

BAB II

TEORI DASAR

2.1 Sulfur dalam Batubara

Batubara merupakan batuan sedimen yang terbentuk dengan adanya proses akumulasi, perubahan, dan kompaksi sisa-sisa tanaman dalam lingkungan yang tereduksi seperti misalnya pada rawa. Sulfur dalam batubara dan *coal bearing rocks* biasa terdapat dalam bentuk sulfur organik, sulfur sulfat, dan sulfur pirit. Beberapa sulfur muncul dalam lapisan batubara setelah gambut berubah menjadi batubara. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan adanya lapisan pirit pada *vertical fracture surface* yang disebut dengan *cleat* pada lapisan batubara. Hampir kebanyakan pirit terdapat dalam *coal bearing rocks* dan *overburden* yang terdapat dalam butiran kristalin yang sangat kecil yang tercampur dengan komponen organik batubara. Pirit juga dapat tersebar di sekitar lapisan *sandstone* dan *shale* (Temple dan Koehler 1954). Sulfur pirit atau sulfur sulfida merupakan spesies sulfur utama pada sebagian besar batubara dan batuan terkait.

Sulfur organik merupakan sulfur yang kompleks dan terkombinasi dengan material organik batubara dan secara organik terikat dengan batubara. Bentuk ini hanya dapat ditemukan dalam jumlah yang cukup besar pada *coal beds* dan batuan berkarbon lainnya. Secara umum, komponen sulfur organik tidak reaktif secara kimia dan memberikan sedikit ataupun tidak memberikan efek dalam potensi pembentukan asam. .

Sedangkan sulfur sulfat biasanya ditemukan dalam jumlah kecil di batubara fresh dan batuan yang terkait, dan umumnya hasil dari pelapukan dan oksidasi sulfur sulfida yang baru saja terjadi. Sulfat merupakan produk reaksi dari oksidasi pirit dan bukan merupakan penghasil asam.

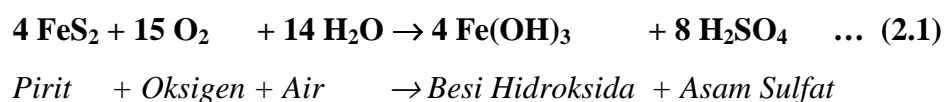
Mineral sulfida yang mendominasi adalah besi disulfida di mana mineral tersebut merupakan penghasil asam terbesar. Maksimum potensi keasaman (*Maximum Potential Acidity*-MPA) pada sampel *overburden* sangat berhubungan dengan kandungan sulfur pirit. Penelitian menunjukkan bahwa variasi kandungan sulfur dalam *overburden* menggambarkan variasi yang sama dalam kandungan sulfur pirit.

2.2 Pembentukan Air Asam Tambang

Air asam tambang-AAT (*Acid Mine Drainage*-AMD) atau juga disebut sebagai air asam batuan-AAB (*acid rock drainage*-ARD) adalah air yang bersifat asam dengan tingkat keasaman yang tinggi dan sering ditandai dengan nilai pH yang rendah di bawah 5 sebagai hasil dari oksidasi mineral sulfida yang terpajan atau terdedah di udara dengan kehadiran air. Kegiatan penambangan yang kegiatan utamanya adalah penggalian, mempercepat proses pembentukan AAT karena mengakibatkan tersingkapnya mineral sulfida ke udara, air, dan mikroorganisme (Gautama, 2012)

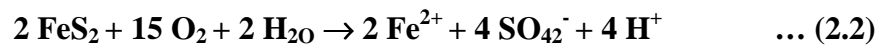
Pembentukan AAT dimungkinkan karena adanya tiga hal, yakni mineral sulfida sebagai sumber sulfur/asam, oksigen dalam udara sebagai pengoksidasi, serta air sebagai pencuci hasil oksidasi. Jenis sulfur yang terdapat di batuan yang mudah teroksidasi adalah sulfur yang terdapat dalam bentuk mineral sulfida (Gautama, 2012 dan Taufiq, 2008).

