

Karakterisasi Pembentukan Air Asam Tambang Pada Endapan Batubara Formasi Warukin Kalimantan Selatan

Muhammad Fardha Zakhyar¹, Rizky Syaputra², Friska Agustin³, Andyono Broto Santoso⁴, Rian Andriansyah⁵, Icha Nur Khasanah⁶, Afifah Faiza Zahwa⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik dan Desain, Institut Teknologi Sains Bandung

¹mzakhyar@gmail.com, ²rizky.syaputra@itsb.ac.id, ³friskaagustin@itsb.ac.id, ⁴ab.santoso@itsb.ac.id, ⁵rian@itsb.ac.id, ⁶ichanurkhasanah06@gmail.com, ⁷zahwa.1124@gmail.com,

Abstrak

Aktivitas tambang terbuka dalam penambangan batubara di Indonesia sering dikaitkan dengan munculnya dampak lingkungan. Dampak lingkungan tersebut antara lain munculnya air asam tambang. Demi meminimalisir hal tersebut, perlu dilakukan antisipasi dengan mengidentifikasi batuan yang berpotensi membentuk asam dan menginterpretasikan daerah pengaruhnya. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis geokimia menggunakan uji statik untuk mengetahui potensi pembentukan asam berdasarkan SNI 6597:2011. Analisis geokimia berperan untuk mengetahui batuan *potential acid forming* (PAF) dan *non-acid forming* (NAF) pada Formasi Warukin Kalimantan Selatan yang diambil dari berbagai litologi seperti *sandstone*, *mudstone*, dan *shalestone*. Berdasarkan hasil pengujian geokimia pada litologi batuan yang sama terkadang memiliki potensi pembentukan air asam tambang yang berbeda. Hal ini dipengaruhi oleh intensitas pelapukan yang disebabkan oleh kondisi iklim dan topografi yang relatif datar serta kemiringan lereng yang relatif lebih landai. Sehingga, upaya mitigasi pembentukan air asam tambang dapat dilakukan dengan mengetahui karakteristik batuan yang mengandung mineral sulfida dan mengalami kontak dengan udara serta air. Upaya pencegahan dapat dilakukan dengan melakukan perancangan yang baik terhadap kemiringan lereng. Sehingga dapat meminimalisir terjadinya erosi dan terbentuknya genangan air, serta dapat mencegah terjadinya pembentukan air asam tambang sebagai usaha penanggulangan dampak lingkungan tidak semakin meluas.

Article History:

Received 29 January 2024

Revised 28 February 2024

Accepted 19 March 2024

Available online 15 Mei 2024

Kata Kunci : Air Asam Tambang, Analisis Geokimia, Dampak Lingkungan

Abstract

Open-pit mining activities in coal mining in Indonesia are often associated with environmental impacts. These environmental impacts include the emergence of acid mine drainage. In order to minimize this, it is necessary to anticipate by identifying rocks that have the potential to form acid and interpreting the area of influence. The method used in this research is geochemical analysis using static tests to determine the potential for acid formation based on SNI 6597: 2011. Geochemical analysis plays a role to determine potential acid forming (PAF) and non-acid forming (NAF) rocks in the Warukin Formation of South Kalimantan taken from various lithologies such as sandstone, mudstone, and shalestone. Based on the results of geochemical testing on the same rock lithology sometimes has different potential for acid mine drainage formation. This is influenced by the intensity of weathering caused by climatic conditions and relatively flat topography and relatively gentle slopes. Thus, efforts to mitigate the formation of acid mine drainage can be done by knowing the characteristics of rocks that contain sulfide minerals and come into contact with air and water. Prevention efforts can be done by doing a good design of the slope. So that it can minimize the occurrence of erosion and the formation of puddles, and can prevent the formation of acid mine drainage as an effort to mitigate environmental impacts from becoming more widespread.

Keywords : Acid Mine Drainage, Geochemical Analysis, The Environmental Impact

1. Pendahuluan

Batubara merupakan komoditas utama yang dimiliki oleh negara Indonesia, terutama menjadi komoditas andalan untuk menyuplai kebutuhan energi dalam dan luar negeri, serta sebagai sumber pemasukan dalam bentuk devisa negara (Syaputra dkk., 2024). Sektor pertambangan memiliki peranan yang cukup penting dalam mendorong pengembangan wilayah, terutama dalam analisis pertumbuhan ekonomi yang digunakan untuk menentukan keberhasilan pembangunan yang telah dicapai disuatu daerah (Syaputra, Santoso, dkk., 2023). Umumnya operasi penambangan di Indonesia menggunakan sistem metode tambang terbuka. Metode tambang terbuka lebih mengacu kepada proses pemindahan material penutup untuk diambil batubara yang ada di dalamnya. Metode ini sangat menguntungkan, karena memiliki operasional yang rendah dan diiringi oleh tingkat produksi yang lebih tinggi. Namun terdapat kerugian yang disebabkan oleh penggunaan metode ini, yaitu terdapatnya permasalahan atau gangguan terhadap lingkungan hidup (Chang-sheng dkk., 2009).

