

SKRIPSI

**ANALISIS HUBUNGAN ANTARA PERMEABILITAS
BATUBARA TERHADAP PEMBENTUKAN
AIR ASAM TAMBANG**

Disusun dan diajukan oleh:

**TEGAR BAGAS ADITYA
D111 19 1016**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS HUBUNGAN ANTARA PERMEABILITAS BATUBARA TERHADAP PEMBENTUKAN AIR ASAM TAMBANG

Disusun dan diajukan oleh

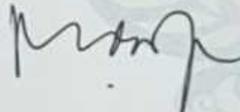
TEGAR BAGAS ADITYA
D111191016

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 7 Juni 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

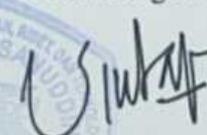
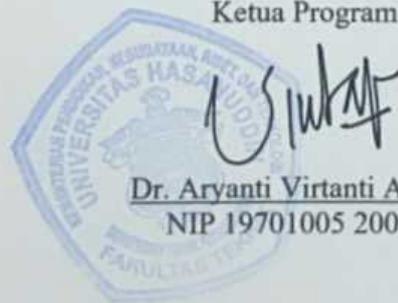
Pembimbing Pendamping,



Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, MT
NIP 19680718 199309 1 001

Asta Arjunoarwan Hatta, ST.,MT
NIP 19951126 202204 3 001

Ketua Program Studi,

Dr. Aryanti Virtanti Anas, ST.,MT
NIP 19701005 200801 2 026



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini;
Nama : Tegar Bagas Aditya
NIM : D111191016
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Analisis Hubungan Antara Permeabilitas Batubara Terhadap Pembentukan Air Asam Tambang

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri. Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, Juni 2024

Yang Menyatakan



Tegar Bagas Aditya



Optimized using
trial version
www.balesio.com

ABSTRAK

TEGAR BAGAS ADITYA. *Analisis Hubungan Antara Permeabilitas Batubara Terhadap Pembentukan Air Asam Tambang dibimbing oleh Muhammad Ramli dan Asta Arjunoarwan Hatta*

Industri pertambangan batubara pada pascaoperasi meninggalkan lubang tambang dan air asam tambang. Air Asam Tambang (AAT) dapat mengakibatkan terjadinya kerusakan/korosi bangunan-bangunan sipil dan pipa-pipa saluran air irigasi atau air minum dan air menjadi tidak layak konsumsi, mencemari dan meracuni organisme tanah termasuk vegetasi. Oleh karena itu upaya mencegah, mengurangi atau menghambat terbentuknya AAT dari material yang berpotensi menghasilkan asam menjadi sangat penting sebelum AAT tersebar ke lingkungan yang lebih luas. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh permeabilitas dan reaksi kinetik sampel terhadap pembentukan AAT. Hasil dari penelitian ini sebagai upaya remediasi AAT yang dapat dilakukan dengan mengetahui potensi pembentukan air asam tambang. Pengujian yang digunakan yaitu permeabilitas metode *constant head test* menggunakan variabel beda ketinggian 119 cm, 109 cm, 99 cm dengan hasil rata – rata nilai koefisien permeabilitas (K) stasiun 1 adalah 0,0253 cm/det, Stasiun 2 adalah 0,0044 cm/det, Stasiun 3 adalah 0,0282 cm/det, Uji kinetik metode *free draining column leach test* menggunakan variabel perbedaan siklus harian (7 hari), mingguan (1 minggu), bulanan (1 bulan) dengan selisih penurunan pH stasiun 1 adalah 4.2, stasiun 2 adalah 2.8, stasiun 3 adalah 3.2.

Kata Kunci: Batubara, Permeabilitas, Uji Kinetik, Air Asam Tambang, pH.



ABSTRACT

TEGAR BAGAS ADITYA. *analysis of the relationship between coal permeability and the formation of acid mine drainage supervised by Muhammad Ramli and Asta Arjunoarwan Hatta.*

The coal mining industry after operations leaves behind mine holes and acid mine water. Acid Mine Water (AMD) can cause damage/corrosion to civil buildings and irrigation or drinking water pipes and the water becomes unfit for consumption, pollutes and poisons soil organisms including vegetation. Therefore, efforts to prevent, reduce or inhibit the formation of AMD from materials that have the potential to produce acid are very important before AMD spreads to the wider environment. The aim of this research is to analyze the influence of permeability and kinetic reaction of the sample on the formation of AMD. The results of this research are an AMD remediation effort that can be carried out by knowing the potential for the formation of acid mine drainage. The test used is the permeability constant head test method using variable height differences of 119 cm, 109 cm, 99 cm with the results of the average value of the permeability coefficient (K) for Station 1 is 0.0253 cm/sec, Station 2 is 0.0044 cm/sec. sec, Station 3 is 0.0282 cm/sec. The kinetic test using the free draining column leach test method uses variable differences in daily (7 days), weekly (1 week), monthly (1 month) cycles with the difference in pH decrease at station 1 being 4.2, station 2 is 2.8, station 3 is 3.2.

Keywords: Coal, Permeability, Kinetic Test, Acid Mine Water, pH.



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
1.5 Ruang Lingkup.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Batubara	4
2.2 <i>Cleat</i>	11
2.3 Porositas	13
2.4 Permeabilitas	14
2.5 Permeabilitas Batubara.....	16
2.6 Uji Kinetik.....	18
2.7 Pembentukan Air Asam Tambang	21
2.8 Pencegahan AAT	27
BAB III METODE PENELITIAN.....	28
3.1 Lokasi Penelitian.....	28
3.2 Variabel Penelitian.....	28
3.3 Alat dan Bahan Penelitian.....	29
3.4 Teknik Pengumpulan Data Penelitian.....	30
3.5 Teknik Analisis	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Hasil Pengambilan Sampel Lapangan.....	39
4.2 Pengujian Laboratorium.....	39
4.3 Hasil Pengujian Laboratorium	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	53
5.1 Kesimpulan	54
5.2 Saran.....	54
DAFTAR PUSTAKA	56



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Klasifikasi batubara (Kendal <i>et al.</i> , 2010).....	10
Gambar 2 Kenampakan <i>Face cleat</i> dan <i>butt cleat</i> (Laubach <i>et.al</i> , 1998).....	12
Gambar 3 <i>Constant head</i> permeameter (Mays, 2012)	17
Gambar 4 <i>Humanity Cell</i> (Gautama, 2019)	19
Gambar 5 <i>Buchner Funnel</i> (Gautama, 2019).....	20
Gambar 6 <i>Free draining column leach test</i> (FDCLT) (Gautama, 2019)	20
Gambar 7 Lokasi pengambilan sampel penelitian	28
Gambar 8 Lokasi pengambilan sampel yang terdiri dari tiga stasiun yaitu, stasiun 1 (a), stasiun 2 (b), stasiun 3 (c).....	32
Gambar 9 Proses Pemindahan sampel uji kedalam <i>chumber</i>	33
Gambar 10 Sampel stasiun 1	33
Gambar 11 Sampel stasiun 2.....	34
Gambar 12 Sampel stasiun 3.....	34
Gambar 13 Penimbangan sampel menggunakan timbangan digital	34
Gambar 14 Rangkaian komponen untuk kegiatan pelindian (kiri) dan kegiatan menuangkan cairan ke dalam <i>chumber</i>	35
Gambar 15 Penyaringan larutan hasil pelindian	36
Gambar 16 Spektrum dasar untuk menafsirkan koefisien korelasi (Zou <i>et al.</i> , 2022).....	37
Gambar 17 Diagram alir penelitian.....	38
Gambar 18 Grafik rata rata nilai Permeabilitas (K).....	45
Gambar 19 Hasil Pengujian Kinetik Harian Sampel Stasiun 1	47
Gambar 20 Hasil Pengujian Kinetik Mingguan Sampel Stasiun 1	47
Gambar 21 Hasil Pengujian Kinetik Bulanan Sampel Stasiun 1	47
Gambar 22 Hasil Pengujian Kinetik Harian Sampel Stasiun 2.....	48
Gambar 23 Hasil Pengujian Kinetik Mingguan Sampel Stasiun 2	48
Gambar 24 Hasil Pengujian Kinetik Bulanan Sampel Stasiun 2	49
Gambar 25 Hasil Pengujian Kinetik Harian Sampel Stasiun 3.....	49
Gambar 26 Hasil Pengujian Kinetik Mingguan Sampel Stasiun 3	50
Gambar 27 Hasil Pengujian Kinetik Bulanan Sampel Stasiun 3	50
Gambar 28 Grafik Nilai Selesih Penurunan Keseluruhan pH Siklus Harian, Mingguan, Bulanan Sampel Batubara	51
Gambar 29 Grafik Korelasi <i>Pearson</i> Penurunan Nilai pH Terhadap Nilai Permeabilitas.....	52



DAFTAR TABEL

Tabel 1	Klasifikasi dan sifat batubara coklat (lignite) dan perbedaan antara “Braunkohle” dan “Steinkohle” (menurut istilah Jerman) ¹	11
Tabel 2	Hasil Analisis Kualitas Batubara Mallawa	31
Tabel 3	Analisis Permeabilitas batubara (S-01) pada setiap percobaan dengan variasi beda ketinggian	43
Tabel 4	Analisis Permeabilitas batubara (S-02) pada setiap percobaan dengan variasi beda ketinggian	44
Tabel 5	Analisis Permeabilitas batubara (S-03) pada setiap percobaan dengan variasi beda ketinggian	44
Tabel 6	Rata – rata Nilai Permeabilitas (K) pada setiap percobaan dengan variasi beda ketinggian.....	45
Tabel 7	Hasil pengujian kinetik	46
Tabel 8	Selisih Penurunan Nilai pH Terhadap Nilai Permeabilitas	51



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Lokasi Pengambilan Sampel.....	61
Lampiran B Tabel Hasil Pengujian Kinetik Metode FDCLT	63



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan yang Maha Esa atas berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Analisis Hubungan Antara Permeabilitas Batubara Menggunakan Uji Kinetik Terhadap Pembentukan Air Asam Tambang”. Sholawat serta salam senantiasa tercurah kepada Rasulullah SAW sang pemimpin dan sang revolusioner yang telah memimpin umat manusia menuju zaman yang lebih cemerlang.

