatif. Ini berarti bahwa sampel yang diuji bersifat konsumtif terhadap basa yang ditambahkan, atau dengan kata lain sampel tersebut bersifat asam. Keasaman ini telah direpresentasikan oleh nilai MPA, sehingga dalam perhitungan NAPP, nilai negatif ini dianggap 0 (nol) untuk menghindari perhitungan ganda yang dapat menambah nilai NAPP.
- Pada uji NAG *test*, kondisi eksotermis (mengeluarkan panas) sering kali teridentifikasi secara nyata/langsung melalui peningkatan temperatur atau terjadinya pergolakan larutan setelah penambahan larutan H_2O_2 pada sampel batuan. Kondisi ini terjadi apabila sampel batuan mengandung pirit reaktif.

  Pada kondisi sampel yang sangat reaktif, jumlah H_2O_2 yang ditambahkan pada pengujian tidak cukup untuk mengoksidasi seluruh mineral sulfida yang ada, sehingga perlu dilakukan pengujian lanjutan terhadap sampel yang sama. Pengujian ini dikenal dengan *sequential NAG test*, di mana H_2O_2 ditambahkan

kembali pada padatan yang sama dari hasil uji sebelumnya, setelah dilakukan penyaringan atau pemisahan dari cairannya.

- Nilai akhir pH dari NAG *test* berasal dari hasil reaksi penetralan yang terjadi secara bersamaan dengan pembentukan asam, sehingga nilai NAG pH dapat langsung digunakan sebagai cara untuk klasifikasi jenis batuan. Pada umumnya, jika nilai pH larutan uji (NAG pH) ≥ 4,5, sampel diklasifikasikan sebagai NAF dan jika NAG pH < 4,5 sampel diklasifikasikan sebagai PAF.
- Klasifikasi lebih komprehensif dilakukan dengan menggunakan nilai dari NAPP dan NAG test, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Apabila nilai NAG pH ≥ 4,5 dan NAPP≤0, maka sampel diklasifikasikan sebagai NAF dan apabila nilai NAG pH<4,5 dan NAPP>0, sampel diklasifikasikan sebagai PAF. Jika terdapat sampel yang berada pada area '*uncertain*', maka investigasi lebih lanjut harus dilakukan, diantaranya melalui analisa hasil uji mineralogi XRD (X-Ray Diffraction) dan/atau XRF (X-Ray Fluoresence).

Selain pengujian dan penetapan klasifikasi seperti tersebut diatas, pada prakteknya perusahaan dapat menetapkan pengujian dan klasifikasi lain. Sebagai contoh adalah dengan menggunakan nilai Rinse pH (sejenis dengan uji Paste pH namun menggunakan sampel dengan ukuran <2 mm atau lolos saringan ukuran 10 mesh), kandungan sulfur-sulfida (SxS), kandungan mineral karbonat, dan sebagainya. Hal ini tentunya dapat dilakukan setelah melakukan kajian dan menetapkan target dari pencegahan atau pengurangan pembentukan AAT.



NAF: NAG pH ≥ 4.5; NAPP ≤ 0

PAF: NAG pH < 4.5; NAPP > 0

Gambar 2. Klasifikasi jenis NAF dan PAF berdasarkan nilai NAG pH dan NAPP

Reaksi 3

Pada kondisi dimana pH lingkungan reaksi diatas 4 (pH>4), Fe^{3+} bereaksi dengan air dan mengendap sebagai ferric hydroxide – $Fe(OH)_3$. Endapan ini memiliki warna merah kecoklatan (dikenal dengan istilah "*yellow-boy*") dan sering terlihat di lokasi reaksi atau pada saluran yang menerima aliran air hasil reaksi, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Gambar 3. Penampakan ferric hydroxide (*yellow-boy*) pada saluran yang dilalui aliran air asam tambang (Sumber: im.mining.com)

Reaksi 4

Pada kondisi di mana pH<4, ion ferric Fe^{3+} dari reaksi [2] mengoksidasi pirit. Reaksi oksidasi ini lebih cepat (2-3 kali) dibandingkan dengan oksidasi dengan oksigen (reaksi 1), dan menghasilkan keasaman yang lebih banyak per mol pirit. Namun reaksi ini terbatas pada jumlah ion ferric yang tersedia, yang jumlahnya ditentukan oleh kondisi pH.

Reaksi 5

Reaksi [5] adalah total dari keseluruhan reaksi [1] sampai [4].

Berdasarkan rangkaian reaksi di atas, oksidasi pirit dimulai dengan reaksi [1] yang hanya memerlukan sedikit oksigen. Jika terdapat mineral penetral dan nilai pH menjadi pH>4, reaksi oksidasi oleh Fe^{3+} tidak akan terjadi, dan H^+ yang dihasilkan dapat juga dinetralkan. Kelarutan/kemampuan reaksi mineral karbonat akan tinggi jika bereaksi dengan asam. Reaksi asam-basa dapat menghasilkan garam $CaSO_4$ (gypsum) yang dapat mengendap dan mengisi ruang kosong antar batuan, mengurangi luas permukaan reaktif, dan sekaligus 'menyelimuti' mineral sulfida.

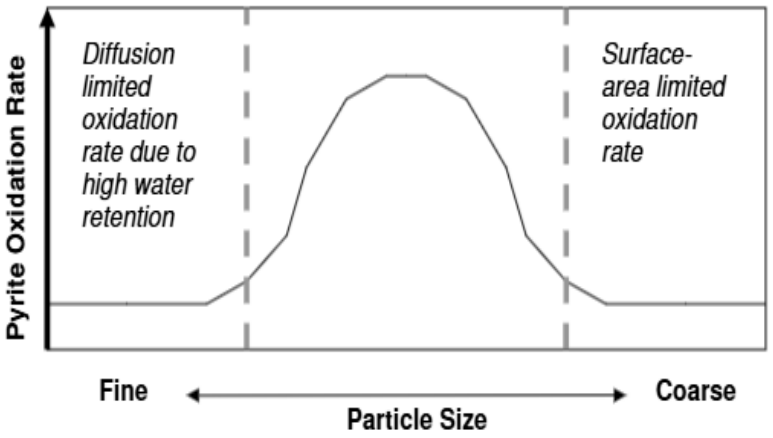
Sebaliknya, jika tidak terdapat mineral karbonat sehingga pH<4, kelarutan Fe^{3+} semakin tinggi sehingga reaksi oksidasi pyrite oleh Fe^{3+} akan terus berlanjut. Reaksi ini dapat dipercepat dengan keberadaan bakteri seperti *Acidithiobacillus ferrooxidans* yang hidup pada kondisi lingkungan yang asam.