Setelah terekspos dalam kondisi oksidasi, mineral sulfida mengoksidasi air dan oksigen yang ada untuk membentuk asam serta air asam tambang. Komposisi dan konsentrasi logam bergantung pada tipe mineral sulfida dan jumlah keberadaannya. Reaksi umum pembentukkan AAT adalah sebagai berikut:

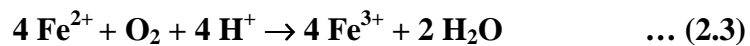


Reaksi tersebut dapat dirinci menjadi empat tahap reaksi :

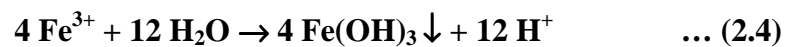
1. Reaksi pertama adalah reaksi pelapukan pirit disertai proses oksidasi.



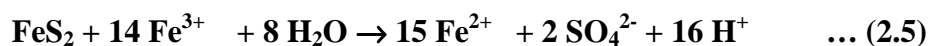
2. Dengan adanya penurunan pH, terjadi konversi dari besi ferro menjadi besi ferri yang mengkonsumsi satu mol keasaman. Laju reaksi kedua ini relatif lambat pada pH<5 dan kondisi abiotik. Mikroba yang berperan dalam mempercepat reaksi adalah *Thiobacillus ferrooxidans* dan *Thiobacillus thiooxidans*. Bakteri ini hidup pada lingkungan yang mengandung sulfur, oksigen, dan pH rendah (2-5).



3. Reaksi ketiga adalah hidrolisa besi. Hidrolisa adalah reaksi yang memisahkan molekul air. Pembentukan presipitat ferri hidroksida tergantung pH, yaitu lebih banyak pada pH di atas 3,5.



4. Reaksi keempat adalah oksidasi lanjutan dari pirit oleh besi ferri. Ini adalah reaksi propagasi yang berlangsung sangat cepat dan akan berhenti jika pirit atau besi ferri habis. Agen pengoksidasi dalam reaksi ini adalah besi ferri.



(Kurniawan, 2011)

2.3 Dampak Air Asam Tambang dan Pencegahannya

Air asam tambang yang terbentuk dapat mencemari air permukaan alami dan air tanah, serta menurunkan pH dan meningkatkan unsur terlarut (terutama logam) yang berbahaya bagi lingkungan hidup. Dampak dari air asam tambang tersebut adalah dampak akut dan kronik pada ekosistem akuatik, risiko kesehatan masyarakat, serta kontaminasi horison tumbuh pada area reklamasi sehingga

berdampak pada kegagalan revegetasi, peningkatan erosi, dan isu kestabilan timbunan (Gautama, 2012).

Sekali air asam tambang terbentuk, maka akan sulit untuk menghentikannya. Oleh karena itu, perlu dilakukan upaya pencegahan walaupun pada kenyataannya pencegahan yang ada tidak dapat mencegah secara total terjadinya air asam tambang pada dinding tambang (*pit wall*), di dasar (*pit floor*) atau pada permukaan batuan *overburden*. Yang dimaksud upaya pencegahan dalam hal ini adalah mencegah terbentuknya air asam tambang di daerah penimbunan batuan penutup (*overburden*).

Sumber utama air asam tambang di penambangan batubara adalah batuan penutup (*overburden* dan *interburden*). Oleh karena itu teknik pencegahan pembentukan air asam tambang hanya dapat dicapai dengan mengintegrasikan hasil karakterisasi (model geokimia batuan) dengan perencanaan tambang, perancangan, dan strategi pengelolaan batuan penutup. Model geokimia batuan menjadi pertimbangan dalam perencanaan penggalian (*excavation plan*) sehingga dapat dilakukan pemisahan antara PAF dan NAF dan perencanaan penimbunan (*waste dump plan*).

Metode yang umum diterapkan dalam penimbunan *overburden* adalah enkapsulasi (*encapsulation*) dan pelapisan (*layering*). Prinsip dari metode tersebut adalah dengan menempatkan material PAF dan NAF sedemikian untuk menghindari terjadinya pembentukan air asam tambang. Metode ini berupaya untuk mencegah oksidasi mineral sulfida dan/atau aliran air (Gautama, 2012).