Penulis mendapatkan banyak bantuan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis menyampaikan hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada, Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli., M.T. dan bapak Asta Arjunoarwan Hatta., S.T., M.T. selaku dosen Laboratorium Lingkungan Tambang Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan juga selaku Pembimbing yang telah mengarahkan penulis selama proses penyusunan tugas akhir, Ibu Dr. Aryanti Virtanti Anas, S.T, M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Keluarga, Ibu dan Bapak tercinta serta saudara-saudari tersayang yang selalu mendoakan dan memberikan semangat serta motivasi untuk penulis. Teman-teman seperjuangan, Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin angkatan 2019 (IGNEOUZ 2019), serta seluruh anggota Laboratorium Lingkungan Tambang.

Penulis menyadari terdapat banyak kekurangan dan keterbatasan sepanjang proses penelitian ini. Oleh karena itu, kritik dan saran yang konstruktif dari pembaca sangat bermanfaat bagi kesempurnaan penulisan untuk kedepannya.

Makassar, Juni 2024

Tegar Bagas Aditya



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Batubara adalah hasil akumulasi material organik yang berasal dari bekas tumbuh-tumbuhan yang telah mengalami penggabutan dan pembatubaraan serta litifikasi (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2021). Perbedaan karakteristik batubara akan mempengaruhi kualitas batubara dalam penggunaannya dalam dunia industri. Kualitas batubara sangat ditentukan oleh kebutuhan dan permintaan pasar atau industri yang menggunakannya (Arif, 2014).

Gas alam batubara adalah gas alam yang terbentuk selama proses pembatubaraan dan disimpan pada lapisan batubara dalam keadaan teradsorpsi pada permukaan internal matriks batubara. Gas metana Batubara mengandung 90 % gas metana dan 10 % gas lainnya seperti karbon dioksida dan nitrogen (Djohor dan Pramudito, 2017). Gas tersebut tersimpan pada rekahan dan sistem pori pada batubara hingga pada saat air mengubah tekanan pada reservoir. Gas tersebut sering kali terjebak pada rekahan-rekahan (*cleat*) batubara. Sistem rekahan pada batubara penting untuk dipelajari, karena permeabilitas ditentukan dari rekahan - rekahan batubara walaupun mempunyai porositas yang besar tetapi sistem rekahan ini merupakan jalan utama alamiah dari gas dan air yang dapat mempengaruhi ekonomis tidaknya suatu batubara (Ibrahim dan widhiyatna, 2017).

Air asam dapat terbentuk secara alami, sebagai akibat teroksidasi dan terlarutkannya mineral sulfida ke dalam sistem aliran air permukaan dan air tanah menyebabkan turunnya pH air. Karena tingkat keasaman dan konsentrasi logam larutnya tinggi, jika AAT mengalir ke ekosistem akuatik dapat menjadi polutan yang meracuni ikan dan organisme akuatik lainnya. Air tercemar AAT juga dapat mengakibatkan terjadinya kerusakan/korosi bangunan-bangunan sipil dan pipa-pipa saluran air irigasi atau air minum dan air menjadi tidak layak konsumsi. Jika terbentuk atau melewati ekosistem daratan (tanah), AAT dapat mencemari dan

organisme tanah, termasuk vegetasi. Oleh karena itu upaya mencegah, ngi atau menghambat terbentuknya AAT dari material yang berpotensi lkan asam menjadi sangat penting, sebelum AAT tersebar ke lingkungan



yang lebih luas. Demikian juga upaya remediasi AAT yang sudah terbentuk sangat penting untuk mengurangi tingkat kerusakan lingkungan (Fitrah, 2019).

Berdasarkan uraian diatas, penelitian dilakukan untuk mengetahui potensi pembentukan air asam tambang di Desa Tallumpanuae, Kecamatan Mallawa, Kabupaten Maros, Provinsi Sulawesi Selatan, berdasarkan nilai permeabilitas sampel batubara dan mengukur nilai pH yang dihasilkan dari uji kinetik.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Permeabilitas batubara mencerminkan kemampuan aliran fluida seperti gas batubara di lapisan batubara dan ini penting untuk simulasi dan identifikasi sistem fluida di lapisan batubara dalam pembentukan air asam tambang.
2. Air asam tambang terbentuk akibat oksidasi dan sulfidasi air permukaan dan air tanah yang menyebabkan turun nya pH air.
3. Apakah Permeabilitas batubara memiliki keterikatan terhadap pembentukan air asam tambang.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disebutkan sebelumnya, maka tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh permeabilitas batubara terhadap pembentukan air asam tambang.
2. Menganalisis hasil uji kinetik batubara dalam pembentukan air asam tambang.
3. Menganalisis hubungan antara hasil uji kinetik dengan permeabilitas batubara terhadap pembentukan air asam tambang.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian dapat membantu mengembangkan metode pengendalian yang efektif terhadap pembentukan air asam tambang. Penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi untuk mengidentifikasi tanda-tanda awal pembentukan air



asam tambang sehingga dapat dilakukan tindakan pencegahan dini. Sehingga dapat mengurangi risiko dampak negatif pada lingkungan dan masyarakat sekitar.

1.5 Ruang Lingkup

Pengambilan sampel dilakukan pada Desa Tallumpanuae, Kecamatan Mallawa, Kabupaten Maros, Provinsi Sulawesi Selatan pada tanggal 24 September 2023. Sampel batubara akan dilakukan pengujian permeabilitas untuk mendapatkan hasil permeabilitas batubara dan pengujian kinetik untuk mendapatkan nilai pH. Penelitian ini dilakukan di *Laboatoratory Based Education* (LBE) Lingkungan Tambang Program Studi Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batubara

Indonesia tercatat sebagai salah satu negara penghasil batubara terbesar di dunia. Bersama Tiongkok dan Australia, Indonesia menjadi negara yang memiliki cadangan terbukti batubara terbesar di kawasan Asia-Pasifik. Total cadangan terbukti batubara Indonesia terhadap seluruh dunia adalah 3,7%. Dari aspek produksi, pada tahun 2019 Indonesia menyumbang 9,0% produksi batubara dunia dengan konsumsi batubara hanya 2,2% terhadap konsumsi batubara dunia. Hal ini menunjukkan bahwa pemanfaatan batubara di dalam negeri untuk keperluan energi dan non-energi memiliki peluang pemanfaatan yang sangat besar di masa mendatang mengingat konsumsi batubara dalam negeri masih jauh lebih kecil dibandingkan kapasitas produksi batubara Indonesia (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2021).

Berdasarkan data Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) tahun 2020, Indonesia memiliki total sumber daya batubara sebesar 143,73 miliar ton dengan cadangan batubara mencapai 38,80 miliar ton. Sumberdaya dan cadangan batubara permukaan Indonesia sebagian besar terkonsentrasi di Sumatera dan Kalimantan. Sumber daya batubara permukaan Sumatera sebesar 56 miliar ton dan Kalimantan mencapai 92 miliar ton atau masing-masing setara dengan 38% dan 62% dari total sumber daya batubara Indonesia. Adapun cadangan batubara permukaan Sumatera dan Kalimantan masing - masing mencakup 34% dan 39% dari total cadangan batubara Indonesia dengan jumlah sebesar 12 miliar ton dan 14 miliar ton. Sebagian besar batubara Indonesia berupa batubara dengan kualitas rendah dan sedang yang memiliki nilai keekonomian lebih rendah dibandingkan batubara kalori tinggi. Program peningkatan nilai tambah atau hilirisasi batubara diharapkan mampu meningkatkan nilai keekonomian kedua jenis batubara tersebut. Tantangan

batubara ke depan memang tidaklah mudah. Saat ini batubara menghadapi tekanan terutama dari aspek isu dampak negatif terhadap lingkungan dan mendapat dukungan untuk pendanaan proyek batubara. Kedua tantangan



utama ini dapat berdampak pada turunnya pasar batubara Indonesia yang saat ini masih didominasi untuk penjualan pasar ekspor (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2021).