Air asam hasil reaksi akan tinggal di tempat, kecuali ada aliran air yang membawanya keluar dari lingkungan dimana reaksi tersebut terjadi. Oleh karena itu, faktor lingkungan sekitar seperti curah hujan, sistem penyaluran air permukaan, dan laju infiltrasi air akan mempengaruhi proses pengaliran air asam keluar dari timbunan sebagai lokasi reaksi oksidasi.

Faktor Pembentukan AAT pada Timbunan Batuan

Timbunan batuan merupakan satu kesatuan sistem yang dapat dipandang berbeda dengan partikel batuan secara individu dalam hal besaran potensi pembentukan AAT. Untuk volume batuan yang sama, total luas permukaan reaktif batuan dalam bentuk partikel halus (*fine particle*) akan lebih besar dibanding dengan partikel kasar (*coarse particle*), sehingga potensi pembentukan AAT partikel halus akan lebih

besar dibandingkan dengan partikel kasar. Namun demikian, apabila batuan tersebut ditempatkan dalam satu ruang tempat penimbunan, ruang untuk partikel batuan yang halus akan lebih padat dibandingkan dengan partikel kasar, karena ruang/pori antar partikel halus lebih kecil dibanding partikel kasar. Kepadatan ini akan mempengaruhi total volume ruang/pori yang dapat terisi oleh air dan/atau udara. Pada kondisi di mana ruang ini terisi oleh air dan menjadi jenuh (*saturated*), kemampuan oksigen masuk ke dalam timbunan akan rendah sehingga oksidasi pembentukan AAT menjadi rendah. Sebaliknya, pada timbunan partikel kasar, meskipun total volume ruang/pori antar batuan lebih besar dibanding partikel halus, namun total luas permukaan reaktif lebih kecil sehingga potensi oksidasi pembentukan AAT juga menjadi rendah. Dengan demikian, oksidasi yang optimal terjadi pada kondisi gabungan ketika ruang/pori antar partikel dan total luas permukaan reaktif partikel berada pada kondisi yang optimal juga. Ilustrasi dari kondisi tersebut di atas adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

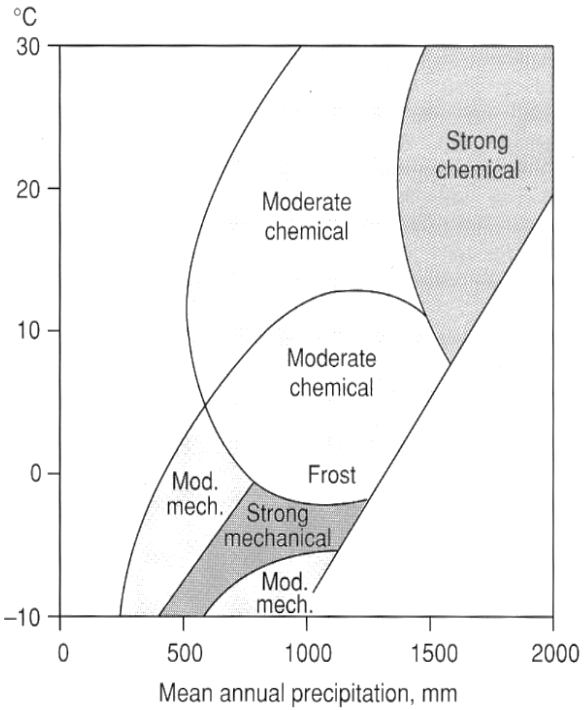


Gambar 4. Pengaruh ukuran partikel pada kecepatan reaksi oksidasi pembentukan AAT

Selain faktor fisik di atas, pada kondisi terjadi penetralan asam oleh basa, hidrolisis, atau pelindian mineral lain (*chemical weathering*) pada timbunan, akan terbentuk garam atau mineral sekunder (*secondary mineral*) yang dapat 'menyelimuti' permukaan partikel batuan (*micro-encapsulation*) dan juga mengisi ruang/pori antar partikel batuan pada timbunan tersebut.

Perubahan fisik dan kimia batuan sangat mungkin terjadi dengan dukungan kondisi iklim di Indonesia. Dengan curah hujan 1.000 hingga 5.000 mm/tahun dan temperatur diatas 20 °C, pelapukan secara kimia (*chemical weathering*) memegang peran penting (tingkat *moderate* dan *strong chemical weathering*), seperti ditunjukkan pada Gambar 5, yang selanjutnya dapat mempengaruhi struktur fisik dari timbunan batuan. Proses yang terjadi pada pelapukan secara kimia diantaranya adalah hidrolisis, pelarutan/desorpsi, oksidasi, dan netralisasi. Pelarutan dan oksidasi sulfida serta pelarutan dan netralisasi oleh karbonat menghasilkan perubahan mineralogi pada timbunan batuan sepanjang waktu.

Studi yang dilakukan oleh penulis pada tahun 2019 menyimpulkan bahwa kondisi basah dan kering pada timbunan batuan PAF di pertambangan batu bara di Kalimantan Timur akibat pengaruh hujan dan temperatur yang tinggi dapat menyebabkan terjadinya pelapukan batuan yang cepat dan mempengaruhi tingkat kepadatan lapisan permukaan timbunan. Kondisi ini kemudian mempengaruhi jumlah air dan oksigen yang masuk ke dalam timbunan, menyebabkan reaksi oksidasi cenderung hanya terjadi di lapisan permukaan, dan, teridentifikasi adanya mineral gypsum ($CaSO_4$) sebagai hasil dari reaksi asam-basa. Hasil pengujian geokimia menunjukkan batuan masih bersifat PAF setelah ditimbun selama 10 tahun (Nugraha *et al.,* 2009).



Gambar 5. Jenis pelapukan berdasarkan curah hujan dan temperatur (Sumber: Peltier, 1950 dalam Smithson *et al.,* 2002)

Untuk mengetahui secara lebih detail karakteristik batuan yang dominan dan perilaku/kecenderungan laju pembentukan air asam secara jangka panjang atau untuk mengetahui perlakuan yang optimal untuk mencegah pembentukan AAT secara jangka panjang, uji geokimia kinetik dilakukan dengan menggunakan kolom atau wadah lainnya sesuai kebutuhan. Pengujian ini juga dilakukan untuk memvalidasi hasil analisis dari uji statik.