2.4 Karakterisasi Potensi Pembentukan Air Asam Tambang dengan Uji Statik

Metode yang paling sering digunakan untuk menentukan karakteristik pembentukan air asam batuan-AAB (*ARD*) adalah *acid-base account (ABA)* dan *net acid generation (NAG) test*. ABA meliputi pH pasta, total sulfur, *maximum potential acidity*-MPA, *acid neutralizing capacity*-ANC, NAPP. *Acid-base*

account (ABA) terdiri dari prosedur laboratorium statik yang mengevaluasi keseimbangan antara proses pembentukan asam (oksidasi mineral sulfida) dan proses netralisasi asam (pelarutan karbonat alkali, perpindahan *exchangeable bases*, dan pelapukan silika). Metode ABA merupakan prosedur statik karena pengukuran dilakukan hanya satu kali terhadap waktu (Smart, 2002).

2.4.1 pH pasta

Nilai pH pasta menunjukkan sifat keasaman dan salinitas dari material limbah ketika awal terdedah dalam area penempatan *overburden* (Smart, 2002).

2.4.2 Total Sulfur

Pengukuran total S dilakukan dengan menggunakan pembakaran pada suhu tinggi (*high temperatur combustion*). Total S dinyatakan dalam persen berat yang menyatakan kandungan total sulfur di dalam sampel batuan yang meliputi S sulfida (piritik) yang paling reaktif, S organik yang tidak reaktif dan S sulfat yang ditemukan dalam jumlah yang sedikit di dalam sampel batubara (Smart, 2002).

2.4.3 MPA (*Maximum Potential of Acidity*)

MPA yang dihasilkan dari sebuah sampel ditentukan dari kandungan sulfur dalam sampel di mana kandungan sulfur dalam sampel didapat dengan metode pembakaran pada suhu tinggi. Perhitungan mengasumsikan bahwa kandungan sulfur yang terukur terdapat dalam bentuk pirit (FeS_2). Pirit (FeS_2) tersebut bereaksi dalam kondisi oksidasi untuk menghasilkan asam sesuai dengan reaksi:

$$\text{FeS}_2 + \frac{15}{4}\text{O}_2 + \frac{7}{2}\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \quad \dots (2.6)$$

Berdasarkan reaksi tersebut, MPA sampel yang mengandung 1% pirit adalah sebesar 30,6 kilogram H_2SO_4 per ton material. MPA dari sampel dihitung dari kandungan sulfur total menggunakan formula:

$$\text{MPA (kg H}_2\text{SO}_4\text{/t)} = \text{Total \% S} * 30,6 \quad \dots (2.7)$$

2.4.4 ANC (*Acid Neutralising Capacity*)

Beberapa asam yang terbentuk dalam oksidasi pirit akan bereaksi dengan mineral penetral asam yang terkandung dalam sampel. Penyangga asam ini terukur dalam istilah ANC. ANC secara umum ditentukan dengan modifikasi metode Sobek. Metode ini mencakup penambahan HCl ke dalam sampel yang telah ditimbang, dan membiarkan sampel bereaksi (dengan pemanasan) dan titrasi balik campuran menggunakan NaOH untuk menentukan jumlah HCl yang tidak bereaksi. Jumlah asam yang dikonsumsi dalam reaksi sampel kemudian dihitung dengan satuan unit yang sama dengan MPA, yakni kg H₂SO₄ (Smart, 2002).

2.4.5 NAPP (*Net Acid Producing Potential*)

NAPP menunjukkan keseimbangan antara kapasitas sampel untuk menghasilkan asam (MPA) dan kapasitas untuk menetralkan asam (ANC). NAPP dinyatakan dalam unit kg H₂SO₄/t dan dihitung sebagai berikut:

$$\text{NAPP} = \text{MPA} - \text{ANC} \quad \dots (2.8)$$

Apabila nilai MPA kurang daripada ANC, sehingga nilai NAPP negatif, maka sampel kemungkinan memiliki ANC yang cukup untuk mencegah pembentukan asam. Sebaliknya, apabila nilai MPA melebihi nilai ANC, yang kemudian NAPP positif, maka mengindikasikan material dapat membentuk asam (Smart, 2002).