Pemerintah tengah mendorong kebijakan pengembangan dan pemanfaatan batubara dalam rangka meningkatkan nilai tambah batubara dalam negeri. Semangat hilirisasi batubara diharapkan mampu menciptakan keunggulan komparatif dan kompetitif batubara serta berbagai produk turunannya. Produk-produk turunan batubara diharapkan secara keekonomian mampu bersaing dengan minyak dan gas bumi sehingga bisa diandalkan untuk substitusi impor yang pada akhirnya dapat menghemat devisa negara dan meningkatkan kompetensi dalam negeri di bidang batubara (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2021).

Batubara merupakan sumber energi alternatif yang sangat berperan dalam meningkatkan laju pembangunan dan pertumbuhan ekonomi. Dengan meningkatnya harga batubara di pasar domestik maupun mancanegara pada beberapa tahun terakhir ini, maka berbagai upaya telah dilakukan oleh berbagai pihak untuk mengeksploitasi dan memanfaatkan batubara yang ada di berbagai daerah di Indonesia. Oleh karena itu produksi dan konsumsi batubara di Indonesia akan terus ditingkatkan terutama sebagai bahan bakar (Kadir, 2016).

Batubara juga merupakan bahan galian strategis dan menempati posisi yang sangat penting dalam pembangunan nasional, maka posisi batubara sebagai bahan bakar alternatif yang sangat diharapkan dapat mengantisipasi krisis energi dengan meningkatkan pemanfaatannya untuk keperluan domestic sebagai bahan bakar pada pembangkit tenaga listrik, industri maupun untuk kepentingan ekspor. Untuk keperluan ini dibutuhkan batubara yang mempunyai kualitas yang baik. Kualitas dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah pengaruh kandungan kandungan air, abu, zat terbang, karbon padat yang dapat menurunkan kualitas pada batubara (Malaidji, 2018).

Batubara merupakan batu sedimen organik yang dengan mudah dapat terbakar yang mengandung material karbon lebih dari 50 persen beratnya, coklat sampai dengan hitam terdiri dari karbon, hidrogen, nitrogen serta sulfur. Batubara terbentuk dari sisa tumbuhan yang terurai dan terkumpul di suatu daerah dengan kondisi banyak air, biasanya pada rawa-rawa (Nurlela,



2015). Batubara atau bahan bakar padat yang berwarna cokelat hingga hitam terbentuk dari akumulasi sisa-sisa tumbuh-tumbuhan yang sudah tertimbun selama berjuta-juta tahun dalam lingkungan bebas oksigen dan suasana basa yang telah mengalami perubahan fisik dan kimia karena pengaruh panas serta tekanan yang berlangsung lama. Batubara dapat juga diartikan sebagai campuran bahan mineral organik yang heterogeneous dan memiliki struktur senyawa yang sangat kompleks. Bagian utama batubara adalah bahan *organic* yang disebut maseral dan bagian lain yang terdiri atas mineral, air serta gas yang terperangkap dalam pori-pori batubara. Komponen anorganik ini merupakan kandungan mineral yang berasal dari tumbuhan asal dan sendimen organik selama proses *coalification* (pembatubaraan). Pada proses pembatubaraan, terjadi pengeluaran zat pembakar (O_2) dan air (H_2O), sehingga menyebabkan konsentrasi karbon tertambat (*fixed carbon*) dalam bahan asalnya meningkat. Air yang terkandung didalam batubara terdiri atas air bebas pada permukaannya dan air lembab yang terikat secara fisika pada bagian dalam batubara dan mempunyai tekanan uap dibawah normal (Nurlela, 2015).

Total produksi batubara Indonesia, sekitar 25% digunakan untuk kepentingan dalam negeri dan 75% diekspor ke luar negeri. Pada tahun 2012, Indonesia menjadi eksportir terbesar batubara dunia dan menjadi produsen kedua terbesar batubara di dunia. Saat ini hampir 70% produksi batubara Indonesia untuk dalam negeri dimanfaatkan oleh Perusahaan Listrik Negara sebagai bahan bakar pembangkit listrik. Sekitar 10% digunakan untuk pembuatan semen. Sisanya digunakan untuk bahan bakar industri atau proses metalurgi. Melalui kebijakan energi nasional, pemerintah Indonesia mencanangkan peningkatan pemakaian batubara untuk kepentingan dalam negeri dan mengurangi ekspor batubara. Batubara Indonesia akan dijadikan sekitar 33% dari total energi Indonesia pada tahun 2025. Hal ini menandakan bahwa proses produksi batubara di Indonesia akan semakin marak dilakukan, namun tentunya dengan uji kualitas yang akan semakin dikembangkan (Malaidji, 2018).



terbentuknya batubara terjadi dalam 2 tahap, yaitu (Nurlela, 2015):

a. Biokimia

Tahap ini merupakan suatu tahap dimana terjadi perubahan dari tumbuhan menjadi gambut yang diakibatkan oleh bakteri dan fungi dalam air yang tergenang. Tahap penggambutan terdiri atas beberapa proses yaitu:

- 1) Penggambutan (Peatifikasi), terjadi dalam lingkungan reduksi dan adanya bakteri *anaerobic* sehingga terbentuk gambut.
- 2) *Putrefaction*, terjadi dalam air yang diam (*stagnant*), membentuk *sapropelic coal* (batubara sapropel), lalu batubara muda (*brown coal*).

b. Tahap Geokimia

Tahap ini merupakan suatu periode dimana terjadi perubahan gambut menjadi antrasit yang diakibatkan oleh tekanan dan suhu dalam waktu yang lama, seperti proses metamorfisme. Syarat terjadinya proses pembentukan batubara ini adalah pembusukan dan pemanasan terjadi pada kondisi lingkungan yang oksigennya kurang, sehingga terjadi pembakaran tidak sempurna.

Ada 2 teori yang menerangkan terjadinya batubara yaitu (PTBA, 2014):

1. Teori *In-situ*

Batubara terbentuk dari tumbuhan atau pohon yang berasal dari hutan dimana batubara tersebut terbentuk. Batubara yang terbentuk sesuai dengan teori in-situ biasanya terjadi di hutan basah dan berawa, sehingga pohon-pohon di hutan tersebut pada saat mati dan roboh, langsung tenggelam ke dalam rawa tersebut, dan sisa tumbuhan tersebut tidak mengalami pembusukan secara sempurna, dan akhirnya menjadi fosil tumbuhan yang membentuk sedimen organik.

2. Teori *Drift*

Batubara terbentuk dari tumbuhan atau pohon yang berasal dari hutan yang bukan di tempat dimana batubara tersebut terbentuk. Batubara yang terbentuk sesuai dengan teori drift biasanya terjadi di delta-delta, mempunyai ciri-ciri lapisan batubara tipis, tidak menerus (*splitting*), nyak lapisannya (*multiple seam*), banyak pengotor (kandungan abu nderung tinggi). Proses pembentukan batubara terdiri dari dua tahap



yaitu tahap biokimia (penggambutan) dan tahap geokimia (pembatubaraan) (PTBA, 2014).

Tahap penggambutan (*peatification*) adalah tahap dimana sisa-sisa tumbuhan yang terakumulasi tersimpan dalam kondisi bebas oksigen (anaerobik) di daerah rawa dengan sistem pengeringan yang buruk dan selalu tergenang air pada kedalaman 0,5 - 10 meter. Material tumbuhan yang busuk ini melepaskan unsur H, N, O, dan C dalam bentuk senyawa CO₂, H₂O, dan NH₃ untuk menjadi humus. Selanjutnya oleh bakteri fungsi diubah menjadi gambut (PTBA, 2014)

Tahap pembatubaraan (*coalification*) merupakan gabungan proses biologi, kimia, dan fisika yang terjadi karena pengaruh pembebanan dari sedimen yang menutupinya, temperatur, tekanan, dan waktu terhadap komponen organik dari gambut. Pada tahap ini prosentase karbon akan meningkat, sedangkan prosentase hidrogen dan oksigen akan berkurang. Proses ini akan menghasilkan batubara dalam berbagai tingkat kematangan material organiknya mulai dari lignit, sub-bituminus, bituminus, semi antrasit, antrasit, hingga meta antrasit (PTBA, 2014).

Pembentukan batubara dimulai sejak periode pembentukan Karbon (*Carboniferous Period*) dikenal sebagai zaman batubara pertama yang berlangsung antara 360 juta sampai 290 juta tahun yang lalu. Proses awalnya, endapan tumbuhan berubah menjadi gambut/*peat* (C₆₀H₆O₃₄) yang selanjutnya berubah menjadi batubara muda (*lignite*) atau disebut pula batubara coklat (brown coal). Batubara muda adalah batubara dengan jenis maturitas organik rendah (PTBA, 2014).