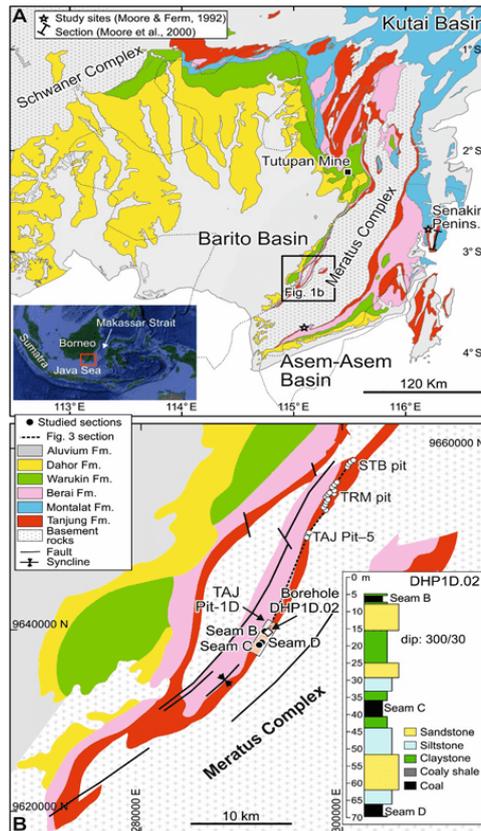
Saat ini permasalahan lingkungan hidup pada kegiatan pertambangan sering menjadi sorotan masyarakat. Salah satu permasalahan yang sering muncul dalam penambangan batubara adalah air asam tambang (AAT). Karena pada material penutup dapat mengandung mineral sulfida terutama dalam bentuk pirit, sehingga apabila terkena udara dan air akan menghasilkan air yang bersifat asam (Agustin dkk., 2020). Terbentuknya AAT akan berdampak pada ekosistem yang mempengaruhi kualitas air dan konsentrasi sulfat, besi, dan logam terlarut yang tinggi (Vriens dkk., 2019), (Prihartini dkk., 2022). AAT merupakan fenomena yang sangat bergantung pada waktu yang proses pembentukannya dikendalikan oleh beberapa faktor seperti derajat keasaman, komposisi mineralogi, kondisi iklim, dan distribusi ukuran partikel (Syaputra, Kusuma, dkk., 2023).

Pelaku industri pertambangan batubara atau mineral perlu mempersiapkan sejak dini mitigasi preventif dari masalah lingkungan yang akan ditimbulkan oleh kegiatan penambangan. Langkah awal yang perlu dilakukan adalah mengetahui karakteristik geokimia batuan sebagai upaya prediksi potensi pembentukan AAT. Karakteristik ini dapat diketahui melalui uji statik laboratorium. Pembentukan AAT dapat dicegah dengan mengkarakterisasi potensi dari material yang menghasilkan asam menggunakan uji *Net Acid Generating* (Oh dkk., 2017). Pengujian ini akan menghasilkan klasifikasi material atau batuan pembentuk asam atau *potential acid forming* (PAF) dan tidak berpotensi membentuk asam atau *non-acid forming* (NAF). Sehingga, pengelolaan dapat dilakukan dengan baik dan efisien.

2. Bahan dan Metode

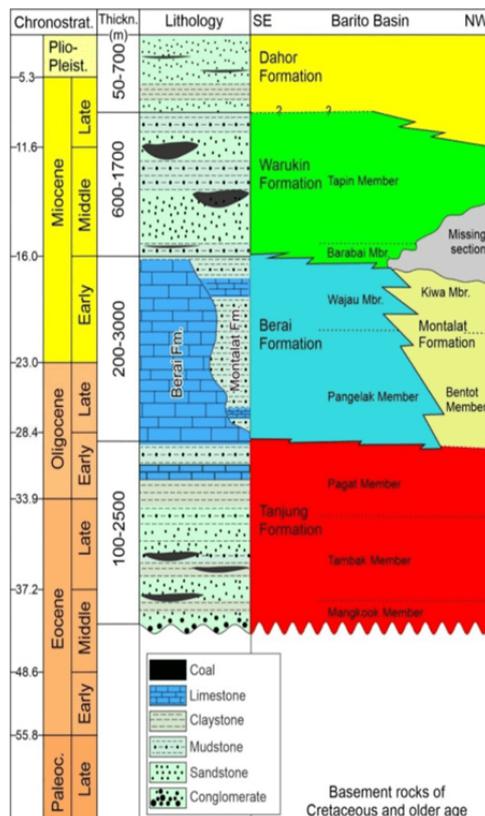
Daerah penelitian terletak pada salah satu kawasan di Kalimantan Selatan yang termasuk ke dalam Cekungan Barito dan Cekungan Asem-Asem (Gambar 1). Umumnya memiliki ciri-ciri stratigrafi yang relatif sama dari tua ke muda. Cekungan ini dipisahkan oleh Pegunungan Maratus. Di sebelah utara berbatasan dengan Cekungan Kutai yang dipisahkan oleh Sesar Andang. Sementara bagian baratnya dibatasi oleh Paparan Sunda. Mulanya Cekungan Barito dan Asem-Asem menjadi cekungan yang sama, namun sejak Miosen Awal Pegunungan Meratus yang terangkat dan menyebabkan terpisahnya kedua cekungan tersebut (Agustin dkk., 2020).

