

# HIDROGEOLOGI RENCANA KEGIATAN PENAMBANGAN DAN PENGOLAHAN BIJIH EMAS DAN MINERAL PENGIKUTNYA (DMP) DI KABUPATEN ACEH TENGAH. PROVINSI ACEH, INDONESIA

*Hydrogeology of Gold Ore and Its Associated Minerals Mine Plan and Processing Activity in Central Aceh Regency, Aceh Province, Indonesia*

Ira Mughni Pratiwi<sup>1</sup>, Ika Arsi Anafiati<sup>1</sup>, Asri Fridtriyanda<sup>1</sup>

1. Institut Teknologi Yogyakarta, Indonesia

Email: *mughniira@ity.ac.id*

## ABSTRAK

Keberadaan busur magmatik yang tersebar di seluruh kepulauan Indonesia menjadi kekayaan sumber daya mineral yang berkontribusi dalam pertumbuhan ekonomi serta sebagai katalis percepatan pertumbuhan infrastruktur dan peningkatan kesejahteraan masyarakat di berbagai daerah di Indonesia. Peningkatan pertumbuhan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat berkorelasi terhadap permintaan air. Saat ini, pencemaran air tanah menjadi isu global dan kualitas air tanah dipengaruhi oleh proses alam ataupun aktivitas antropogenik seperti kegiatan pertambangan emas. Lokasi penelitian merupakan area rencana pertambangan dan pengolahan bijih emas dan mineral pengikutnya (DMP) yang berada di Kabupaten Aceh Tengah, Provinsi Aceh, Indonesia. Penelitian ini mengintegrasikan pengamatan lapangan dengan analisis geologi permukaan dan geokimia untuk menilai potensi dampak kegiatan pertambangan dan pengolahan bijih emas DMP pada lingkungan terutama aspek hidrogeologi. Berdasarkan hasil kajian diketahui bahwa kontrol struktur geologi berpengaruh terhadap pola sebaran air tanah menjadi lebih kompleks; zona mineralisasi tidak melewati muka air tanah karena permukaan potensiometrik berada di atas permukaan tanah; terdapat manifestasi air tanah berupa rembesan; dan kegiatan pertambangan bijih emas DMP tidak berpotensi membentuk air asam tambang.

**Kata kunci:** *endapan sediment-hosted, hidrogeologi, jasperoid, pertambangan emas*

**DOI:** 10.15408/jipl.v2i1.26052

## ABSTRACT

*The existence of magmatic arc lay across in Indonesia archipelago show to advantage of mineral resources wealth that contribute to economic growth as well as a catalyst for accelerating infrastructure growth and improving community well-being in many areas in Indonesia. Increased of economic growth and community well-being are correlated with demand for water. Nowadays, groundwater contaminations are a global issue and groundwater quality may be taken hold of by natural process or anthropogenic activities such as gold mine activities. The research area is gold ore and its associated minerals mine plan and processing area, located on Central Aceh Regency, Aceh Province, Indonesia. This research integrates field observation and surface geology and geochemical analysis to assess the potential impact of gold ore and its associated minerals mine plan and processing on the environment, chiefly of hydrogeological aspect. Based on the results of study, the pattern of groundwater distribution is an under control of geological structure become more complex; mineralization zone does not cross the water table because the potentiometric surface may be above the ground level; the seepage coming to the surface as a groundwater manifestation; and gold ore and its associated minerals mine plan and processing activities have no potential to produce acid mine drainage.*

**Keywords:** *sediment-hosted deposit, hydrogeology, jasperoid, gold mine*

## PENDAHULUAN

Keberadaan busur magmatik yang tersebar di seluruh kepulauan Indonesia menjadi sumber mineralisasi yang terjadi mulai dari Aceh dan membelah ke arah Kalimantan menjadi Busur Meratus Sumatera dan Busur Kalimantan, dan menuju Jawa hingga Nusa Tenggara sebagai Busur Sunda Banda. Busur lainnya adalah Busur Sulawesi, Busur Halmahera, dan Busur Papua (Karmadibrata, 2013). Kekayaan sumber daya mineral merupakan salah satu sektor utama yang berkontribusi dalam pertumbuhan ekonomi Indonesia (Karmadibrata, 2013 dan The Association of Southeast Asian Nations, 2022). Pengelolaan sumber daya mineral melalui aktivitas pertambangan menjadi katalis percepatan pertumbuhan infrastruktur dan peningkatan kesejahteraan masyarakat di berbagai daerah di Indonesia (Resosudarmo, dkk., 2009).