Setelah mendapat pengaruh suhu dan tekanan yang terus menerus selama jutaan tahun, maka batubara muda akan mengalami perubahan yang secara bertahap menambah maturitas organiknya dan mengubah batubara muda menjadi batubara sub-bituminus (*sub-bituminous*). Perubahan kimiawi dan fisika terus berlangsung hingga batubara menjadi lebih keras dan warnanya lebih hitam sehingga membentuk bituminus (*bituminous*) atau antrasit (*anthracite*). Dalam kondisi yang tepat, peningkatan maturitas organik yang semakin tinggi terus

ing hingga membentuk antrasit (PTBA, 2014).

ada dasarnya terdapat dua jenis material yang membentuk batubara, yaitu (Sudrajat, 2005):



1. *Combustible material*

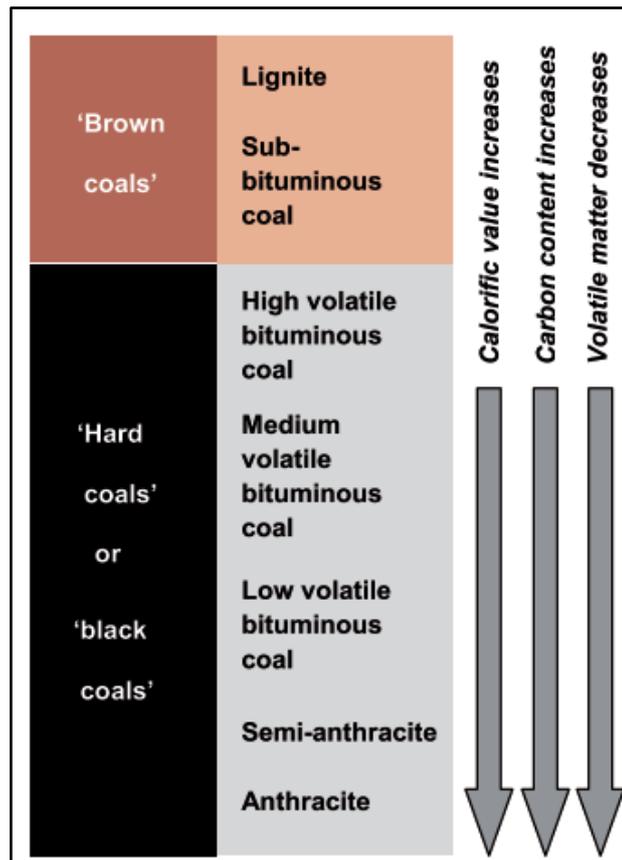
Merupakan bahan atau material yang dapat dibakar/dioksidasi oleh oksigen. Material tersebut umumnya terdiri dari karbon padat (*fixed carbon*), senyawa hidrokarbon, total sulfur, senyawa hidrogen, dan beberapa senyawa lainnya dalam jumlah kecil.

2. *Non-combustible material*

Merupakan bahan atau material yang tidak dapat dibakar/dioksidasi oleh oksigen. Material tersebut umumnya terdiri dari senyawa anorganik (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , Mn_3O_4 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O dan senyawa logam lainnya dalam jumlah kecil) yang akan membentuk abu dalam batubara. Kandungan *non-combustible material* ini umumnya tidak diinginkan karena akan mengurangi nilai bakarnya.

Batubara adalah batuan yang mudah terbakar, terdiri dari sisa-sisa tumbuhan yang mengalami litifikasi. Terdiri dari maseral, mineral dan air. Hal ini terbentuk dari perubahan material tanaman mati yang awalnya terakumulasi sebagai endapan permukaan gambut dan kemudian terkubur di bawah lapisan sedimen yang lebih muda. Seiring dengan meningkatnya suhu, akibat bertambahnya kedalaman penimbunan, gambut awal dapat diubah secara berurutan melalui proses pembatubaraan melalui batubara coklat, yang mencakup batubara lignit dan *sub-bituminous*, menjadi batubara hitam atau batubara keras yang terdiri dari batubara *bituminous*, semiantrasit dan antrasit (Gambar 1). Batubara melibatkan hilangnya air dan komponen-komponen yang mudah menguap dalam bentuk karbon dioksida dan metana serta peningkatan kandungan karbon, dari sekitar 60 persen pada gambut menjadi lebih dari 90 persen pada batubara *bituminous* dan 95 persen pada antrasit (Kendal *et al.*, 2010).





Gambar 1 Klasifikasi batubara (Kendal *et al.*, 2010).

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam proses coalifikasi adalah pengurangan porositas dan penambahan anisotrop optikal yang sejajar dengan bidang lapisan, hal ini dapat dihubungkan bahwa tekanan yang ada akan melebihi tekanan pembebanan seiring dengan kedalaman. Porositas biasanya menurun secara cepat pada awalnya dan diperkirakan karena adanya kelembaban, oleh karena itu biasanya dijadikan sebagai indikator diagenesa yang baik untuk tanah gambut dan lignit yang masih bisa berubah. Kemudian, derajat coalifikasi diperkirakan lebih dominan dengan parameter kimiawi (karbon, oksigen, hidrogen, dan bahan volatil) atau dengan sifat optis, seperti reflektivitas vitrinit, walaupun semua itu tergantung dari komposisi kimiawinya (Tabel 1) (Rahmad *et al.*, 2020).



Tabel 1 Klasifikasi dan sifat batubara coklat (lignite) dan perbedaan antara “Braunkohle” dan “Steinkohle” (*Deutsches Institute Fur Normung*)

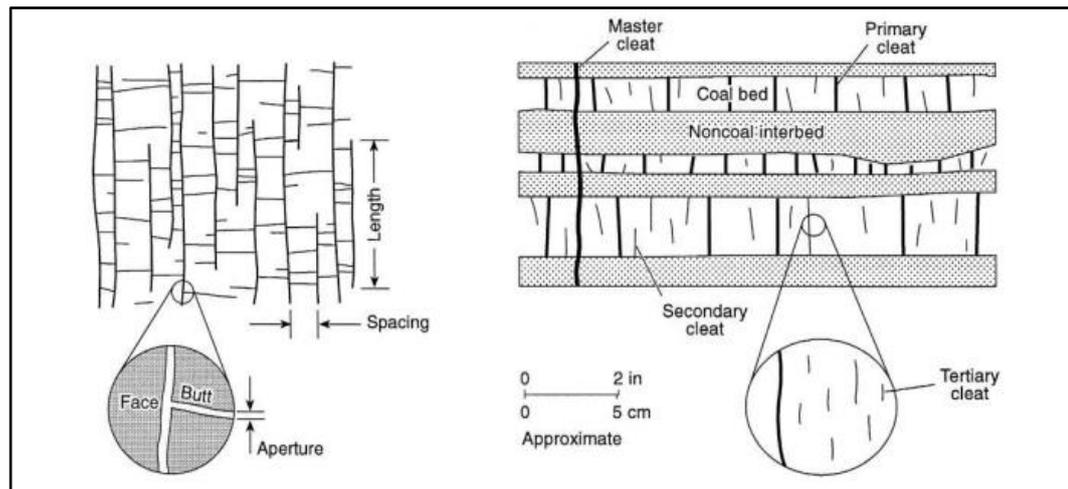
Tingkat Batubara	Megascopie	Microscopie	PATTEISKY & M. TEICHMULLER (1960)	Rumus Kimia – Fisika			
				Lapisan (warna)	Perilaku pada Pendidikan Dengan KOH	Perilaku pada pencairan Dengan NHO ₃	
Braunkohle (Batubara coklat) Hartbraunkohle (Batubara coklat keras)	Weichbraunkohle (Batubara coklat Halus)	Coklat, tak Mengkilap, Sebagian Berbau tanah	Volume pori besar, Gelifikasi jarang, Sel humen terbuka (tekstinit)	75 – 35% H ₂ O < 4000 kcal/kg ₂ Biasanya < 71 – ca. 71% C ₃ Ca. 53 – 49% VM ₃			
	Mattbraunkohle (Batubara coklat Tak mengkilap)	Coklat gelap Menuju Hitam, tak mengkilap Sampai sedikit terang)	Volume pori besar, Gelifikasi jarang, Sel humen terbuka (tekstinit)	35 – 25% H ₂ O < 400 - 5500 kcal/kg ₂ Biasanya < 71 – ca. 71% C ₃ Ca. 53 – 49% VM ₃	Coklat Kadang hitam	Larutan coklat	Larutan merah
	Glanzbraunkohle (Batubara coklat terang)	Hitam, terang	Gelifikasi (vitritisasi) Lengkap, mikrinit Belum terbentuk	Biasanya > 8 – 10% H ₂ O 5500 - 7000 kcal/kg ₂ Ca. 71 – 77% C ₃ Ca. 49 – 42% VM ₂			
	Steinkohle (Batubara bitumious)	Hitam, terang	Seperti Glanzbraunkohle Mikrinit terbentuk	Biasanya < 8 – 10% H ₂ O Biasanya > 7000 kcal/kg ₂ Biasanya > 77% C ₃ Biasanya < 77% VM ₃	hitam Kadang coklat	Tak berwarna	Tak berwarna