Uji geokimia kinetik dilakukan di laboratorium dengan menggunakan kolom dari keramik (*buchner funnel*), pipa akrilik, atau sejenisnya, atau di lapangan dengan menggunakan drum plastik, IBC (*industrial bulk container*), pipa, atau wadah lainnya, seperti

ditunjukkan contohnya pada Gambar 6. Batuan uji ditempatkan pada kolom tersebut, dan kondisi basah dan kering diterapkan terhadap batuan pada kolom. Di laboratorium, kondisi basah-kering dilakukan dengan penyiraman dan pemanasan secara bergantian. Beberapa metode juga memberikan asupan oksigen pada kolom tersebut untuk mengetahui laju konsumsi oksigen dalam proses oksidasi dan pengaruhnya terhadap pembentukan air asam. Sedangkan untuk pengujian di lapangan, kondisi basah dan kering terjadi secara alami sesuai dengan kejadian hujan – panas saat pengujian.

Air yang keluar dari dasar kolom, sebagai air yang dipengaruhi reaksi oksidasi material di atasnya, dikumpulkan untuk dianalisis secara berkala. Pengukuran volume air juga dilakukan untuk mengetahui laju infiltrasi air pada lapisan batuan. Untuk mendapatkan hasil yang representatif, durasi pengujian lapangan meliputi 2 (dua) musim yang berbeda atau sampai nilai kuantitas (volume) dan kualitas air (nilai parameter pH dan logam) yang keluar dari kolom dalam kondisi stabil atau konstan.

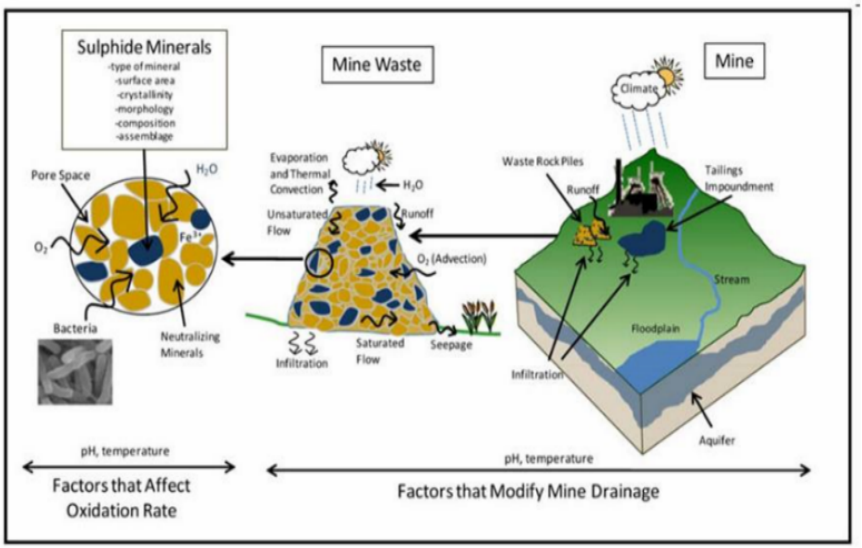
Bisa dikatakan bahwa uji kinetik adalah simulasi proses fisik dan kimia yang terjadi pada timbunan, yang prosedurnya disesuaikan untuk mendapatkan informasi yang diperlukan, dalam jangka waktu yang tidak terlalu lama. Rancangan kolom, ukuran batuan, komposisi PAF, NAF atau material lain, teknik penempatan (per lapisan batuan/*layering* atau campuran batuan/*blending*), perlakuan pemadatan, dll., merupakan beberapa batasan pengujian yang sangat penting untuk diperhatikan dan disesuaikan dengan tujuan pengujian.

(a)

(b)

Gambar 6. Contoh uji kinetik dengan *column test* di laboratorium (a) dan lapangan (b) (Sumber: koleksi pribadi)

Berdasarkan penjelasan di atas, maka proses pembentukan AAT pada skala partikel (mikro), pada timbunan (makro), dan proses pelepasan AAT ke lingkungan dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Proses reaksi oksidasi di timbunan hingga pelepasan AAT ke lingkungan (Sumber: GARDGuide Chapter 2)

Rekayasa Pencegahan Pembentukan Air Asam

Seperti dijelaskan sebelumnya, upaya pencegahan pembentukan AAT harus dilakukan dengan memperhatikan berbagai aspek yang terkait dengan reaksi partikel dan proses yang terjadi pada timbunan. Dengan memahami konsep tersebut, pelaksanaan rekayasa dapat dilakukan dengan lebih terstruktur sesuai dengan tujuannya. Pencegahan pembentukan AAT merupakan upaya yang paling optimal dengan banyak pilihan metode rekayasa yang akan diterapkan dan biaya yang lebih dapat diperkirakan, dibandingkan dengan upaya pengolahan AAT yang telah terbentuk.

Pencegahan pembentukan air asam adalah gabungan faktor fisik dan geokimia (Hamanaka A *et al.,* 2024). Berdasarkan prinsip-prinsip reaksi kimia dan proses fisik dan kimia pada timbunan, beberapa hal yang dapat dilakukan pada praktik pertambangan untuk mencegah pembentukan air asam, berdasarkan urutan reaksi kimia yang terjadi, adalah sebagai berikut:

Acuan Reaksi 1 – reaksi awal mineral sulfida dengan oksigen dan udara

- Reaksi awal pembentukan air asam hanya memerlukan sedikit oksigen, dan hal ini tidak bisa dihindari untuk terjadi pada awal kegiatan pemindahan dan/atau penimbunan batuan. Oleh karena itu, perlu ada antisipasi terhadap aliran air asam hasil oksidasi ke lingkungan melalui saluran pengaliran dan pengolahan yang memadai. Pengolahan air asam dapat dilakukan pada kolam-kolam tambang atau unit IPAL secara khusus. Salah satu acuan yang dapat digunakan adalah SNI 7742:2021 tentang Pengelolaan Air Asam Tambang. Selain itu, juga bisa dilakukan dengan metode lahan basah buatan (*wetland*). Salah satu acuan pembentukan *wetland* adalah PermenLHK No. 5 tahun 2022 tentang Pengolahan Air Limbah Bagi Usaha Dan/Atau Kegiatan Pertambangan Dengan Menggunakan Metode Lahan Basah Buatan. Perlu diingat bahwa

tidak berlaku pendekatan "*one size fits all*". Setiap tambang unik dan memerlukan pertimbangan berbeda dalam menentukan strategi pengelolaan air asam.