Stratigrafi di Kalimantan Selatan meliputi beberapa formasi yang memiliki batuan dasar berupa batuan malihan. Formasi Tanjung, Formasi Berai, Formasi Warukin, serta Formasi Dahor dan Endapan Aluvial dengan umur Eosen hingga Pliosen pada Gambar 2 (Fikri dkk., 2022). Formasi Warukin diendapkan pada Formasi Berai yang tersusun atas sisipan batulempung, batupasir, dan batubara berwarna abu-abu. Bagian bawah formasi batuan ini terdiri dari dominasi batulempung berwarna abu-abu hingga kehitaman dengan sisipan batupasir berkadar halus hingga sedang dengan struktur sedimen laminasi paralel dari material karbon (Agustin dkk., 2020). Batubara yang terdapat di daerah penelitian mempunyai peringkat lignit dengan warna hitam yang lunak memiliki kadar air tinggi, kadar debu rendah dan kandungan kalori rendah. Lapisan batubara ini berpotongan dengan batulempung berwarna abu-abu, tebal 0,5 hingga 1,0 m dan batupasir berbutir sedang, terbagi baik, tebal 0,5 – 2,0 m (Fikri dkk., 2022).



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

Sumber: (Fikri dkk., 2022)



Gambar 2. Peta lokasi penelitian

Sumber: (Fikri dkk., 2022)

Penentuan kemampuan suatu percontohan dalam memproduksi dan menetralkan asam secara kuantitatif menggunakan uji statik (SNI 6597, 2011). Uji statik dilakukan relatif cepat (*single measurement in time*) (Syaputra, Kusuma, dkk., 2023). Pengujian statik meliputi pengujian pH pasta, pembentukan asam bersih atau *net acid generating* (NAG) dan neraca asam-basa atau *acid-base accounting* (ABA) (Syaputra, Kusuma, dkk., 2023), (SNI 6597, 2011), (Smart dkk., 2002).

a. pH Pasta

pH pasta mengindikasikan jumlah oksidasi alami yang telah terjadi pada sampel batuan. Uji ini dilakukan dengan mencampurkan bubuk sampel dengan air destilat dan kemudian diukur nilai pH-nya. pH pasta ini menunjukkan interaksi keasaman dan alkalinitas material pada saat awal material tersebut tersingkap dan bereaksi dengan air

b. Net Acid Generating

Pembentukan asam bersih atau *net acid generating* adalah uji untuk mengklasifikasikan potensi pembentuk asam dari batuan. Uji ini memberikan gambaran mengenai kereaktifan kandungan sulfida. Dalam proses pengujiannya, hidrogen peroksida akan ditambahkan ke sampel untuk mengoksidasi secara cepat sulfida yang reaktif. Hasil uji NAG akan mengkonfirmasi bahwa sulfida dalam batuan reaktif dan titrasi dari larutan terakhir memberikan nilai asam sisa yang masih tinggal pada sampel setelah semua pembentukan asam dan penetralan asam terjadi.

c. Acid-Base Accounting

Metode yang digunakan untuk mengevaluasi keseimbangan antara proses pembentukan asam (oksidasi mineral sulfida) dan proses penetralan asam (disolusi karbonat alkalin, perpindahan basis yang dapat berubah, dan pelapukan silikat). Neraca asam-basa atau *acid-base accounting* (ABA) merupakan prosedur untuk mengestimasi pembentukan asam melalui penentuan secara independen material yang dapat membangkitkan dan menetralkan asam.