Sumber: Rahmad *et al.*, 2020

2.2 Cleat

Cleat adalah suatu rekahan yang alami di dalam kandungan batubara dengan sifat terbuka, terdiri atas *face cleat* dan *butt cleat* (Nugraha & Jati, 2019). Kedua jenis *cleat* ini pada umumnya membentuk sudut siku atau sedikit siku satu sama lain dan tegak lurus terhadap permukaan lapisan batubara atau mempunyai orientasi berbeda dengan kedudukan lapisan batubara *Face cleat* biasanya terbentuk oleh sistem *cleat* primer sedangkan *butt cleat* terbentuk akibat sistem *cleat* sekunder, ukuran *face cleat* biasanya lebih panjang daripada *butt cleat* (Gambar 2) kehadiran *cleat* di dalam lapisan batubara disebabkan oleh berbagai faktor yang meliputi mekanisme pengendapan, petrografi batubara, derajat batubara, tektonik (struktur), dan aktivitas pekerjaan tambang. Dari faktor tersebut dapat mengendalikan distribusi, luas, kepadatan dan kemenerusan dari *cleat* pada lapisan batubara (Laubach *et al.*, 1998).





Gambar 2 Kenampakan *Face cleat* dan *butt cleat* (Laubach *et.al*, 1998)

Arah gaya tektonik sejajar dengan arah *face cleat* batubara, maka permeabilitas akan besar. Sebaliknya bila arah gaya tektonik tegak lurus dengan arah *face cleat*, maka permeabilitas akan kecil. Hal ini disebabkan karena tekanan yang diberikan bukan melewati *face cleat*, melainkan melalui *butt cleat* (Olsen dkk., 2003).

Cleat dapat terbentuk saat dan setelah proses pembatubaraan sebagai akibat dari proses eksternal, yaitu proses tektonik (Maulana dan Anggara, 2016). Cleats yang terbentuk dari proses tektonik memiliki hubungan terhadap struktur rekahan yang direfleksikan menjadi struktur kelurusan pada data citra. Orientasi struktur rekahan dikontrol oleh sistem gaya tekan tektonik yang hadir selama proses pembentukannya, sedangkan cleats dan rekahan pasca proses pembatubaraan mungkin dihubungkan terhadap pembentukan cleat di atas struktur lipatan dan patahan. Orientasi cleats dan patahan pada lapisan batubara cenderung diselaraskan dengan struktur kelurusan atau lineaments (Thakur dkk, 2014).

Cleat sangat berperan sebagai migrasi dan tempat akumulasi gas metana dalam kandungan batubara. Sehingga di dalam dunia pertambangan batubara sangat menarik sekali untuk di eksplorasi lebih lanjut. Kemudian ada beberapa data yang dapat diambil dalam batubara tersebut yaitu orientasi, jarak antar *cleat*, bukaan, panjang, tinggi, keterhubungan antar bidang *cleat*, serta hubungan *cleat* enesis. *Cleat* pada lapisan batubara merupakan pengendali kestabilan nambangan, tempat mengalir gas dan cairan. *Cleat* dapat terbentuk pada rang berbeda di dalam sejarah pembentukan batubara akibat berbagai



mekanisme seperti pengaruh proses dehidrasi atau *desiccation*, devolatilisasi, mekanisme pengendapan, tebal lapisan batubara, kandungan maseral, litotipe batubara, derajat batubara, lingkungan pengendapan batubara, kontraksi termal, tektonik regional, struktur geologi dan aktivitas pekerjaan tambang (Laubach *et.al*, 1998).

Ammosov & Eremin, (1963) menggunakan klasifikasi genetik, membagi *cleat* menjadi endogenetik dan eksogenetik. Selanjutnya Jeremic (1986), membedakan *cleat* berdasarkan genesanya menjadi tiga jenis, yaitu:

1. *Endogenic cleat* terbentuk pada saat batubara mengalami *coalification* dan di bentuk oleh oleh gaya internal akibat pengeringan atau pengurangan air (*dewatering*) dan penyusutan (material organik). Berhubungan dengan tingkat kematangan batubara, orientasinya mencerminkan *paleo-cleat* dan hampir selalu tegak lurus perlapisan. Umumnya tegak lurus bidang perlapisan, sehingga bidang *cleat* cenderung membagi lapisan batubara menjadi fragmen-fragmen tipis yang tabular.
2. *Exogenic cleat* terbentuk setelah *coalification*, yang di bentuk oleh gaya eksternal yang berhubungan dengan adanya tektonik. *Cleat* ini terorientasi pada arah tegasan utama dan dapat terdiri atas dua pasang kekar yang saling membentuk sudut.
3. *Induced cleat* bersifat lokal akibat proses penambangan, yaitu adanya perpindahan beban ke dalam struktur tambang atau karena pengaruh peledakan. Oleh karena itu, pemahaman tentang karakteristik dan genesa *cleat* menjadi penting.

2.3 Porositas

Porositas adalah ukuran volume rongga dalam suatu bahan atau massa (Price, 2009). Porositas tergantung pada ruang antara butir, dalam massa itu akan mencakup ruang apapun yang disediakan oleh celah dan sambungan terbuka.



$$(n) = \frac{\text{Volume Pori}}{\text{Volume Total}} \times 100\% \quad (1)$$

tor-faktor yang mempengaruhi porositas tanah meliputi distribusi ukuran sortasi, bentuk butir, kain, tingkat pemadatan, efek larutan dan, terakhir,

komposisi mineralogi, khususnya adanya partikel lempung (Bell, 1978). Porositas tertinggi dicapai ketika semua butir memiliki ukuran yang sama. Penambahan butiran dengan ukuran berbeda ke kumpulan seperti itu menurunkan porositas dan ini, dalam batas-batas tertentu, berbanding lurus dengan jumlah yang ditambahkan. Penyimpangan dalam bentuk butir menghasilkan kisaran porositas yang lebih besar, karena bentuk tidak beraturan mungkin secara teoritis dikemas baik lebih erat atau lebih longgar dari bola. Demikian pula, butiran sudut dapat menyebabkan peningkatan atau penurunan porositas. Setelah sedimen 31 terkubur dan terindurasi, beberapa faktor tambahan membantu menentukan porositasnya. Yang utama di antaranya adalah jarak butir yang lebih dekat, deformasi dan granulasi butir, rekristalisasi, pertumbuhan sekunder mineral, sementasi dan, dalam beberapa kasus, pembubaran. Oleh karena itu, perubahan diagenesa yang dialami oleh batuan sedimen dapat meningkatkan atau menurunkan porositas aslinya.

2.4 Permeabilitas

Permeabilitas dan porositas adalah dua hal utama sifat yang mengontrol pergerakan dan penyimpanan fluida dalam batuan. Keduanya merupakan bagian yang penting dalam karakterisasi material. Dengan menggunakan data yang telah diketahui tentang permeabilitas dan porositas, kemungkinan pengaruh air pada suatu konstruksi teknik dapat diperhitungkan. Lebih jauh lagi, pengetahuan tentang permeabilitas dan porositas itu akan dapat mengetahui kebocoran air pada struktur pondasi untuk mengevaluasi kesesuaian dengan suatu lubang pondasi, dan dalam hal desain kedap air pada bangunan. Permeabilitas dan porositas juga merupakan indikator yang sangat penting untuk pemanfaatan berbagai jenis batuan (Christensen *et al.*, 1996).

Permeabilitas adalah kemampuan material berpori untuk memungkinkan lewatnya fluida, Sedangkan porositas menggambarkan bagian ruang kosong pada media berpori di dalam batuan, di mana rongga-rongga itu mungkin berisi udara

(Sperl & Trckova, 2008). Permeabilitas dan porositas memiliki dampak apukan batuan, yang kemudian berpengaruh pada bidang pemanfaatan 'ermeabilitas adalah salah satu sifat batuan yang diperlukan untuk



mempertimbangkan penyelesaian masalah hidrologi dan hidrogeologi dengan metode pemodelan numerik dan fisik (Huenges & Zimmermann, 1999).

Perhitungan permeabilitas batuan dapat dilakukan dalam berbagai metode yang dibedakan berdasarkan media yang digunakan. Dalam kasus jika fluida yang melewati material berpori adalah air, permeabilitas dapat dinyatakan dengan koefisien konduktivitas k [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], yang berarti kecepatan debit aliran air dalam batuan berada di bawah satuan gradien hidrolis, biasanya dinyatakan dalam meter per detik.

$$k = \frac{Q \cdot l}{A \cdot h \cdot t} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (2)$$

Dimana:

Q = adalah volume air yang bocor melalui sampel selama waktu t

l = adalah tinggi sampel yang diuji

A = adalah penampang melintang dari sampel

h = adalah perbedaan tingkat tekanan air

t = adalah periode pengukuran.