- Pencegahan reaksi oksidasi lebih lanjut pada batuan di tempat penimbunan dilakukan dengan menghindari penempatan PAF yang dapat secara langsung kontak dengan oksigen dan/atau air. Hal ini dilakukan dengan menempatkan PAF pada bagian bawah dari tempat penimbunan. Praktik pelaksanaan kegiatan ini dapat mengacu pada SNI diantaranya adalah SNI 7742:2021 tentang Pengelolaan Air Asam Tambang, SNI 7082:2022 tentang Tata Cara Penimbunan Batuan Penutup Untuk Pencegahan Pembentukan Air Asam Tambang Pada Kegiatan Tambang Terbuka Batubara, dan SNI 9117:2022 tentang Tata Cara Penimbunan Batuan Penutup Untuk Pencegahan Pembentukan Air Asam Tambang Pada Kegiatan Tambang Terbuka Mineral Logam.
- Pencegahan masuknya oksigen dan/atau air pada timbunan dapat dilakukan melalui beberapa rekayasa dengan prinsip menjaga kepadatan yang mempengaruhi kejenuhan/saturasi yang maksimal dari lapisan timbunan. Konduktivitas hidrolik (kh) yang dipersyaratkan untuk teknik ini adalah sebesar $\pm 10^{-9}$ meter/detik atau menggunakan bahan sintetik yang kedap yang ditempatkan menutupi material PAF. Nilai konduktivitas hidrolik yang rendah ini juga mempengaruhi jumlah air yang masuk ke dalam timbunan untuk melarutkan atau membawa air asam hasil reaksi oksidasi keluar dari sistem timbunan. Pemadatan batuan atau material lain sebagai lapisan penutup di timbunan dapat dilakukan dengan menggunakan unit pemadat (*compactor*) seperti penggilas getar (*vibrating pad foot roller*), penggilas getar kaki kambing (*sheepfoot vibrating roller compactor*), atau dengan penggilas getar berpermukaan halus (*smooth drum vibrating roller compactor*).
- Untuk mengoptimalkan penutupan batuan PAF, penimbunan secara bertingkat dari bawah ke atas akan lebih baik dibandingkan dengan penimbunan langsung dari atas (*free dump*). Praktek ini akan

menciptakan beberapa lapisan penutup yang dapat menurunkan masuknya oksigen dan air pada timbunan.

- Oksidasi mineral sulfida adalah reaksi eksotermik, artinya reaksi yang menghasilkan panas, dan pada timbunan bisa mencapai temperatur hampir 70 °C. Kenaikan temperatur ini menyebabkan pergerakan udara bebas masuk ke timbunan, dikenal dengan istilah konveksi oksigen (*oxygen convection*) yang jumlahnya lebih signifikan dibandingkan dengan difusi oksigen. Difusi oksigen adalah pergerakan oksigen yang disebabkan oleh menurunnya konsentrasi oksigen pada timbunan tersebut karena digunakan dalam proses oksidasi. Difusi umumnya terbatas pada permukaan yang lebih dangkal dibanding dengan konveksi yang bisa lebih dalam. Kedua mekanisme pergerakan udara ini sangat dipengaruhi oleh reaktifitas dari material dan juga permeabilitas lapisan timbunan.
- Teknik lain adalah penempatan batuan di bawah permukaan air, dikenal sebagai sistem penutupan basah (*wet cover system*). Pada kedalaman air lk. 4 meter dengan kondisi air yang tenang (tidak terjadi pergolakan/turbulensi), difusi oksigen pada lapisan air tidak terjadi. *Wet cover system* umumnya dilakukan pada penimbunan di lubang bekas tambang yang pada lapisan atasnya dibiarkan tergenang, dan pada akhirnya akan ditujukan sebagai *void*/kolam bekas lubang tambang.

Acuan Reaksi 1 – membentuk kondisi pH>4

Pada kondisi awal, timbunan material belum stabil secara fisik dan kimia sehingga reaksi oksidasi dan penetralan air asam (apabila terdapat mineral karbonat) akan terjadi secara masif. Air asam masih sangat mungkin terjadi dan dapat terbawa keluar dari timbunan. Namun seiring dengan waktu, terjadi pelapukan fisik dan kimia, termasuk habisnya mineral karbonat karena bereaksi dengan asam, sehingga mempengaruhi proses oksidasi dan aliran air asam yang

keluar dari timbunan. Keberadaan mineral karbonat akan sangat penting pada proses awal ini, oleh karena itu penambahan mineral karbonat seperti kapur pada batuan asam dapat membantu menetralkan atau mempertahankan pH>4. Pembentukan garam dan mineral sekunder lainnya dapat mengisi ruang/pori antar partikel batuan yang kemudian dapat menurunkan nilai konduktivitas hidrolik.

Acuan reaksi 2 – pembentukan Fe^{3+}

Sebagaimana disebutkan di atas, Fe^{3+} tidak akan terbentuk apabila kondisi pH>4, yang tercipta oleh keberadaan mineral karbonat, baik yang berasal dari batuan atau melalui penambahan secara khusus.

Acuan reaksi 3 – pembentukan $Fe(OH)_3$

$Fe(OH)_3$ yang terbentuk akan mengendap pada lapisan timbunan. Endapan ini, bersama dengan mineral sekunder lainnya, dapat mengisi ruang/pori antara partikel batuan dan menyelimuti permukaan batuan dan menghentikan atau mengurangi reaksi oksidasi. Kondisi yang sama terjadi pada proses pengolahan air asam dengan teknik saluran terbuka dengan lapisan batu kapur (*open limestone channel*) di mana permukaan batu kapur menjadi tidak efektif untuk menetralkan keasaman setelah lapisan permukaannya tertutup oleh endapan $Fe(OH)_3$.