3. Hasil dan Pembahasan

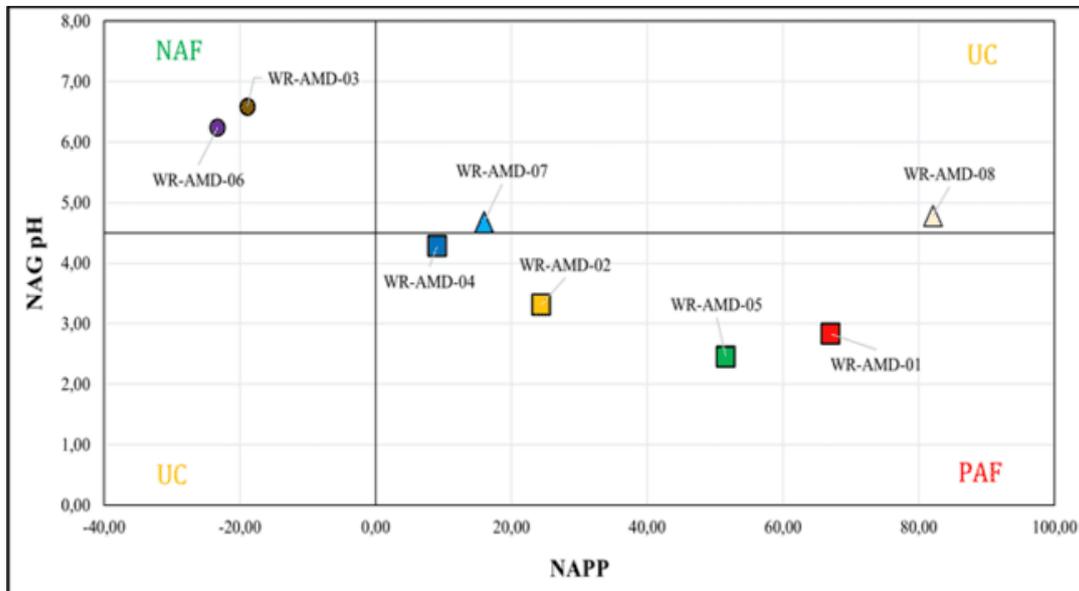
Karakterisasi geokimia pada daerah penelitian dilakukan berdasarkan hasil pengujian geokimia. Hasil pengujian geokimia menggunakan uji statik dapat dilihat pada Tabel 1. Berdasarkan hasil uji pH pasta yang digunakan berkisar antara 2,55 (WR-AMD-01) hingga 7,89 (WR-AMD-04). Total sulfur yang terdapat pada sampel berkisar antara 0,16 % (WR-AMD-06) hingga 2,86 % (WR-AMD-08). Sampel-sampel tersebut akan memiliki nilai maksimum pembentukan asam atau *maximum potential acidity* (MPA) sebesar 4,90 kg H₂SO₄/t (WR-AMD-06) hingga 87,59 kg H₂SO₄/t (WR-AMD-08). Pada beberapa sampel juga terdapat kapasitas penetral asam atau *acid neutralising capacity* (ANC) sebesar 5,50 kg H₂SO₄/t (WR-AMD-08). hingga 28,20 kg H₂SO₄/t (WR-AMD-06).

Tabel 1. Karakteristik geokimia

| No | Kode Sampel | pH pasta | NAG pH | Acid-Base Accounting | | | |
|----|-------------|----------|--------|----------------------|--|--|---|
| | | | | Total Sulfur (%) | MPA (kg H ₂ SO ₄ /t) | ANC (kg H ₂ SO ₄ /t) | NAPP (kg H ₂ SO ₄ /t) |
| 1 | WR-AMD-01 | 2,55 | 2,83 | 2,55 | 78,09 | 11,10 | 66,99 |
| 2 | WR-AMD-02 | 5,77 | 3,31 | 1,15 | 35,22 | 10,80 | 24,42 |
| 3 | WR-AMD-03 | 6,36 | 6,58 | 0,23 | 7,04 | 25,90 | -18,86 |
| 4 | WR-AMD-04 | 7,89 | 4,28 | 0,93 | 28,48 | 19,40 | 9,08 |
| 5 | WR-AMD-05 | 5,20 | 2,45 | 1,87 | 57,27 | 5,70 | 51,57 |
| 6 | WR-AMD-06 | 7,68 | 6,24 | 0,16 | 4,90 | 28,20 | -23,30 |
| 7 | WR-AMD-07 | 6,45 | 4,68 | 0,96 | 29,40 | 13,40 | 16,00 |
| 8 | WR-AMD-08 | 6,99 | 4,78 | 2,86 | 87,59 | 5,50 | 82,09 |

Klasifikasi yang dilakukan berdasarkan uji statik dikelompokkan menjadi tiga, yaitu berpotensi membentuk asam atau *potentially acid forming* (PAF), tidak membentuk asam atau *non-acid forming* (NAF), dan tidak menentu atau *uncertain* (UC). Hasil pengujian parameter klasifikasi batuan diperoleh untuk menentukan hasil kriteria yang diuji. Kriteria PAF jika nilai NAPP ≥ 0 dan NAG pH ≤ 4,5. Kriteria NAF jika nilai NAPP ≤ 0 dan NAG pH ≥ 4,5. Dan kriteria UC jika nilai NAPP bernilai positif

dan NAG pH > 4,5 atau NAPP bernilai negatif dan memiliki pH NAG pH < 4,5 (Smart dkk., 2002). Berdasarkan klasifikasi tersebut, maka dapat dikelompokkan sampel pada lokasi penelitian. Sampel dengan kriteria yang tidak membentuk asam (NAF) adalah WR-AMD-03 dan WR-AMD-06. Kriteria membentuk asam (PAF) adalah sampel WR-AMD-01, WR-AMD-02, WR-AMD-04, dan WR-AMD-05. Dan kriteria tidak menentu (UC) adalah sampel WR-AMD-07 dan WR-AMD-08 yang disajikan pada Gambar 3 dan Tabel 2.