2.4.6 Rasio ANC/MPA

Rasio ANC/MPA sering digunakan sebagai cara untuk menilai risiko pembentukan asam yang berasal dari material limbah pertambangan. NAPP yang positif sama dengan rasio ANC/MPA kurang dari 1, dan negatif NAPP sama dengan rasio ANC/MPA lebih dari 1. Nilai NAPP nol sama dengan rasio ANC/MPA 1.

Tujuan dari rasio ANC/MPA adalah untuk mengindikasikan batas relatif keamanan dalam material. Nilai keamanan dalam mencegah pembentukan asam

tersebut berkisar antara 1 hingga 3. Pada umumnya, rasio ANC/MPA sebesar 2 atau lebih secara umum menandakan bahwa besar kemungkinan material tersebut mempertahankan nilai pH yang netral.

2.5 Karakterisasi Potensi Pembentukan Air Asam Tambang dengan NAG Test

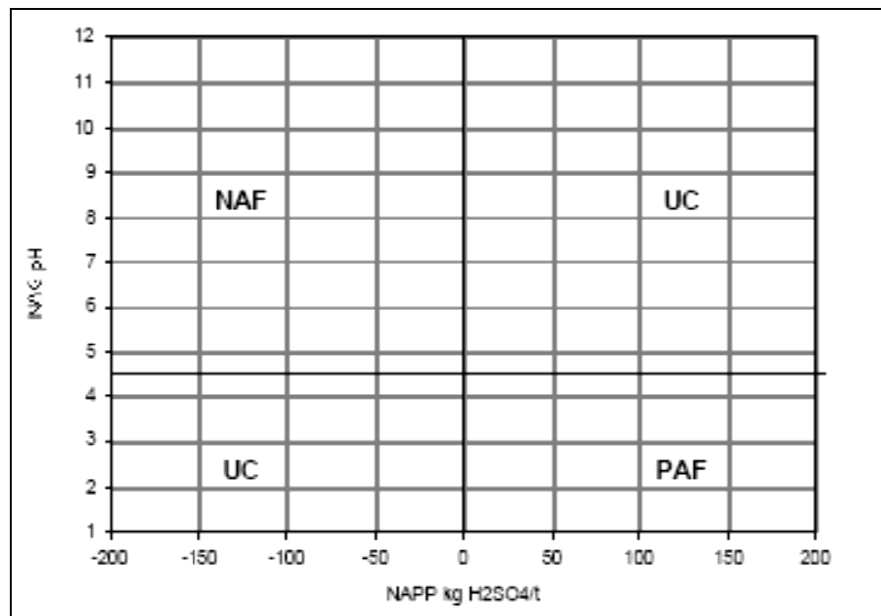
NAG test meliputi reaksi sampel dengan hidrogen peroksida untuk mengoksidasi secara cepat mineral sulfida yang terkandung dalam sampel. Selama *NAG test*, reaksi pembentukan asam dan penetralan asam berlangsung secara menerus. Oleh karena itu hasil akhir menunjukkan pengukuran langsung asam bersih yang dihasilkan oleh sampel. Harga yang didapat merupakan kapasitas NAG dan dinyatakan dalam unit $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{t}$.

Single addition NAG test digunakan dalam hubungannya dengan NAPP untuk mengklasifikasikan potensi pembentukan asam oleh suatu sampel. *Single addition NAG test* mungkin tidak dapat diandalkan dalam menggambarkan potensi pembentukan asam sampel bersulfida (>1%) dengan kandungan mineral penetral yang tinggi, yang secara langsung menetralkan. Karena oksidasi sulfida terjadi secara parsial dalam sampel tersebut, maka beberapa asam yang dilepaskan akan bereaksi secara cepat dengan kapasitas penetral untuk memproduksi larutan NAG ber-pH netral hingga basa.