Porositas didefinisikan sebagai perbandingan volume rongga dengan volume total batuan, termasuk komponen padat dan rongga yang dinyatakan dalam bentuk persentase. Porositas dihitung dari rumus berikut ini (Sperl & Trckova, 2008):

$$n = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho}\right) \times 100\% \quad (3)$$

Di mana ρ_d adalah densitas dari spesimen kering dan ρ adalah densitas partikel.

Permeabilitas dan porositas bergantung pada pori-pori di dalam batuan. Ada dua tipe pori yang dapat dilihat pada batuan yaitu pori yang tertutup dan terbuka. Pori tertutup adalah pori yang sepenuhnya terisolasi dari permukaan luar, tidak memungkinkan akses masuknya fluida eksternal baik dalam fase cair maupun gas. Pori tertutup memengaruhi parameter seperti densitas dan sifat mekanik dan termal. Pori terbuka adalah pori yang terhubung ke permukaan luar dan oleh karena itu dapat diakses oleh fluida, tergantung pada karakteristik/ukuran pori dan sifat fluida. Pori terbuka dapat dibagi lagi menjadi pori terputus dan pori yang terhubung. Persentase pori-pori yang saling berhubungan di dalam batuan dikenal sebagai porositas efektif. Porositas efektif tidak termasuk pori-pori terisolasi dan volume pori yang ditempati oleh air yang teradsorpsi mineral



lempung atau butiran lainnya. Porositas total, ditentukan dari Persamaan 2, adalah total ruang kosong di dalam batuan, baik yang berkontribusi terhadap aliran fluida atau tidak. Porositas efektif biasanya lebih kecil dari porositas total (Sperl & Trckova, 2008).

2.5 Permeabilitas Batubara

Permeabilitas batubara merupakan faktor yang lebih penting dibandingkan dengan faktor *gas content*. Fluida mengalir sepanjang sistem rekahan pada lapisan batubara. *cleat* adalah sistem rekahan yang simetris, ortogonal, dan sebagian besar tegak lurus dengan perlapisan batuan (Ayers, 2002). Permeabilitas batubara mencerminkan kemampuan aliran fluida seperti gas batubara di lapisan batubara dan ini penting untuk simulasi dan identifikasi sistem fluida di lapisan batubara. Sebagai media porositas yang kaya akan zat organik, permeabilitas batubara mengalami evolusi unik karena adsorpsi/desorpsi. Berbeda dengan regangan elastis, regangan yang disebabkan oleh penyerapan ditampilkan perilaku non-linier dengan injeksi gas yang terus-menerus menyerap, dan kedua jenis regangan tersebut bersaing dalam proses dalam menyebabkan perubahan volumetrik batubara. Struktur geologi mempunyai pengaruh besar terhadap permeabilitas batubara. Permeabilitas batubara di dekat zona rekahan pada struktur tarik lebih besar dibandingkan dengan zona rekahan dimana tegangan terkonsentrasi (Zou *et al.*, 2022).

Penelitian yang dilakukan oleh Zou *et al.* (2022) menunjukkan bahwa Permeabilitas batubara meningkat seiring dengan meningkatnya porositas. Secara umum, diameter pori dan kompleksitas pori batubara mempunyai dampak besar terhadap permeabilitasnya. Koefisien korelasi yang rendah pada hasil penelitian juga menunjukkan bahwa permeabilitas dipengaruhi oleh banyak faktor dan bukan oleh porositas saja. Hal serupa terjadi pada hubungan antara permeabilitas dengan struktur geologi dimana pengaruh faktor geologi terhadap permeabilitas bervariasi berdasarkan kondisi geologi, faktor-faktor yang mempengaruhi permeabilitas sangat banyak dan beragam secara keseluruhan faktor utama yang mempengaruhi permeabilitas batubara adalah sifat-sifat batubara itu sendiri,



seperti rata-rata ukuran pori berdasarkan adsorpsi BJH (metode ukuran pori Barrett–Joyner–Halenda), kedalaman, dan dimensi fraksi.

2.5.1 Constant head test

Pada percobaan ini, air yang ada pada permeameter dengan tinggi tekanan yang tetap dibiarkan untuk mengalir menembus suatu sampel tanah yang telah dimasukkan kedalam sebuah silinder yang memiliki luas penampang (A) kemudian banyaknya debit air (Q) yang lewat melalui sampel tanah tersebut diukur dalam satuan waktu (t) dan kemudian air yang berhasil melewati sampel tanah tersebut dikumpulkan kedalam suatu gelas ukur. Piezometer yang dipasang pada silinder tersebut memperlihatkan tinggi tekanan (h) pada panjang sampel (L) (Das, 2008). Maka dari percobaan tersebut permeabilitas tanah dapat dihitung berdasarkan banyaknya air yang merembes melalui tanah dalam waktu tertentu, yang dirumuskan dalam hukum Darcy (Hubbert, 1957), yaitu:

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t} \quad (4)$$

Dimana

k = Koefisien Permeabilitas

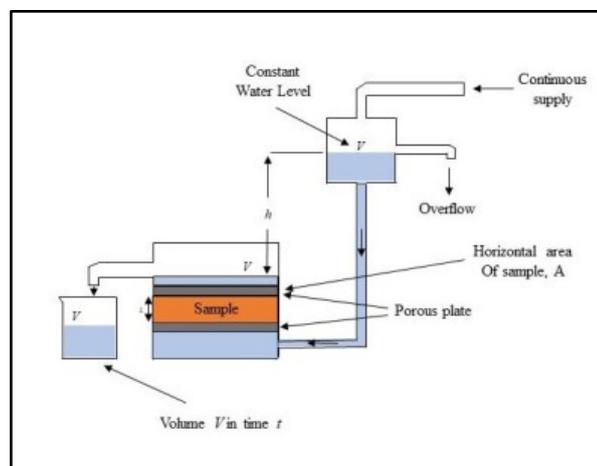
Q = Banyak air yang mengalir atau debit air (cm^3)

L = Panjang jalan aliran melalui tanah (cm)

A = Luas penampang tanah yang di lewati oleh air (cm^2)

h = Tinggi energi hidrolis melewati tanah (cm)

t = Waktu pengaliran (s)



Gambar 3 Constant head permeameter (Mays, 2012)



2.6 Uji Kinetik

Uji kinetik adalah simulasi proses oksidasi (pelapukan) yang dilakukan untuk menegaskan hasil dari uji statik, memberikan gambaran mengenai laju reaksi dan kualitas air lindi dan memperkirakan potensi geologi material untuk menghasilkan penyaliran yang dapat berdampak terhadap lingkungan. Tujuan utama dari uji kinetik adalah untuk memahami kinetika reaksi pembentukan asam pada sampel melalui suatu simulasi reaksi oksidasi dalam batuan. Selain itu, hal-hal yang dapat diperoleh dari hasil uji kinetik ini antara lain (Gautama, 2019):

1. Memberikan konfirmasi tentang potensi pembentukan AAT.
2. Mengetahui laju oksidasi sulfur dan pembangkitan asam.
3. Mengetahui kurangnya potensi penetralan.
4. Menggambarkan dampak dari bakteri.
5. Mempekirakan tingkat pelindian logam dan memberikan indikasi konsentrasi kation/anion pada air tambang.
6. Memilih strategi uji yang tepat untuk mengevaluasi rencana pengelolaan AAT dan strategi pengendalian yang berbeda.

Metode yang sering digunakan untuk uji kinetik diantaranya adalah *free draining column leach test* dan *humidity cells* dengan lama waktu pelaksanaan ujinya bergantung pada karakteristik material dan reaktivitas mineral sulfida yang terkandung dalam sampel. Untuk mendapatkan gambaran tentang karakteristik kinetika oksidasi sampel batuan yang berasal dari tambang batubara tidak memerlukan waktu yang lama.

2.6.1 Humidity cell test

Uji ini bertujuan untuk mengidentifikasi *effluent* yang dihasilkan dari batuan. Identifikasi *effluent* tersebut mencakup beberapa hal, diantaranya (Gautama, 2019):

1. Sifat asam, basa, atau netralnya *effluent*.
2. Larutan dalam *effluent* yang merepresentasikan produk pelapukan yang terbentuk selama periode waktu tertentu.
3. Banyaknya larutan yang dihasilkan.