Acuan reaksi 4 – oksidasi pirit oleh Fe^{3+}

Seperti dijelaskan sebelumnya, oksidasi pirit oleh Fe^{3+} akan menghasilkan lebih banyak keasaman dibanding reaksi oksidasi pirit oleh oksigen. Jika terjadi oksidasi ini, maka pengelolaan penting yang harus dilakukan adalah mengurangi hasil oksidasi ini terbawa aliran air keluar dari timbunan. Terkait tata kelola air, paling tidak terdapat 3 (tiga) hal yang penting dilakukan untuk mengurangi reaksi oksidasi dan/atau mengalirkan hasil oksidasi, yaitu: 1). Pengalihan air permukaan yang mengalir menuju timbunan; 2). Pengalihan air permukaan pada

timbunan untuk mengurangi rembesan/infiltrasi air ke dalam tanah yang selanjutnya dapat merembes ke lapisan batuan PAF, dan 3). Pengolahan air asam apabila telah terbentuk dan mengalir keluar dari timbunan.

Pencegahan Pembentukan Air Asam dengan Pemanfaatan Limbah

Upaya pencegahan pembentukan AAT telah banyak dilakukan oleh industri pertambangan di Indonesia, sebagai penerapan dari konsep yang dijelaskan diatas. Berbagai inovasi telah dan terus dilakukan, termasuk pemanfaatan limbah. Limbah adalah suatu sisa dari proses atau kegiatan yang dianggap tidak memiliki nilai, baik secara ekonomi maupun nilai lainnya seperti kemanfaatan untuk upaya pengelolaan lingkungan.

Salah satu inovasi dalam upaya untuk pencegahan pembentukan AAT yang juga sekaligus sebagai upaya pemanfaatan limbah adalah dengan menggunakan abu terbang/*fly ash* (FA) dan/atau abu endap/abu dasar/bottom *ash* (BA) yang dikategorikan sebagai Limbah nonB3, dan *tailing* yang dikategorikan sebagai Limbah B3. Beberapa penelitian telah dilakukan bertujuan untuk mengetahui potensi pemanfaatan FA/BA dan *tailing* sebagai material untuk mencegah pembentukan AAT dari *overburden* atau *waste rock*. FA/BA telah digunakan di beberapa tambang batu bara untuk pencegahan pembentukan AAT, seperti di PT Guguk Tinggi Coal dan PT Kaltim Prima Coal (Nugraha C & Rolliyah, 2021) atau percobaan lapangan lainnya (Ginting JK *et al.,* 2012; Ginting JK *et al.,* 2013; Pirdiansy Q *et al.,* 2024), atau percobaan laboratorium lainnya (Deni MCN *et al.,* 2020), uji laboratorium untuk pencegahan pembentukan AAT dari tailing (Deni MCN, Kurniasari T, 2023), dan digunakan sebagai pengolah air asam (Gitari *et al.,* 2016).

Upaya pencegahan pembentukan AAT dengan memanfaatkan limbah tersebut dapat difokuskan pada 2 (dua) metode, yaitu:

1. Metode *layering* dengan fokus pada pembentukan lapisan dengan tujuan untuk mencegah masuknya air dan/atau udara
2. Metode *micro-encapsulation* dengan fokus pada partikel batuan yang ada pada lapisan timbunan batuan, dengan tujuan untuk:
    - menyelimuti sulfida agar tidak bereaksi,
    - menetralkan hasil reaksi yang telah terjadi, atau
    - mengisi ruang/pori antar partikel dengan garam hasil reaksi.

Pemanfaatan limbah FA/BA

Abu terbang/*fly ash* (FA) adalah abu sisa pembakaran batubara yang keluar dari tungku pembakar batubara bersama aliran gas buang, sedangkan abu endap/abu dasar/*bottom ash* (BA) adalah abu sisa pembakaran batu bara yang jatuh ke bagian dasar tungku pembakar batubara.

FA/BA yang berasal dari PLTU dikategorikan sebagai limbah nonB3 dengan kode N106 untuk FA dan N107 untuk BA, berdasarkan PP No. 22 tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup – Lampiran XIV. Selanjutnya, tata kelola FA/BA sebagai limbah nonB3 mengacu pada PermenLHK No. 19 tahun 2021 tentang Tata Cara Pengelolaan Limbah Non Bahan Berbahaya Dan Beracun, termasuk upaya pemanfaatannya.

Secara umum, FA/BA dapat dimanfaatkan sebagai material yang secara fisik berfungsi sebagai penghalang oksigen (*oxygen barrier*) dan/atau secara kimia berfungsi sebagai penetral. Hal ini berarti bahwa FA/BA harus memenuhi syarat sebagai berikut:

- Fungsi fisik (penutup) artinya FA/BA diberlakukan sama halnya dengan *overburden* atau *waste rock* bersifat NAF atau tanah liat yang

ditempatkan diatas PAF. Lapisan FA/BA harus memiliki nilai konduktivitas hidraulik minimal 10^{-5} cm/detik berdasarkan hasil pengujian.

- Fungsi kimia (penetral) artinya FA/BA harus memiliki kapasitas sebagai penetral dilihat dari nilai ANC.

Saat ini telah tersedia standar acuan yang dapat digunakan untuk kegiatan pemanfaatan FA/BA yaitu SNI 9264-2024 tentang Pemanfaatan *Fly Ash* dan/atau *Bottom Ash* Sebagai Bahan Pelapis Material *Potentially Acid Forming* Untuk Mencegah Pembentukan Air Asam Tambang Pada Kegiatan Tambang Terbuka. Standar tersebut disusun dengan mempertimbangkan kajian-kajian yang telah dilakukan oleh perusahaan, seperti yang dilakukan di PT Adaro Indonesia, PT Kaltim Prima Coal, PT Bukit Asam, dan sebagainya.

Selain mengacu pada standar tersebut, perusahaan dapat mengembangkan teknik atau metode pemanfaatan lain sesuai dengan kebutuhan. Untuk dapat memanfaatkan FA/BA, perusahaan diharuskan menyusun kajian terkait pemanfaatan, disusun sebagai Dokumen Rincian Teknis (DRT) dengan susunan mengacu pada Lampiran VIII PermenLHK No. 19 tahun 2021 tentang Tata Cara Pengelolaan Limbah Nonbahan Berbahaya Dan Beracun.