2.6 Klasifikasi Geokimia Batuan

Batuan dapat diklasifikasikan sebagai PAF ataupun NAF berdasarkan nilai NAGpH, NAPP, ataupun rasio ANC/MPA seperti yang dijelaskan sebelumnya. Selain itu, potensi pembentukan asam dapat diklasifikasikan ke dalam S, ANC, NAPP, dan NAG test yang menghasilkan kategori *non-acid forming* (NAF), *potentially acid forming* (PAF), *uncertain* (UC). Gambar 2.2 menunjukkan grafik klasifikasi yang biasa digunakan untuk penyajian data

geokimia. Area grafik yang ditandai merupakan kuadran yang menunjukkan klasifikasi NAF, PAF, dan UC.



Gambar 2.1 Klasifikasi Geokimia
(Smart, 2002)

Berikut adalah keterangan dari masing-masing klasifikasi:

1. *Non-Acid Forming (NAF)*

Sampel yang diklasifikasikan sebagai NAF dapat saja memiliki kandungan sulfur yang signifikan akan tetapi ketersediaan ANC dalam sampel tersebut cukup banyak untuk menetralkan seluruh asam yang secara teoritis dihasilkan oleh mineral sulfida yang terkandung. Suatu sampel dinyatakan NAF apabila memiliki NAPP negatif dan NAGpH akhir 4,5. Apabila dalam sampel terdapat total S >1%, maka diperlukan penelitian lebih untuk mengkonfirmasi bahwa ANC yang terukur ada dalam laju yang sama dengan produksi asam melalui oksidasi sulfur.

2. *Potentially Acid Forming (PAF)*

Sampel yang diklasifikasikan sebagai PAF selalu memiliki kandungan sulfur yang signifikan, potensi pembentukan asam yang melebihi kapasitas penetral asam material. Suatu sampel biasanya dinyatakan sebagai PAF ketika sampel tersebut memiliki NAPP positif dan nilai NAGpH akhir <4,5.

3. *Uncertain (UC)*

Klasifikasi *uncertain (UC)* digunakan apabila terdapat konflik antara hasil NAPP dan NAG. Sampel dengan kandungan material organik tinggi juga diklasifikasikan *uncertain (UC)* karena keasaman larutan NAG lebih menggambarkan keasaman organik, dibandingkan dengan keasaman sulfida. Sampel *uncertain* membutuhkan penelitian lebih detail untuk menentukan potensi asam (Smart, 2002).

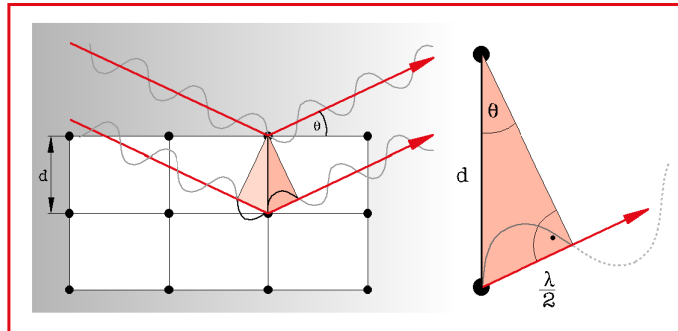
2.7 Identifikasi Mineral dalam Batuan dengan Uji XRD

Salah satu kegunaan *X-Ray Diffraction (XRD)* adalah mengidentifikasi unsur atau senyawa (fase kristalin) secara kualitatif dan kuantitatif (Program Studi Teknik Material ITB, 2009). Pola yang dihasilkan dari penghamburan dan difraksi digunakan untuk mengetahui susunan partikel pada kisi padat (Chang, 2007).