Gambar 3. Klasifikasi geokimia sampel berdasarkan potensi pembentukan air asam tambang

Tabel 2. Klasifikasi geokimia potensi pembentukan air asam tambang

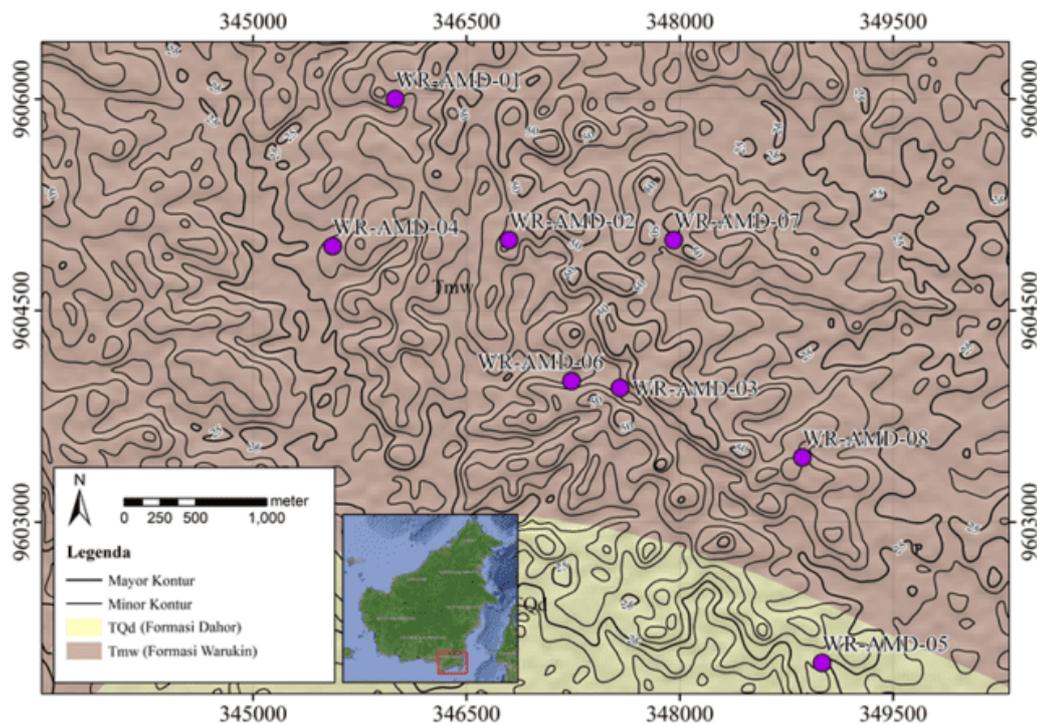
| No | Kode Sampel | NAPP (Kg H ₂ SO ₄ /t) | NAG pH | Amira (2012) | SNI 6597 (2011) | Litologi |
|----|-------------|--|--------|-----------------|--------------------|------------|
| 1 | WR-AMD-01 | 66,99 | 2,83 | PAF | PAF MC | Sandstone |
| 2 | WR-AMD-02 | 24,42 | 3,31 | PAF | PAF MC | Sandstone |
| 3 | WR-AMD-03 | -18,86 | 6,58 | NAF | NAF | Shalestone |
| 4 | WR-AMD-04 | 9,08 | 4,28 | PAF | PAF LC | Mudstone |
| 5 | WR-AMD-05 | 51,57 | 2,45 | PAF | PAF HC | Sandstone |
| 6 | WR-AMD-06 | -23,30 | 6,24 | NAF | NAF | Shalestone |
| 7 | WR-AMD-07 | 16,00 | 4,68 | UC | NAF | Shalestone |
| 8 | WR-AMD-08 | 82,09 | 4,78 | UC | NAF | Shalestone |

Klasifikasi geokimia potensi pembentuk asam air asam tambang berdasarkan SNI 6597 tahun 2011 digolongkan menjadi empat, yaitu tidak membentuk asam *non-acid forming* (NAF), berpotensi membentuk asam berkapasitas rendah atau *potentially acid forming low capacity* (PAF LC), berpotensi membentuk asam berkapasitas sedang atau *potentially acid forming moderate capacity* (PAF MC), dan berpotensi membentuk asam perkapasitas tinggi atau *potentially acid forming high capacity* (PAF HC). Apabila nilai NAG pH \geq 4,5 maka termasuk golongan NAF. Apabila nilai NAG pH < 4,5 maka termasuk golongan PAF LC. Apabila nilai NAG pH < 3,5 maka termasuk golongan PAF MC. Dan apabila nilai NAG pH < 2,5 maka termasuk golongan PAF HC (SNI 6597, 2011). Hasil klasifikasi terhadap sampel dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan klasifikasi tersebut, sampel yang termasuk golongan NAF adalah WR-AMD-03, WR-AMD-06, WR-AMD-07, dan WR-AMD-08. Sampel yang termasuk golongan PAF LC adalah WR-AMD-04. Sampel yang termasuk golongan PAF MC adalah WR-AMD-01 dan WR-AMD-02. Serta sampel yang termasuk golongan PAF HC adalah WR-AMD-05.