Beberapa hal penting yang harus menjadi perhatian dalam upaya pemanfaatan FA/BA adalah sebagai berikut:

- Ketersediaan penetral pada FA/BA sangat dipengaruhi oleh kualitas batubara yang dibakar di PLTU, proses pembakaran, dan penanganan FA/BA yang dihasilkan.
- Pada beberapa PLTU, proses pembakaran kadang ditambahkan kapur untuk mengurangi kandungan SO_2 pada emisi yang dihasilkan. Kelebihan kapur ini sering kali menciptakan kondisi alkalinitas dari FA/BA. Pengujian geokimia, sebagaimana dijelaskan di atas, diperlukan untuk mengetahui hal tersebut.

- Selain memiliki potensi alkalinitas, FA/BA juga mengandung beberapa unsur logam berat yang memungkinkan terlepas dari lapisan FA/BA dan mengalir keluar dari timbunan.
- Kualitas FA dan BA memiliki perbedaan termasuk secara fisik. FA memiliki partikel lebih halus dan mengandung mineral tanah liat (*clay*) lebih tinggi. Sedangkan BA memiliki kandungan partikel kasar lebih banyak. Pemanfaatan FA, BA, atau campuran FA dan BA harus memperhatikan aspek kualitas ini.
- FA/BA yang baru dihasilkan (*fresh* FA/BA) dapat memiliki kualitas yang berbeda dengan FA/BA yang telah lama disimpan, terutama yang disimpan di tempat terbuka sebagaimana umumnya penyimpanan FA/BA sebagai limbah nonB3. Kondisi hujan dan panas dapat mempengaruhi kualitas kimia dan fisik dari FA/BA.
- Penelitian atau uji pemanfaatan FA/BA dapat dilakukan di lapangan dengan menggunakan *field column test* atau area percobaan (*test pad*), atau dilakukan di laboratorium. Prinsip percobaan mengacu pada pengujian geokimia kinetik.
- Pemantauan terhadap air lindi yang dikeluarkan dari kolom uji atau *test pad* harus dilakukan terhadap parameter kualitas air.
- Pemanfaatan FA/BA harus memperhatikan aspek kestabilan timbunan. Analisa geoteknik secara khusus harus dilakukan untuk memastikan pemanfaatan FA/BA tidak memberikan dampak pada kestabilan timbunan.
- Pemantauan potensi dampak terhadap lingkungan harus dilakukan sesuai ketentuan, diantaranya adalah pemantauan kualitas air permukaan dan air tanah di sekitar area pemanfaatan. Pemantauan kualitas air tanah harus mewakili aliran air di hulu dan hilir area pemanfaatan, sehingga kajian hidrogeologi area pemanfaatan harus dilakukan.

Berdasarkan hasil penelitian yang tersedia, selain yang diatur dalam standar SNI, pemanfaatan FA/BA dapat dilakukan dengan fokus pada tujuan sebagai berikut:

- FA/BA sebagai material, pengganti sebagian atau seluruhnya, pembentuk lapisan penutup PAF.
- FA/BA sebagai material penetral air asam yang terbentuk, dengan penempatan FA/BA di atas atau di bawah PAF.
- FA/BA sebagai campuran material lain (*top soil*, *clay*, dll.) yang digunakan sebagai lapisan penutup PAF.

Penggunaan *Tailing*

Tailing adalah sisa hasil proses pengolahan dan/atau pemurnian bijih mineral logam. Berdasarkan PP 22 tahun 2021, *tailing* dikategorikan sebagai limbah B3 dengan kode B416. Fase awal dari *tailing* berbentuk lumpur/*slurry* dengan kandungan air lk. 80%. Namun teknologi filtrasi atau penyaringan atau *filter press* saat ini mampu mengurangi kandungan air hingga menjadi 18-20%, sehingga hasil proses ini disebut dengan *filtered-tailing* atau *dry-tailing*. Air hasil penyaringan dapat digunakan kembali pada proses atau diolah untuk dialirkan ke lingkungan.

Penggunaan *tailing* dalam upaya pencegahan pembentukan air asam dapat dilakukan dengan memanfaatkan faktor fisik dari *filtered-tailing*. *Tailing* memiliki ukuran partikel yang sangat halus sehingga dianggap dapat mengisi ruang/pori antar partikel batuan PAF. Secara fisik, pengisian ruang/pori batuan dengan partikel halus akan meningkatkan tingkat kejenuhan (saturasi), menurunkan adveksi dan difusi gas, dan selanjutnya menurunkan pembentukan AAT (Vriens B *et al.,* 2020). Timbunan batuan dengan saturasi lebih dari 85% sangat efektif sebagai penghalang difusi oksigen, sehingga pencampuran yang seragam antara *tailing* dan *waste rock* sangat dibutuhkan. Secara umum, variabel desain pencampuran harus memperhatikan distribusi

ukuran partikel (*particle size distribution* – PSD), bentuk partikel dari *waste rock* dan *tailing*, kandungan air dari *waste rock* dan *tailing*, dan perbandingan campuran *waste rock* dengan tailing (Wickland BE *et al.,* 2011).

Pengisian ruang/pori antar batuan dilakukan dengan pencampuran antara *tailing* dengan batuan (*blending*), sebelum dilakukan penimbunan campuran tersebut atau dikenal dengan istilah *co-disposal*. Pencampuran ini secara fisik dapat meningkatkan kepadatan dan mengurangi masuknya air dan oksigen pada timbunan batuan tersebut, sehingga pembentukan air asam dapat dikurangi atau dihilangkan. Secara kimia, pencampuran ini dapat membentuk selimut (*encapsulation*) bagi mineral sulfida pada batuan sehingga tidak terjadi oksidasi.

Beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam penggunaan tailing ini adalah sebagai berikut:

- *Tailing* memiliki potensi sebagai pembentuk AAT jika teroksidasi karena *tailing* dapat mengandung mineral sulfida. Oleh karena itu, *tailing* harus diolah untuk menghilangkan sifat racun (detoksifikasi) dan menciptakan nilai pH yang netral sebelum *tailing* dikeluarkan dari unit pemroses bijih (*ore processing plant*) dalam bentuk lumpur/*slurry*. Kondisi netral ini dapat membantu mencegah pembentukan AAT dari tailing sekaligus menciptakan lingkungan reaksi dengan pH>4 untuk mencegah reaksi oksidasi lanjutan. Berdasarkan hal tersebut, penggunaan *filtered-tailing* yang baru dihasilkan (*fresh filtered-tailing*) sebagai campuran *waste rock* harus menjadi pertimbangan penting karena kandungan alkalinitasnya yang masih tinggi. Selain itu, penambahan kapur (misalnya dolomit) secara khusus pada *filtered-tailing* juga perlu dilakukan untuk menjaga kestabilan kondisi netral dari *filtered-tailing*.