Difraksi ini terjadi karena adanya penghamburan sinar X oleh atom pada 2 bidang paralel. Proses ini diawali dengan adanya sinar datang dalam sebuah fase (maksimum dan minimum pada posisi yang sama). Gelombang paling atas dihamburkan atau direfleksikan oleh atom pada lapisan pertama, sementara itu gelombang pada bagian bawah dihamburkan oleh atom pada lapisan kedua (Gambar 2.3). Agar gelombang yang dihamburkan ini menjadi dalam fase lagi, maka jarak tempuh gelombang pada bagian bawah merupakan integral dari perkalian panjang gelombang (λ) sinar X dalam persamaan Bragg berikut (Chang, 2007):

$$n\lambda = 2 d \sin \theta \quad \dots (2.9)$$

di mana: n = orde refleksi (1,2,3,...)
 λ = panjang gelombang sinar X
 d = jarak ineterplanar
 θ = setengah dari sudut difraksi



Gambar 2.2 Refleksi Sinar X pada Dua Lapisan Atom pada Hukum Bragg (Bruker AXS, 2001)

2.8 Uji Kinetik

Prosedur uji kinetik didesain untuk mempercepat proses pelapukan sehingga dapat memberikan informasi mengenai konsumsi dan produksi asam. Perbedaan dari keenam metode uji kinetik yang akan dijabarkan berada pada jumlah sampel yang digunakan dalam pengujian, ukuran partikel sampel, kondisi pengujian (laboratorium atau lapangan), dan durasi pengujian (USEPA, 2003). Beberapa jenis uji kinetik yang sering digunakan adalah sebagai berikut:

2.8.1 *Humidity Cell Tests*

Conventional humidity cell (Sobek et. al., 1978) merupakan uji yang menggunakan sampel dalam jumlah sedikit (200-300 gram), dengan ukuran partikel lebih kecil dari 2 mm. Sampel diletakkan di dalam kotak plastik tertutup dan udara kering dialirkan ke dalam sampel selama 3 hari, diikuti dengan udara basah selama 3 hari. Setiap hari ketujuh, sampel disiram dengan air dalam jumlah tertentu. Parameter air lindian yang diukur meliputi sulfat, pH, asiditas, alkalinitas, konduktivitas elektrik. Durasi pengujian selama 20 minggu biasa digunakan dalam industri pertambangan (USEPA, 2003).

2.8.2 *SRK Humidity Cells Tests*

Broughton dan Robertson (1992) menyajikan *SRK modified humidity cells* yang didesain untuk menguji sampel batuan *overburden* dengan ukuran kasar

yakni berukuran kurang dari 10 cm yang ditempatkan ke dalam *cylindrical column* berdiameter 30 cm dan tinggi 45 cm. Udara lembab disirkulasikan secara konstan ke dalam *cell*. Air untuk *flushing* ditempatkan pada beberapa titik sepanjang permukaan atas sampel batuan agar meresap ke bawah dengan jalan yang berbeda. *Cell* dapat ditumpuk agar air lindi dari sebuah *cell* dapat digunakan sebagai air *flushing* pada *cell* di bawahnya.

2.8.3 Soxhlet Extraction Tests

Uji ini mensimulasikan pelapukan geokimia pada sampel dengan peralatan khusus, yaitu peralatan ekstraksi soxhlet (Mutia, 2009). Reaktor soxhlet meresirkulasikan air ataupun cairan lainnya ke dalam sampel untuk mensimulasikan pelapukan (USEPA, 2003). Metode Sullivan dan Sobek (1982) menggunakan air destilasi pada suhu 25°C untuk melindi sampel dengan periode 6 minggu, walaupun durasi pengujian dapat bervariasi.