Potensi pembentukan AAT juga dapat dipengaruhi oleh topografi, litologi, serta kemiringan lereng (*slope*). Topografi pada daerah penelitian relatif datar dengan ketinggian 20 – 50 mdpl seperti yang disajikan pada Gambar 4. Kondisi topografi yang relatif datar dapat memperlambat aliran air permukaan sehingga berpotensi menimbulkan genangan secara langsung maupun berkala. Genangan tersebut dapat memudahkan proses infiltrasi air ke dalam tanah. Kegiatan penambangan terbuka pada daerah yang memiliki topografi datar dan homogen dapat mengubah bentuk lahan menjadi lebih heterogen, misalnya munculnya timbunan *overburden* serta *tailing* yang dapat memicu pembentukan AAT (Fitrah, 2019).

Daerah penelitian berada pada Formasi Warukin dan Formasi Dahor (Gambar 4). Tabel 2 menunjukkan litologi terhadap sampel penelitian. Sampel penelitian memiliki litologi yang berbeda, yaitu *mudstone*, *shalestone*, dan *sandstone*. Sampel pada litologi *mudstone* adalah WR-AMD-04. Sampel pada litologi *shalestone* adalah WR-AMD-03, WR-AMD-06, WR-AMD-07, dan WR-AMD-08. Sedangkan sampel pada litologi *sandstone* adalah WR-AMD-01, WR-AMD-02, dan WR-AMD-05.

Saat dilakukan pengujian, *sandstone* memiliki ukuran butiran yang relatif besar dibandingkan dengan sampel lainnya. Ukuran butir yang lebih besar memiliki tingkat porositas yang semakin baik sehingga lebih memungkinkan untuk membentuk asam dengan kapasitas yang sedang hingga tinggi. Litologi *shalestone* memiliki ukuran butir yang sangat halus, meskipun setelah dihancurkan ukuran butirnya akan tetap saling mengikat atau saling mengisi pori sehingga memiliki porositas yang buruk. Dengan demikian litologi *shalestone* diindikasikan sebagai tidak dapat membentuk asam. Sedangkan *mudstone* merupakan litologi yang mudah hancur, sehingga menyebabkan ukuran pecahan menjadi tidak seragam. Akibatnya litologi tersebut memiliki tingkat porositas yang cukup baik sehingga masih dapat memungkinkan membentuk asam dengan kapasitas rendah.