4. Menentukan laju atau tingkat dimana larutan dihasilkan dalam kondisi tertentu pengujian.

Dalam uji *humidity cell* ini, udara dialirkan ke dalam sampel. Udara yang dialirkan adalah udara kering dan udara lembab. Udara kering dialirkan melalui sampel selama 3 hari pertama dan udara lembab 3 hari berikutnya. Pada hari ke-7 sampel dialiri air dengan volume tertentu dan air lindiannya ditampung untuk dianalisa. Tujuan pengaliran udara kering ini adalah agar terjadi penguapan air dalam pori-pori sampel yang masih tersisa sehingga kejenuhan sampel akan berkurang dan semakin banyak udara yang mengalir masuk, sehingga laju difusi oksigen meningkat. Oksidasi unsur seperti besi sulfida akan meningkat dengan meningkatnya laju difusi oksigen. Selain itu, pengaliran udara kering juga akan meningkatkan konsentrasi anion/kation dan keasaman sedangkan pengaliran udara lembab bertujuan untuk membantu mengatur massa air yang ada di dalam sampel batuan agar selalu konstan. Pengaliran udara lembab ini juga dapat meningkatkan laju difusi dari hasil pelapukan pada sisa air dalam sampel tanpa benar-benar menjenuhkan sampel dan dapat mempengaruhi difusi oksigen. Contoh pengujian *humidity cells* dapat dilihat pada Gambar 4 sebagai berikut (Gautama, 2019).



Gambar 4 *Humidity Cell* (Gautama, 2019)

2.6.2 *Free Draining column Leach test*



Free draining column leach test (FDCL) merupakan salah satu metode yang a dan mudah, karena dapat dilakukan di lapangan maupun di ium. Informasi yang biasanya didapatkan dari *column leach test* ini

adalah mengenai reaktivitas mineral sulfida, laju pelapukan atau oksidasi, kelarutan logam, dan karakteristik air lindi atau *leachate*.

Salah satu yang harus dipersiapkan untuk melakukan FDCL ini adalah wadah, biasanya menggunakan wadah *buchner funnel* (Gambar 5) dengan diameter 175 mm dan tinggi 100 mm dengan kapasitas sekitar 2,5 liter dan mampu menahan 2-2,5 kg batuan yang telah digerus, tailing atau sedimen. Ukuran wadah dapat disesuaikan dengan ukuran sampel yang akan diuji (Gautama, 2019).



Gambar 5 *Buchner Funnel* (Gautama, 2019)

Dalam uji FDCL ini diberlakukan siklus basah-kering baik harian, mingguan, atau bulanan. Siklus basah dilakukan dengan cara menyiramkan air destilat ke permukaan sampel batuan yang berada di dalam wadah, sedangkan siklus kering dilakukan dengan memasang lampu yang memberikan efek panas diatas wadah. Siklus basah-kering ini dirancang sebagai pendekatan dengan kondisi di lapangan. Air lindi yang berasal dari air penyiraman dikumpulkan dibagian bawah wadah untuk selanjutnya diteliti kualitasnya. Contoh pengujian uji FDCL dapat dilihat pada Gambar 6 sebagai berikut.



Gambar 6 *Free draining column leach test (FDCLT)* (Gautama, 2019)



2.7 Pembentukan Air Asam Tambang

Industri pertambangan batubara sangat berperan dalam menggerakkan perekonomian Indonesia. Selain menjadi salah satu sumber pendapatan negara dan memenuhi kebutuhan Batubara di Indonesia, industri pertambangan juga menyediakan lapangan pekerjaan bagi warga Indonesia. Namun industri pertambangan batubara juga merupakan salah satu industri yang menyebabkan terganggunya keseimbangan ekosistem pada lingkungan. *United Nations Environment Programme* (UNEP, 1999) menggolongkan dampak-dampak yang timbul dari kegiatan pertambangan batubara antara lain kerusakan habitat dan *biodiversity* di sekitar lokasi pertambangan, limbah tambang dan pembuangan *tailing*, buangan air limbah dan air asam tambang, pengelolaan bahan kimia, keamanan, dan pemaparan bahan kimia ditempat, toksisitas logam berat dan kesehatan masyarakat dan pemukiman di sekitar tambang. Kegiatan ini, secara umum menimbulkan kerusakan pada permukaan bumi, antara lain terbentuknya air asam tambang. Dampak yang dapat ditimbulkan akibat air asam tambang adalah terjadinya pencemaran lingkungan, dimana komposisi atau kandungan air di daerah yang terkena dampak tersebut akan berubah sehingga dapat mengurangi kesuburan tanah, mengganggu kesehatan masyarakat sekitarnya, dan dapat mengakibatkan korosi pada peralatan tambang (Fitrah, 2019).

Air asam dapat terbentuk secara alami, sebagai akibat teroksidasi dan terlarutkannya sulfida ke dalam sistem aliran air permukaan dan air tanah menyebabkan turunnya pH air. Kegiatan penambangan, dengan membongkar endapan sulfida, berpotensi memperbesar dan mempercepat proses pembentukan air asam. Pembentukan air asam akibat kegiatan penambangan atau sering disebut dengan air asam tambang perlu dicegah. Air asam tambang yang tidak dapat dihindarkan terbentuk di wilayah tambang, harus dinetralkan agar tidak berdampak buruk terhadap lingkungan sekitarnya. Karena tingkat kemasaman dan konsentrasi logam larutnya tinggi, jika AAT mengalir ke ekosistem akuatik dapat menjadi polutan yang meracuni ikan dan organisme akuatik lainnya. Air tercemar dapat mengakibatkan terjadinya kerusakan/korosi bangunan-bangunan pipa-pipa saluran air irigasi atau air minum dan air menjadi tidak layak . Jika terbentuk atau melewati ekosistem daratan (tanah), AAT dapat



mencemari dan meracuni organisme tanah, termasuk vegetasi. Oleh karena itu upaya mencegah, mengurangi atau menghambat terbentuknya AAT dari material yang berpotensi menghasilkan asam menjadi sangat penting, sebelum AAT tersebar ke lingkungan yang lebih luas. Demikian juga upaya remediasi AAT yang sudah terbentuk sangat penting untuk mengurangi tingkat kerusakan lingkungan (Fitrah, 2019).

Pembentukan AAT tidak dipengaruhi oleh iklim, AAT dapat ditemukan baik di lokasi pertambangan yang dengan tingkat curah hujan yang tinggi maupun pada daerah yang relatif kering. Hal tersebut terjadi karena sumber air untuk AAT ini dapat berasal dari air hujan, air limpasan hujan, dan air tanah. Selain itu, pembentukan AAT dapat berlangsung cepat ataupun lambat setelah terdedahnya mineral sulfida. Terdapat tiga komponen utama yang mempengaruhi terbentuknya AAT diantaranya adalah mineral sulfida sebagai sumber/penyedia asam, oksigen sebagai pengubah senyawa sulfida menjadi ion-ion yang mudah larut serta air sebagai reaktan dan pelarut ion-ion hasil reaksi oksidasi serta sebagai media transport AAT ke lingkungan. Pada suatu areal kegiatan pertambangan, AAT dapat terbentuk melalui berbagai proses, antara lain (Gautama, 2019):

1. Air limpasan hujan yang mengalir dan kontak dengan dinding pit penambangan.
2. Air hujan yang jatuh dan terinfiltrasi pada timbunan batuan penutup.
3. Air hujan yang jatuh dan terinfiltrasi pada timbunan batubara atau bijih hasil. Penambangan (*run off mine*, ROM), tumpukan bijih pada ekstraksi mineral berharga dengan metode *heap leach*, timbunan *tailing* dan timbunan limbah sisa pencucian batubara.
4. Air tanah yang mengalir ke dalam bukaan tambang bawah tanah dan kontak dengan batuan dinding bukaan.
5. Air tanah dan limpasan hujan yang mengalir ke zona ambrukan pada tambang bawah tanah dengan metode ambrukan.

Tipe air tambang merupakan hasil dari reaksi kimia yang menghasilkan macam species senyawa kimia yang mengalami degradasi secara alami yakibatkan ditemukannya berbagai macam tipe atau bentuk senyawa air tersebut. Dalam menentukan kualitas air tambang diperlukan beberapa



kriteria yang dapat menentukan apakah air tambang dapat dimanfaatkan untuk kehidupan manusia, seperti air minum, air mandi dan cuci, air toilet, air irigasi untuk pertanian, air minum untuk peternakan atau air untuk usaha budidaya perikanan atau juga untuk dimanfaatkan sebagai wilayah pariwisata. Adakalanya wilayah kolam air dapat juga digunakan untuk tempat pengembangan pemukiman atau sering dimanfaatkan sebagai *water front city area* (Fitrah, 2019).

Air asam tambang adalah air bersifat asam dan mengandung zat besi dan sulfat, yang terbentuk pada kondisi alami pada saat strata geologi yang mengandung pyrite terpapar ke atmosfer atau lingkungan yang bersifat oksidasi. Air asam tambang dapat terbentuk dari tambang batubara, baik pada pertambangan permukaan maupun pertambangan bawah tanah. Air tambang alkali (*alkaline mine drainage*) adalah air tambang yang mempunyai tingkat keasaman (pH) 6 atau lebih, mengandung alkalinitas tetapi masih mengandung logam terlarut yang dapat menghasilkan asam (Fitrah, 2019).