2.8.4 Leach Column Tests

Belum ada standar pada prosedur *column test*, sehingga terdapat fleksibilitas yang tinggi dalam pengujian, yakni skala desain *column*, karakteristik pengujian material, dan laju aliran (Mills, 1998c). Menurut Smart (2002), *Leach Column Tests* menggunakan sampel batuan yang dihancurkan atau *tailing* sebesar 2-3 kg. Uji ini meliputi siklus basah dan siklus kering untuk mendorong terjadinya proses oksidasi dan penyiraman (*flushing*) pada produk oksidasi. Air lindi kemudian dikumpulkan dan dianalisa dengan beberapa parameter untuk mengetahui reaktivitas sulfida, kinetika oksidasi, kelarutan logam, dan perilaku lindi pada material. Sampel batuan yang telah mengalami pelindi kemudian diuji secara geokimia dan mineralogi untuk mengetahui perubahan terhadap waktu pada unsur utamanya. Periode *leach column tests* bervariasi, bergantung pada karakteristik material dan investigasi yang dibutuhkan. Biasanya uji ini dilakukan selama 6 bulan. *Free draining leach column test* (FDLCT) paling sering digunakan, walaupun variasi metode dibutuhkan untuk tujuan yang spesifik.

2.8.5 Shake Flask Extractions

Shake flask tests menggunakan sampel bubuk yang telah ditambahkan air destilasi (aquades) dan dapat ditambahkan diinokulasikan dengan bakteri. *Flask* kemudian ditutup dan ditempatkan pada *shaker* untuk selanjutnya digetarkan selama beberapa hari hingga berminggu-minggu. Sampel kemudian diambil secara periodik dan diperiksa untuk mengetahui kandungan sulfat, pH, dan parameter kualitas air lainnya. (Sobek et. al., 1978).

2.8.6 Field Tests

Field lysimeter test merupakan sebuah uji yang menggunakan kuantitas sampel yang bervariasi, mulai dari skala *barrel* hingga *pile*. Uji ini dilakukan untuk jangka panjang pada kondisi cuaca alami. Dalam kasus di mana sampel memiliki potensi penetralan asam yang kecil hingga sedang, durasi pengujian yang panjang dibutuhkan untuk mengatasi efek netralisasi dan periode lag yang mendahului oksidasi bakteri (Lapakko, 1991).

2.9 Kualitas Air Lindian dari Uji Kinetika Berdasarkan Parameter pH, Temperatur, TDS, DHL, ORP

2.9.1 pH

Parameter pH menyatakan keasaman air lindian di mana menunjukkan banyaknya ion H^+ di dalam air lindian. Semakin banyak ion H^+ , maka semakin rendah pH dan air bersifat asam (Irsyad, 2007) karena:

$$pH = -\log[H^+] \quad \dots (2.10)$$

2.9.2 Temperatur

Parameter temperatur merupakan parameter fisik yang penting dalam menunjang biota air apabila nantinya air lindian memasuki badan air.

2.9.3 Total Padatan Terlarut (*Total Dissolved Solid-TDS*)

Berdasarkan Standard Method (1998), total padatan terlarut adalah banyaknya padatan terlarut dalam air yang melewati kertas saring dengan ukuran pori 2 µm atau kurang.

2.9.4 Daya Hantar Listrik (Konduktivitas)

Daya hantar listrik atau konduktivitas elektrik adalah kemampuan air untuk menghantar arus listrik karena adanya mineral yang terlarut dalam air yang terionisasi. Data konduktivitas sering dihubungkan dengan kadar zat terlarut (*total dissolved solid-TDS*) dengan persamaan berikut (Irsyad, 2007):

$$\text{TDS (mg/l)} = (k=0,5 \text{ hingga } 0,75) \times \text{konduktivitas } (\mu\text{S/cm}) \quad \dots (2.11)$$

2.9.5 ORP (*Oxidation Reduction Potential*)

Potensial reduksi oksidasi (*oxidation reduction potential-ORP*) atau biasa disebut potensial redoks (*redox potential*, Eh) merupakan sebuah pengukuran yang menunjukkan bagaimana reduksi atau oksidasi dalam sebuah sistem tertentu ataupun lingkungan untuk mengoksidasi atau mereduksi spesies kimia. ORP terkait dengan konsentrasi elektron dalam sebuah sistem, semakin negatif nilai ORP maka semakin mudah mereduksi (William, 2008).