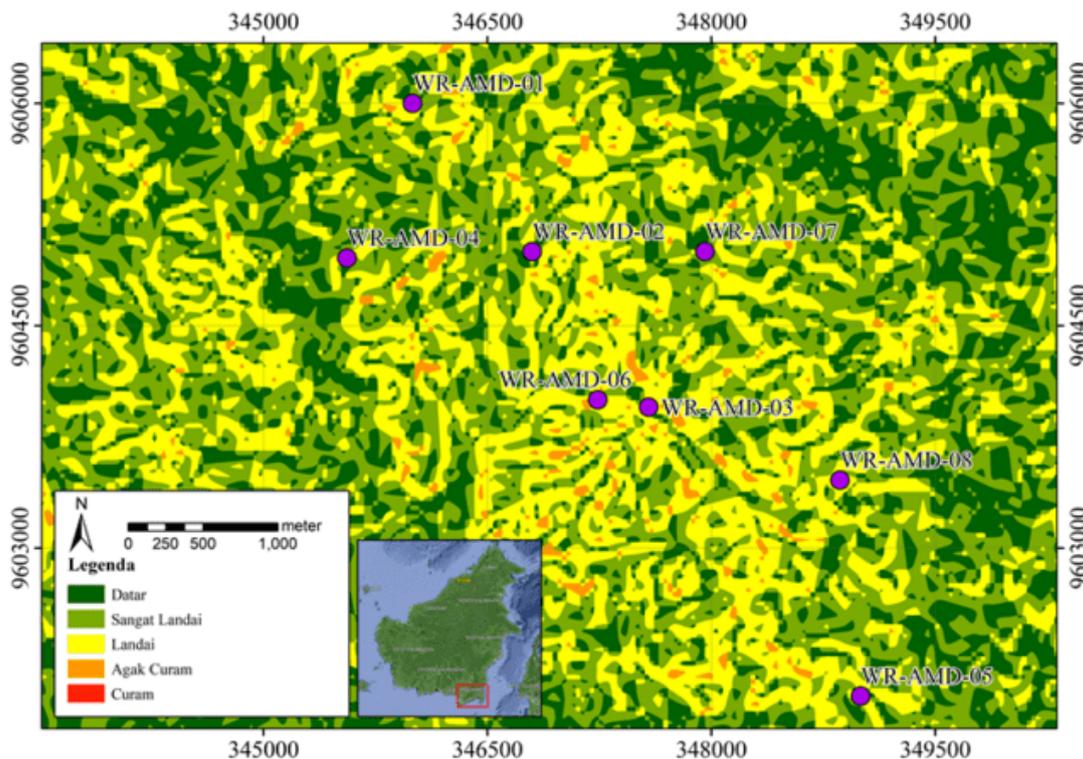


Gambar 4. Peta Topografi dan Formasi Geologi Daerah Penelitian

Pada litologi batuan yang sama terkadang memiliki potensi pembentukan AAT yang berbeda. Hal ini sangat dipengaruhi oleh intensitas pelapukan yang disebabkan oleh kondisi iklim (Syaputra, 2022). Kondisi ini juga dapat disebabkan oleh faktor pelapukan dan juga ukuran butir dari sampel. Sehingga, semakin kecil ukuran butir dapat menyebabkan luas permukaan sampel yang akan teroksidasi akan semakin besar (Syaputra, 2022). Pelapukan juga dapat menghasilkan pH yang berbeda, sehingga kandungan unsur dan logam yang terkandung di dalamnya dapat melarut dengan tinggi akibat dari ukuran butir yang tidak seragam (Syaputra, 2022).

Kemiringan lereng juga dapat menjadi salah satu pengaruh terhadap pembentukan AAT. Gambar 5 menunjukkan daerah penelitian yang memiliki kemiringan lereng dari datar hingga agak curam berdasarkan klasifikasi kelas lereng (Van Zuidam, 1986). Kemiringan lereng dapat meminimalkan potensi erosi dan terbentuknya AAT yang disebabkan oleh faktor eksternal seperti iklim, hujan, dan angin (Syaputra, Kusuma, dkk., 2023), (Umar, 2015). Lokasi pengambilan sampel berada pada kondisi kemiringan lereng yang relatif landai sehingga memungkinkan berpotensi terjadinya erosi. Erosi merupakan peristiwa terangkutnya tanah atau bagian-bagian tanah dari satu tempat ke tempat lain oleh media alami. Media alami yang berperan adalah air dan angin yang dapat menyebabkan hilangnya lapisan tanah dan berkurangnya kemampuan tanah untuk menyerap dan menahan air hujan yang jatuh di atas tanah. Proses erosi dapat ditinjau dari tiga proses yang berurutan yaitu pengelupasan, pengangkutan, dan sedimentasi (Seran, 2022).

Berdasarkan peta topografi yang memiliki potensi untuk membentuk asam adalah kondisi topografi yang relatif datar, dan kondisi kemiringan yang relatif landai. Pada daerah penelitian ini juga didukung oleh faktor erosi dan genangan yang terjadi akibat lembah yang terbentuk. Kondisi ini akan dapat mempercepat proses infiltrasi air ke dalam tanah. Kemiringan lereng dapat menjadi faktor pengendali terhadap terjadinya erosi dan pencegahan pembentukan AAT. Pencegahan dapat dilakukan dengan penyesuaian atau melakukan perancangan yang baik terhadap kemiringan lereng. Kemiringan lereng yang ideal dapat membuat limpasan atau *runoff*, sehingga dapat meminimalisir terjadinya erosi dan terbentuknya genangan air, serta dapat mencegah terjadinya pembentukan AAT. Selain itu juga, dapat dilakukan revegetasi untuk mengurangi infiltrasi dan perkolasi air ke dalam tanah untuk meningkatkan ketahanan terhadap erosi.



Gambar 5. Peta Kemiringan Lereng Daerah Penelitian

4. Kesimpulan

Faktor yang berpengaruh dalam memprediksi potensi pembentukan air asam tambang pada Formasi Warukin adalah pengaruh pelapukan dan litologi batuan. Pada litologi batuan yang sama, terkadang akan menghasilkan pH hasil lindi yang berbeda. Kondisi ini disebabkan oleh faktor pelapukan dan juga ukuran butir dari sampel. Sehingga, semakin kecil ukuran butir dapat menyebabkan luas permukaan sampel yang akan teroksidasi akan semakin besar. Selain kedua faktor tersebut, potensi pembentukan asam dapat diperparah melalui agen yang dapat mempercepat proses

terjadinya asam, seperti topografi, erosi dan kemiringan lereng. Hal ini akan mempercepat potensi pembentukan air asam tambang melalui peningkatan area reaktif batuan yang disertai dengan jumlah pasokan oksigen yang masuk ke dalam batuan melalui erosi.