Pertumbuhan populasi dan ekonomi meningkatkan permintaan terhadap barang dan jasa salah satunya adalah peningkatan permintaan terhadap air, dan air tanah menjadi sumber utama terutama saat musim kemarau. Pencemaran air tanah merupakan salah satu isu global, dan kualitas air tanah dipengaruhi oleh proses alam ataupun aktivitas antropogenik seperti kegiatan pertambangan emas (Biddau and Cidu, 2005 dan Chotpantarat and Thamrongsrisakul, 2021). Secara global, pengelolaan air adalah salah satu tantangan kelestarian lingkungan yang paling kritis bagi industri pertambangan (ERMITE, 2004; Amezaga dkk., 2011; Northey dkk., 2016). Dalam hal ini, aktivitas pertambangan dan sumber daya air berkaitan erat dan kompleks. Aktivitas pertambangan membutuhkan air dalam jumlah yang besar dan juga menimbulkan berbagai risiko terhadap sumber daya air seperti penurunan kuantitas air tanah atau penurunan kualitas air tanah atau tanah melalui pelepasan logam yang berpotensi beracun (Cozma, 2016; Curel, 2017; Mudd, 2020; dan Abdelaal, dkk., 2021).

Endapan bijih yang kaya akan sulfida merupakan sumber utama dari mineral Cu, Pb, Zn, dan Ni (Al and Blowes, 1999). Kegiatan pertambangan dan pengolahan bijih emas dan mineral pengikutnya (DMP) berada di Kabupaten Aceh Tengah, Provinsi Aceh, Indonesia dengan karakteristik jasperoid. Jasperoid merupakan batuan dengan mineral utama silika dan terbentuk dari batugamping yang telah berubah/mengalami silifikasi (Lovering, 1962). Keberadaan endapan emas di lokasi penelitian terkait dengan 3 (tiga) busur magmatik yaitu busur Sumatera-Meratus zaman kapur tengah dan akhir, busur neogen Sunda-Banda di sepanjang pesisir barat Sumatera, dan busur lengkung neogen Aceh yang hanya berada di timur laut Sumatera. Karakteristik endapan adalah *calcareous* dan *carbonaceous* pada *sediment host rock*. Beberapa unsur-unsur mineral berasosiasi dengan emas adalah kombinasi dari As, Sb, Hg, Tl, F, dan Ba. Tipe mineralisasi di lokasi penelitian adalah berasosiasi dengan breksi jasperoid yang terbentuk di sepanjang kontak yang tidak selaras antara batugamping bioklastik dan batulempung-batulanau di atasnya (Kirwin and Royle, 2018).

Hidrogeologi berkaitan dengan pergerakan air melalui lingkungan geologi permukaan, perkembangan kimia air di sepanjang jalur alirannya, pengaruh air bawah permukaan pada proses geologi dan geodinamika yang terjadi di kerak bumi bagian atas (Smith, 2015). Air tanah merupakan salah satu aspek kajian penting dalam kegiatan penambangan. Sistem air tanah bervariasi dengan kompleksitasnya bergantung pada kondisi bawah permukaan dan faktor spesifik lokasi yang mengendalikan pola dan laju aliran air tanah. Sistem tambang terbuka maupun sistem tambang bawah tanah memberikan pengaruh terhadap sumberdaya air yang menyebabkan infiltrasi dan perlokasi air bawah tanah secara intensif (Zago, 2020).

Kajian hidrogeologi merupakan bagian dari aspek teknis untuk menentukan kelayakan suatu kegiatan penambangan. Studi ini mengintegrasikan pengamatan lapangan dengan analisis geologi permukaan dan geokimia untuk menilai potensi dampak kegiatan pertambangan dan pengolahan bijih emas DMP pada lingkungan terutama aspek hidrogeologi.

## METODE

### Data

Beberapa data yang digunakan dalam analisis kajian hidrogeologi meliputi:

1. Peta topografi Bakosurtanal skala 1:50.000.

2. Peta topografi berdasarkan Total Station.
3. Peta tata guna lahan.
4. Pemasangan pengukur curah hujan harian.
5. Delineasi daerah aliran sungai (regional dan lokal).
6. Pengumpulan data curah hujan sekitar wilayah proyek
7. Data-data pemboran eksplorasi

### Kondisi Hidrogeologi

Permodelan air tanah dilakukan secara numerik (*finite difference method*), pembuatan blok model yang menggambarkan kondisi geologi diperlukan sebagai sebuah model konseptual yang digunakan dalam permodelan air tanah. Dalam pembuatan blok model diperlukan berbagai data pendukung seperti data geologi permukaan, data bor, data pengukuran air tanah dll. Data geologi yang representatif mempengaruhi ketelitian dari sebuah permodelan air tanah.

Dengan bantuan perangkat lunak MODFLOW, model konseptual geologi yang dibatasi oleh batas boundari analisis dapat dijalankan dengan beberapa *input* utama seperti nilai koduktivitas hidraulik batuan dan nilai *recharge*. Pada area dengan kondisi geologi yang kompleks, maka permodelan air tanah menggunakan modul dari MODFLOW-NWT atau *A Newton Formulation for MODFLOW-2005*. Kelebihan dari MODFLOW-NWT adalah dapat melakukan kalkulasi sebaran air tanah pada kondisi dimana terdapat adanya aliran *nonlinear*.