2.10 Kualitas Air Lindian dari Uji Kinetika Berdasarkan Parameter Logam, Asiditas, Alkalinitas

2.10.1 Asiditas-Alkalinitas

Asiditas adalah kemampuan air untuk menetralkan larutan basa sedangkan alkalinitas adalah kemampuan air untuk menetralkan larutan asam. Asiditas metil orange adalah banyaknya basa yang ditambahkan untuk menetralkan asam dalam air (H^+) sampai pH air mencapai 4,3. Sedangkan

asiditas total atau asiditas fenolftalin (*phenol phtalin acidity-pp*) adalah banyaknya basa untuk menetralkan asiditas dalam air sampai pH= 8,3.

Alkalinitas fenolftalin adalah banyaknya asam yang harus ditambahkan ke dalam air sampai pH 8,3. Sedangkan pengertian alkalinitas total adalah alkalinitas yang disebabkan oleh bikarbonat, karbonat, dan hidroksi yang menunjukkan banyaknya asam yang dibutuhkan untuk menetralkan asam sampai pHnya mencapai 4,3 (Irsyad, 2007).

2.10.2 Sulfat

Sulfat (SO_4^{2-}) merupakan produk dari reaksi oksidasi *pirit* (Skouse, 1996). Sulfat memiliki valensi -2 (Day, 2003). Keterdapatannya sulfur dalam lingkungan dipengaruhi oleh nilai potensial reduksi oksidasi (ORP) atau Eh.

2.10.3 Besi

Bentuk besi di dalam air dalam bentuk valensi +2 dan +3 tergantung kepada pH dan kondisi potensial redoks di dalam air (Irsyad, 2007). Pada nilai Eh rendah dan kondisi asam hingga pH basa, besi terdapat dalam kondisi oksidasi +2 yakni ion Fe^{2+} heksaaqua $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$. Pada nilai Eh tinggi dan sedikit asam hingga pH sangat basa, besi dalam keadaan kondisi oksidasi +3 dalam bentuk endapan besi hidroksida, $\text{FeO}(\text{OH})$ yang seringkali ditulis $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Selain dua bentuk kestabilan ini, terdapat spesies lain yakni besi(III) dalam bentuk terlarut, yakni $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ atau $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^{2+}$, dan spesies besi(II) dalam bentuk terlarut FeCO_3 dan $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (Duke, 2008).

2.10.4 Kalsium

Kalsium (Ca) merupakan unsur yang memiliki nomor atom 20 dan bermassa atom 40,08. Kalsium terdapat di alam sebesar 3,4%, dan biasanya dalam bentuk kapur, kalsit, chalk, dan marbel sebagai CaCO_3 , terdapat dalam bentuk dolomit sebagai $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, dalam bentuk gipsium sebagai

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, dalam bentuk *fluorite* sebagai CaF_2 . Kalsium memiliki bilangan oksidasi +2 (Chang, 2007).

2.10.5 Magnesium

Magnesium (Mg) adalah unsur yang memiliki nomor atom 12, dan bermassa atom 24,31, berada pada golongan alkali tanah (2A) dan memiliki bilangan oksidasi +2. Dalam bentuk hidroksidanya, magnesium merupakan basa kuat (Chang, 2007).

2.10.6 Mangan

Mangan (Mn) adalah salah satu unsur yang memiliki nomor atom 25, dan bermassa atom 54,94, memiliki bilangan oksidasi +7, +6, +4, +3, +2 (Chang, 2007). Mangan di dalam tanah kebanyakan dalam bentuk mangan dioksida (MnO_2) yang bervalensi +4, dan sukar larut dalam air. Dalam kondisi anaerobik (elektrode potensial redoks negatif), maka MnO_2 tersebut dapat direduksi menjadi Mn^{2+} yang larut di dalam air (Irsyad, 2007).

2.10.7 Aluminium

Aluminium (Al) adalah salah satu unsur yang memiliki nomor atom 13 bermassa atom 26,98, memiliki bilangan oksidasi +3. Aluminium (Al) terdapat melimpah di alam, yakni berada pada kerak bumi sebesar 7,5%. Bentuk hidroksida aluminium dapat bereaksi dengan asam ataupun dengan basa (Chang, 2007).