Daftar Pustaka

- Agustin, F., Barkah, A., Sulastri, A., Abdullah, C. I., Santoso, A. B., & Adiputra, R. N. (2020). Characteristic of pro delta environment on coal seam PAF and NAF, warukin formation, South Kalimantan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 413(1), 012001.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 6597:2011 Uji statik pengidentifikasian sumber air asam tambang. Jakarta: Pemesanan Standar Online.
- Chang-sheng, J., Zhao-xue, C., & Qing-hua, C. (2009). Surface coal mining practice in China. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1(1), 76–80.
- Fikri, H. N., Sachsenhofer, R. F., Bechtel, A., & Gross, D. (2022). Coal deposition in the Barito Basin (Southeast Borneo): The Eocene Tanjung Formation compared to the Miocene Warukin Formation. *International journal of coal geology*, 263, 104117.
- Fitrah, H. (2019). Air Asam Tambang Dan Kesuburan Tanah. Dalam *Mataram: Lafadz Jaya*. Lafadz Jaya.
- Oh, C., Ji, S., Yim, G., & Cheong, Y. (2017). Evaluation of net acid generation pH as a single indicator for acid forming potential of rocks using geochemical properties. *Environmental monitoring and assessment*, 189(165), 1–14.
- Prihartini, R., Syaputra, R., & Kusuma, G. J. (2022). KARAKTERISTIK PEMBENTUKAN AIR ASAM TAMBANG PADA ENDAPAN HIGH SULPHIDATION EPITHERMAL. *Jurnal Pertambangan*, 6(3), 107–114.
- Seran, S. S. L. M. F. (2022). ANALISIS EROSI PADA DAS NOELMINA MENGGUNAKAN METODE USLE. *Eternitas: Jurnal Teknik Sipil*, 2(1), 33–39.
- Smart, R., Skinner, B., Levay, G., Gerson, A., Thomas, J., Sobieraj, H., Schumann, R., Weisener, C., & Weber, P. (2002). AMIRA international ARD test handbook project P387A prediction & kinetic control of acid mine drainage. *Ian Wark Research Institute: Melbourne, Australia. Geochemistry International Pty, Balmain, Australia*.
- Syaputra, R. (2022). *Identifikasi Pelapukan Batuan dalam Evolusi Pembentukan Air Asam Tambang pada Uji Kinetik Skala Laboratorium menggunakan Pendekatan Geokimia-Mineralogi-Tekstur: Studi Kasus Endapan High Sulphidation Epithermal*. Institut Teknologi Bandung.
- Syaputra, R., Alfianita, L., & Andriansyah, R. (2024). Aktivitas Penambangan Batubara: Studi Kasus Pit Elang, Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan. *Jurnal Teknologi Pertambangan Dan Geosains*, 1(1), 17–25.
- Syaputra, R., Kusuma, G. J., & Badhurahman, A. (2023). Prediction of Potential Acid Mine Drainage Formation in High Sulfidation Epithermal Deposit using Geochemical and Mineralogy Approaches. *Eksplorium*, 44(1), 33–40.
- Syaputra, R., Santoso, A. B., Retongga, N., Alfianita, L., Mu'awanah, F. R., & Heriyadi, N. W. A. A. T. (2023). Analisis Peran Sektor Pertambangan dalam Pembangunan Regional Berkelanjutan di Provinsi Sumatera Selatan dengan Menerapkan Pendekatan Analisis Model Input-Ouput. *Jurnal Teknologi*, 16(1), 37–47.
- Umar, W. S. B. H. (2015). STUDI PENCEGAHAN PEMBENTUKAN AIR ASAM TAMBANG DENGAN METODE ENKAPSULASI. *Jurnal Geologi Pertambangan (JGP)*, 1(17), 46–56.
- Van Zuidam, R. A., & Zuidam-Cancelado, F. I. (1986). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Smits Publishers The Hague.
- Vriens, B., Peterson, H., Laurenzi, L., Smith, L., Aranda, C., Mayer, K. U., & Beckie, R. D. (2019). Long-term monitoring of waste-rock weathering at the Antamina mine, Peru. *Chemosphere*, 215, 858–869.

Ucapan Terima Kasih

Dengan rasa syukur dan rasa hormat, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penelitian ini. Kami mengucapkan terima kasih kepada bapak Rizky Syaputra, S.T., M.T., selaku pembimbing yang telah memberikan kami izin penggunaan topik dan data dalam penelitian ini. Keberhasilan ini tidak mungkin terwujud tanpa adanya kerja keras, dukungan, dan kolaborasi dari setiap pihak yang terlibat. Semua kontribusi dan bantuan dari pihak-pihak tersebut tidak hanya menjadi bagian dari penelitian ini, tetapi juga menjadi bagian dari perjalanan dan pertumbuhan pribadi kami. Terima kasih sekali lagi atas dedikasi dan kolaborasi yang luar biasa.