- Secara kimia, kapur lebih memiliki peran sebagai pencegah pembentukan AAT dibandingkan *filtered-tailing* dan *filtered-tailing* akan lebih memiliki peran sebagai pencegah pembentukan air asam berdasarkan peran fisiknya yaitu sebagai pengisi ruang/pori antar partikel batuan.
- Penentuan perbandingan berat antara kapur dan *filtered-tailing* (dalam unit berat kapur per berat *filtered-tailing*), dan perbandingan campuran kapur dan *filtered-tailing* tersebut dengan *waste rock* (dalam unit berat campuran per berat *waste rock*) harus dilakukan dengan memperhitungkan kondisi geokimia dari tailing dan *waste rock*.
- Untuk mendapatkan kondisi campuran yang seragam agar pencegahan oksidasi pembentukan air asam menjadi optimal, proses pencampuran harus dilakukan dengan metode dan peralatan yang sesuai dan telah terbukti kehandalannya untuk menciptakan campuran yang seragam.
- Apabila *tailing* (sebagai limbah B3) dicampurkan dengan material lain, dalam hal ini batuan, maka keseluruhan campuran akan dikategorikan sebagai limbah B3. Penimbunan campuran material ini (*co-disposal*) harus dilakukan pada salah satu fasilitas penimbunan limbah B3, yaitu penimbusan akhir (*landfill*) atau lubang bekas tambang (*backfill*).
- Seperti halnya pada pemanfaatan FA/BA, penggunaan tailing harus memperhatikan aspek kestabilan timbunan. Selain itu, pemantauan potensi dampak terhadap lingkungan juga harus dilakukan sesuai dengan ketentuan.
- Studi penggunaan *tailing* dapat dilakukan disesuaikan dengan kondisi spesifik dari material tersedia, termasuk fasilitas tempat penimbunannya.
- Rencana penggunaan *tailing* harus mendapatkan Persetujuan Teknis Pengelolaan Limbah B3 dari pemerintah, dalam hal ini adalah Kementerian Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian

Lingkungan Hidup (KLH/BPLH), dengan mengacu pada ketentuan yang tertuang dalam PermenLHK No. 6 tahun 2021 tentang Tata Cara Dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun.

Contoh dari kajian penggunaan *tailing* sebagai campuran yang berfungsi untuk mencegah pembentukan air asam adalah seperti yang pernah dilakukan oleh penulis di salah satu tambang emas di Indonesia. Pengujian dilakukan melalui uji geokimia statis dan kinetis berupa uji kolom lapangan. Penambahan kapur sebanyak 15 kg pada setiap ton *filtered-tailing*, yang kemudian dicampurkan dengan *waste rock* dengan perbandingan berat campuran tersebut terhadap *waste rock* sebesar 1:2, dengan penambahan perlakuan pemadatan (*compaction*) pada permukaan campuran material, memberikan hasil yang terbaik pada kualitas air yang keluar dari dasar kolom uji. Secara umum, kajian ini juga menyimpulkan bahwa faktor penting yang dapat mencegah pembentukan air asam dari *waste rock* dengan penggunaan tailing adalah kapasitas penetral dari *filtered-tailing* termasuk yang berasal dari kapur yang ditambahkan pada *filtered-tailing*, kondisi geokimia *waste rock* yang terkait dengan waktu paparan *waste rock* sebelum dilakukan pencampuran, dan perlakuan pemadatan (Deni MCN *et al.,* 2024).

Kesimpulan ini dapat dianggap sesuai dengan proses reaksi kimia yang sebelumnya dijelaskan, di mana kondisi pH>4 saat reaksi oksidasi terjadi dan ketersediaan oksigen yang terbatas akibat dari pengisian ruang/pori antar partikel oleh *tailing* yang juga dibantu oleh proses pemadatan, merupakan faktor kunci yang dapat mengurangi atau menghentikan oksidasi mineral sulfida pada *waste rock* bersifat PAF.

Pencampuran tailing dan *waste rock* juga memberikan keuntungan di mana penimbunan campuran ini dapat dilakukan pada satu lokasi (*co-disposal*), sehingga dapat mengurangi kebutuhan akan

lahan untuk timbunan. Selain itu, pencampuran partikel halus *tailing* dan partikel kasar *waste rock* menciptakan tingkat kestabilan geoteknik lebih tinggi jika dibandingkan dengan penimbunan *tailing* secara terpisah.

Penelitian terkait dengan hal tersebut diatas masih akan terus dikembangkan oleh penulis.

Penutup

Pencegahan pembentukan AAT harus memperhatikan kondisi geokimia dari batuan yang berpengaruh pada reaksi oksidasi beserta penetralan yang dapat terjadi. Pada timbunan batuan, faktor iklim (kondisi basah dan kering) dapat menciptakan pelapukan batuan secara kimia (*chemical weathering*) dan secara fisik (*physical weathering*). Kedua proses tersebut saling mempengaruhi kejadian pelapukan selanjutnya yang pada akhirnya dapat menciptakan kestabilan kondisi fisik dan kimia timbunan. Kestabilan ini pada akhirnya dapat memperlambat laju reaksi oksidasi pembentukan AAT. Dengan memperhatikan hal tersebut, upaya pencegahan pembentukan AAT dapat dilakukan dengan tepat dan optimal.

Seiring dengan kebutuhan adanya inovasi untuk optimalisasi pengelolaan *waste rock* dan limbah, beberapa penelitian telah dan terus dilakukan yang bertujuan untuk mengetahui potensi pemanfaatan limbah seperti FA/BA dan penggunaan *tailing* sebagai material untuk mencegah pembentukan AAT dari batuan bersifat PAF. Berdasarkan kajian hingga saat ini, penggunaan limbah dapat memberikan keuntungan ganda, yaitu mengurangi limbah yang harus dikelola secara terpisah dan mencegah pembentukan AAT. Namun demikian, upaya ini harus melalui kajian yang mendalam dengan memperhatikan hal-hal mendasar dari material, proses fisik dan kimia yang terjadi, faktor lingkungan, ketersediaan teknologi, dan ketersediaan sumber daya dan peralatan.

Daftar Pustaka

Amira International. (2002) *ARD Test Handbook: Prediction & Kinetic Control of Acid Mine Drainage, AMIRA P387A*. Melbourne: Ian Wark Research Institute and Environmental Geochemistry International Ltd.

Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L. and Wisener, C.G. (2003) 'The geochemistry of acid mine drainage', in Holland, H.D. and Turekian, K.K. (eds.) *Treatise on Geochemistry*, Vol. 9. Oxford: Elsevier.

Butler, I.A. and Ricka, D. (2000) 'Framboidal pyrite formation via the oxidation of iron (II) monosulfide by hydrogen sulphide', *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(15), pp. 2665–2672.

Deni, M.C.N. and Kurniasari, T. (2023) 'Utilization of fly ash and bottom ash for tailings stabilization', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1175, 012019. doi:10.1088/1755-1315/1175/1/012019.

Deni, M.C.N., Afandi, K., Sinamo, B. and Satriawan, A. (2024) 'Co-disposal as an alternative method for waste rock and tailings management – a review of geochemical aspect', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1422, 012003. doi:10.1088/1755-1315/1422/1/012003.

Deni, M.C.N., Sukandar and Pratama, Y. (2020) 'Encapsulating sulfidic coal-mine waste-rock using coal-combustion ash to prevent acid mine drainage generation – a case study', *International Conference on Green Technology and Design (ICGTD)*.

GARD Guide (2025) *The International Network for Acid Prevention*. Available at: https://www.gardguide.com/index.php?title=Main_Page (Accessed: 15 August 2025).

Ginting, J.K., Shimada, H., Nugraha, C., Hamanaka, A., Sasaoka, T., Matsui, K., Gautama, R.S. and Sulistianto, B. (2013) 'Study on co-placement of coal combustion ash–coal waste rock for minimizing acid mine drainage generation: a preliminary result of field column test experiment', *Procedia Earth and Planetary Science*, 6, pp. 251–261.

Ginting, J.K., Shimada, H., Sasaoka, T., Matsui, K., Nugraha, C., Gautama, R.S. and Sulistianto, B. (2012) 'An evaluation on the physical and chemical composition of coal combustion ash and its co-placement with coal-mine waste rock', *Journal of Environmental Protection*, 3(7). doi:10.4236/jep.2012.37071.

Gitari, W.M., Petrik, L.F. and Akinyemi, S.A. (2016) 'Treatment of acid mine drainage with coal fly ash: exploring the solution chemistry and product water quality', in *Coal Fly Ash Beneficiation - Treatment of Acid Mine Drainage with Coal Fly Ash*. IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.69741.

Hamanaka, A., Sasaoka, T., Shimada, H., Matsumoto, S., Kusuma, G.J. and Deni, M.C.N. (2024) 'Mitigation of acid mine drainage using blended waste rock in near-equatorial climates – geochemical analysis and column leaching tests', *Physchem*, 4(4), pp. 470–482. doi:10.3390/physchem4040033.

Kementerian ESDM (2024) 'Kontribusi minerba pada PDB 2023 capai Rp2.198 triliun'. Available at: https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/kontribusi-minerba-pada-pdb-2023-capai-rp2198-triliun (Accessed: 15 August 2025).

Kementerian ESDM (2025) 'Realisasi penerimaan negara'. Available at: https://modi.esdm.go.id/penerimaan-negara(Accessed: 15 August 2025).

Nieto, J.M., Sarmiento, A.M., Olías, M., Cánovas, C.R., Riba, I., Kalman, J. and Delvalls, T.A. (2007) 'Acid mine drainage pollution in the Tinto and Odiel rivers (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) and

bioavailability of the transported metals to the Huelva estuary', *Environment International*, 33(4), pp. 445–455. doi:10.1016/j.envint.2006.11.010.

Nordstrom, D.K. (2017) 'Modelling to understand a site', in *Geochemical Modeling for Mine Site Characterization and Remediation*, Vol. 4. Englewood: Society for Mining, Metallurgy & Exploration.

Nugraha, C. (2019) *Pengelolaan lingkungan pertambangan*. Jakarta: Kepak Indonesia.

Nugraha, C. and Rolliyah (2021) *Pemanfaatan fly ash dan bottom ash untuk pengelolaan batuan dan air asam di tambang batubara*. Jakarta: Direktorat Penilaian Kinerja Pengelolaan Limbah B3 dan Limbah Non B3 Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.

Nugraha, C., Shimada, H., Sasaoka, T., Ichinose, M., Matsui, K. and Manege, I. (2009) 'Geochemistry of waste rock at dumping area', *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 23, pp. 132–143.

Pirdiansy, Q., Hartanto, W.P. and Deni, M.C.N. (2024) 'Long-term evaluation of FABA utilization to prevent AMD generation – a review of barrel kinetic test', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1422, 012015. doi:10.1088/1755-1315/1422/1/012015.

Smithson, P., Addison, K. and Atkinson, K. (2002) *Fundamentals of the Physical Environment*. 3rd edn. London: Routledge.

Standar Nasional Indonesia (SNI) 7082:2022 (2022) *Tata cara penimbunan batuan penutup untuk pencegahan pembentukan air asam tambang pada kegiatan tambang terbuka batubara*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Standar Nasional Indonesia (SNI) 7742:2021 (2021) *Pengelolaan air asam tambang*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Standar Nasional Indonesia (SNI) 9117:2022 (2022) *Tata cara penimbunan batuan penutup untuk pencegahan pembentukan air asam tambang pada kegiatan tambang terbuka mineral logam*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Standar Nasional Indonesia (SNI) 9264:2024 (2024) *Pemanfaatan fly ash dan/atau bottom ash sebagai bahan pelapis material potentially acid forming untuk mencegah pembentukan air asam tambang pada kegiatan tambang terbuka*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Vriens, B., Plante, B., Seigneur, N. and Jamieson, H. (2020) 'Mine waste rock: insights for sustainable hydrogeochemical management', *Minerals*, 10(9), 728. doi:10.3390/min10090728.

Wang, Z., Xu, Y., Zhang, Z. and Zhang, Y. (2021) 'Review: Acid mine drainage (AMD) in abandoned coal mines of Shanxi, China', *Water*, 13(8). doi:10.3390/w13010008.

Wickland, B.E., Wilson, G.W., Wijewickreme, D. and Klein, B. (2011) 'Design and evaluation of mixtures of mine waste rock and tailings', *Canadian Geotechnical Journal*, 43(9), pp. 928–945. doi:10.1139/t06-058.