Kualitas air tambang, asam atau alkali, bergantung pada ada atau tidaknya kandungan mineral asam (sulfida) dan material alkali (material karbonat) di dalam strata geologi. Umumnya material yang banyak mengandung sulfida dan mengandung sedikit material alkali cenderung membentuk air asam tambang. Sebaliknya material yang banyak mengandung alkali, walaupun mengandung material sulfida dengan konsentrasi yang banyak, sering menghasilkan air alkali (*net alkaline water*) (Fitrah, 2019).

Air asam tambang dapat dikelompokkan ke dalam 5 tipe yaitu (Fitrah, 2019):

1. Tipe 1

Air asam tambang yang tidak atau sedikit mengandung alkalinitas (pH < 4,5) dan mengandung Fe, Al, Mn, dan logam lainnya, asam (H⁺) dan oksigen dengan konsentrasi yang tinggi. Air tambang tipe ini disebut air asam tambang (*acid mine drainage*, AMD). Air asam tambang (AMD) mungkin juga merujuk pada air yang mempunyai pH < 6 dan mengandung asam bersih (net acidity), yaitu keasamannya lebih besar daripada alkalinitasnya.



2. Tipe 2

Air asam tambang yang mempunyai kandungan zat padat terlarut yang tinggi, yakni mengandung besi ferro dan Mn yang tinggi, sedikit atau tanpa mengandung oksigen, dan $\text{pH} > 6$. Pada kondisi teroksidasi, pH air tipe ini dapat turun secara tajam sehingga berubah menjadi air tipe 1.

3. Tipe 3

Air asam tambang yang mengandung zat padat terlarut dengan konsentrasi sedang sampai tinggi, mengandung besi ferro dan Mn dengan konsentrasi rendah sampai sedang, tanpa atau sedikit mengandung oksigen, $\text{pH} > 6$, dan alkalinitas lebih besar dari keasaman (*acidity*). Umumnya disebut juga dengan air tambang alkali (*alkaline mine drainage*). Pada kondisi teroksidasi, asam yang terbentuk dari hidrolisa logam dan reaksi pengendapan akan dinetralkan oleh senyawa alkali yang sudah terdapat di dalam air.

4. Tipe 4

Air asam tambang tipe 1 yang dinetralkan hingga pH-nya > 6 dan mengandung partikel tersuspensi dengan konsentrasi yang tinggi. Pengendapan hidroksida logam di dalam air belum terjadi. Dengan waktu tinggal yang cukup di dalam kolam, maka partikel tersuspensi akan mengendap.

5. Tipe 5

Air asam tambang yang telah dinetralkan sehingga pH-nya > 6 dan mengandung zat padat terlarut dengan konsentrasi yang tinggi. Setelah hampir seluruh hidroksida logam diendapkan di dalam kolam pengendapan, kation utama yang masih tertinggal di dalam air dengan konsentrasi yang tinggi umumnya adalah kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) terlarut. Anion terlarut seperti bikarbonat dan sulfat masih tertinggal di dalam air. Jika pada proses netralisasi mengalami kekurangan alkalinitas, air tambang tipe 5 ini tidak akan terbentuk. Tipe lain dari air tambang terjadi dari tambang

ng mengandung sedikit sulfida dan karbonat dengan konsentrasi rendah sampai sedang. Air tipe ini biasanya mendekati pH netral, spesifik konduktan rendah ($< 100 \mu\text{S}/\text{mm}$) dan alkalinitas mendekati setimbang. Air



tipe ini dikelompokkan sebagai air netral atau inert. Di antara tipe-tipe air tambang di atas terdapat kemungkinan adanya tipe transisi sehingga pengambilan data yang sesuai dan analisa konsentrasi logam, pH air, serta status oksigen perlu dilakukan untuk menentukan tipe atau karakteristik air tambang.

2.7.1 Dampak Air Asam Tambang

Air asam tambang adalah air yang memiliki nilai pH rendah atau air yang memiliki tingkat keasaman tinggi sebagai akibat dari proses oksidasi mineral sulfida. Nilai pH yang rendah dapat menyebabkan meningkatnya kelarutan unsur unsur mikro yang umumnya merupakan unsur logam, yang dalam konsentrasi tinggi dapat meracuni tanaman (Widyati dkk., 2010). Air yang bermasalah dengan adanya asam dan logam dapat ditunjukkan oleh satu atau beberapa karakteristik kimia sebagai berikut (Hamdani dan Senjaya, 2011):

1. pH rendah (nilainya berkisar antara 1,5 hingga 4)
2. Konsentrasi logam terlarut yang tinggi (seperti besi, alumunium, mangan, kadmium, tembaga, timah, seng, arsenik dan merkuri)
3. Nilai kemasaman yang meningkat (seperti misalnya setara 50-15.000 mg/L CaCO₃)
4. Salinitas (sulfat) yang tinggi (konsentrasi sulfat umumnya antara 500–10.000 mg/L; salinitas umumnya antara 1000–20.000 μ S/cm)
5. Konsentrasi yang rendah dari oksigen terlarut (seperti kurang dari 6 mg/L)
6. Tingkat kekeruhan (turbiditas) atau total padatan tersuspensi yang rendah (dikombinasikan dengan satu atau lebih karakteristik di atas)

Jika AAT yang dihasilkan dari kegiatan penambangan langsung dibuang ke badan air penerima, maka akan menyebabkan dampak terhadap lingkungan yaitu meningkatnya kandungan logam di dalam air penerima. Hal tersebut tentunya akan berdampak negatif terhadap ekosistem di badan air penerima tersebut. Ion logam dan H⁺ yang terkandung dalam badan air penerima akan menyebabkan

n dengan tingkat kronik dan akut terhadap makhluk hidup di dalam air (Gautama, 2019).



Jika dilihat dari sisi perusahaan pertambangan, dampak negatif yang ditimbulkan oleh AAT ini adalah kerusakan pada peralatan berbahan besi atau baja akibat dari korosifnya AAT. Dengan rusaknya peralatan, maka berpengaruh pada keuangan perusahaan untuk biaya perbaikan/penggantian peralatan tersebut. AAT juga menjadi pertimbangan jika akan melakukan reklamasi lahan bekas tambang, karena kualitas tanah dan air yang asam akibat AAT tidak mendukung tanaman untuk bisa tumbuh dan berkembang (Gautama, 2019). Beberapa parameter yang berkaitan secara langsung dalam AAT adalah pH, konsentrasi padatan terlarut (TDS), jumlah sulfat, klorida, dan bikarbonat. Dimana jika pH rendah (asam), logam akan mudah terlarut dan jumlahnya akan meningkat, begitu pula dengan TDS yang akan meningkat (Gautama, 2019).

2.7.2 Prediksi Air Asam Tambang

Prediksi pembentukan AAT pada suatu lahan tambang dapat didasarkan pada hal-hal berikut (Gautama, 2019):

1. Pengalaman terdahulu atau berdasarkan perbandingan dengan tambang serupa.
2. Model lingkungan purba dan model geologi.
3. Analisis kimiawi, mineralogi, dan fisik dari batuan.
4. Uji statik, dimana uji ini dirancang untuk mengkuantifikasi neraca antara komponen pembentuk dan pengkonsumsi asam di dalam batuan.
5. Uji kinetik, dimana uji ini dirancang untuk mendapatkan gambaran tentang laju pelarutan mineral, pembangkitan asam, dan pelepasan logam.
6. Model matematika

Dalam proses pertambangan, mulai dari pembongkaran dan pengerukan lapisan batuan penutup dan pengolahan bahan tambang (batubara maupun bijih metal/mineral) dan pembuangan limbahnya, ada kemungkinan bahan-bahan yang berpotensi membentuk AAT tersebar dan berada di beberapa lokasi dalam lingkungan tambang. Pengetahuan keberadaan bahan-bahan tersebut penting

aya asesmen beban yang diakibatkan oleh kemasaman dan logam-logam yg di dalam AAT dan pengelolaannya (Fitrah, 2019).



2.8 Pencegahan AAT

AAT dapat dicegah dengan cara mengurangi kontak antara komponen pembentuk air asam tambang yaitu mineral sulfida, udara, dan air sehingga dapat meminimasi terjadinya reaksi oksidasi mineral sulfida dan/atau memaksimalkan ketersediaan reaktan penetral asam. Pencegahan AAT dapat dilakukan dengan beberapa cara, diantaranya (Gautama, 2019):

1. Meminimasi transport oksigen yang berasal dari proses difusi atau adveksi.
2. Meminimasi infiltrasi air.
3. Meminimasi, memindahkan, atau mengisolasi mineral sulfida.
4. Mengendalikan pH air pori.
5. Memaksimalkan ketersediaan mineral penetral asam dan alkalinitas air pori.
6. Mengendalikan proses bakteri dan biogeokimia.

Salah satu metode yang telah dikembangkan di lingkungan pertambangan adalah dengan metode enkapsulasi dan pelapisan. Prinsip dari metode ini adalah dengan menempatkan batuan PAF (*Potentially Acid Forming*) dan NAF (*Non Acid Forming*) atau batuan penutup sedemikian rupa sehingga dapat mengendalikan terbentuknya AAT (Gautama, 2019).