### Model Konseptual dan Asumsi Hidrogeologi

Dengan memanfaatkan data-data yang ada baik primer maupun sekunder maka dibuatkan asumsi-asumsi sebagai dasar dalam sebuah permodelan numerik air tanah yang terdiri dari:

1. Alur sungai yang memiliki aliran sepanjang musim diasumsikan sebagai *boundary condition* dan titik ikat sebaran aliran air tanah.
2. Nilai konduktivitas hidraulik batuan menggunakan nilai dari data sekunder.
3. Nilai *recharge* di dapat dari analisis SWAT dimana diketahui bahwa pada akuifer dangkal terdapat nilai *recharge* rata-rata 260-360 mm/tahun dan pada akuifer dalam nilai *recharge* rata-rata 20 mm/tahun.
4. Keterdapat mata air di lokasi kajian menggambarkan adanya aliran air tanah yang memotong topografi dan dijadikan acuan dalam melakukan kalibrasi model.

### Parameter Permodelan

Dari hasil permodelan dengan melakukan beberap kali perubahan *input* parameter model, sehingga model hidrogeologi dianggap cukup representatif dengan kondisi sebenarnya. Beberapa parameter yang digunakan dalam permodelan terdiri dari:

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| <i>Cell grid</i>                    | : 25 x 25 m                               |
| <i>Recharge</i> (Kalibrasi)         | : 20 mm/tahun                             |
| Konduktivitas Hidraulik (Kalibrasi) | : $5 \times 10^{-06} - 8 \times 10^{-11}$ |

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Sebaran Data

Dari sebaran pemboran eksplorasi di lokasi penelitian sejumlah 130 lubang bor dengan 97 lubang bor menggunakan *coring* dan 33 lubang bor *Reverse Circulation* (RC), diindikasikan bahwa seluruh lubang bor tidak melewati muka air tanah. Hal ini dikarenakan batuan bijih dekat dengan permukaan dan sebagian telah tersingkap serta rata-rata ketebalan batuan bijih tipis dengan (maksimum tebal 15 meter). Lokasi penelitian berada di bagian hulu Daerah Aliran Sungai (DAS) Jambo Aye. Di sebelah Timur lokasi terdapat Sungai Wih Kapar dan sebelah Barat terdapat Sungai Wih Lumut sedangkan di sebelah Selatan terdapat Sungai Wih Ise-Ise dengan aliran air mengalir ke arah Utara kemudian ke arah Timur menuju ke Laut Selat Malaka.

Berdasarkan hasil pengamatan rona lingkungan awal pola aliran dan morfometri DAS di lokasi penelitian adalah sebagai berikut:

#### **A. Pola Aliran**

Pola aliran DAS Jambo Aye adalah dendritik di mana pola aliran sungai menyerupai penampang pada daun. Sehingga dapat dilihat bahwa sungai induk memiliki percabangan anak sungai yang menuju ke segala arah. Aliran sungai seperti ini dikontrol oleh litologi yang bersifat homogen dan memiliki tekstur sungai yang dikontrol oleh jenis batuan. Pola dendritik mencerminkan kondisi litologi yang memiliki sifat resistensi terhadap erosi, pola ini terdapat pada litologi batu pasir tupaan yang tersebar luas di daerah Krueng Jambo Aye.

#### **B. Morfometri DAS**

Morfometri DAS Jambo Aye dianalisis berdasarkan luas DAS, bentuk DAS, profil sungai utama, kerapatan aliran, dan orde sungai. Berdasarkan hasil analisis diperoleh luas DAS Jambo Aye adalah 184,75 km. Air dari DAS Jambo Aye mengalir melalui sungai utama yaitu Sungai Krueng Jambo Aye ke Selat Malaka. Dalam hal ini, DAS Jambo Aye berperan sebagai wilayah kesatuan hidrologis dengan fungsi tata air wilayah.

Bentuk DAS Jambo Aye adalah dendritik sehingga sungai induk memiliki percabangan anak sungai yang menuju ke segala arah. Bentuk DAS dendritik mempunyai debit banjir yang relatif besar karena waktu terjadinya banjir dari anak-anak sungai bervariasi dan waktu banjir relatif cepat. Berdasarkan pertemuan 2 (dua) anak sungai hasil pengukuran planimetri maka didapatkan panjang sungai utama DAS Jambo Aye adalah 114 km dan lebar 74 km. Hasil analisis kerapatan aliran (drainage density) DAS Jambo Aye adalah  $0,40\text{m}^3/\text{s}$  dan masuk dalam kategori rendah. Orde sungai dalam DAS Jambo Aye adalah 3 (tiga) orde.

#### **Kondisi Klimatologi**

Berdasarkan data klimatologi Stasiun BPP Pegasing Kabupaten Aceh Tengah Tahun 2019 menunjukkan bahwa dalam jangka sepuluh tahun (2008-2018) curah hujan tahunan berkisar antara 1.110-3.600 mm dan curah hujan bulanan berkisar antara 67-328 mm. Wilayah Aceh Tengah secara umum termasuk daerah yang beriklim tropis dengan dua musim. Sesuai klasifikasi menurut *Schmidt and Ferguson*, lokasi penelitian termasuk daerah dengan iklim tipe C (agak basah) dengan nilai  $Q = 0,40$ , dan menurut sistem klasifikasi *Oldeman* tergolong dalam iklim tipe C2, di mana bulan basah berturut-turut adalah 5 sampai 6 bulan, dan bulan kering berturut-turut adalah 2 sampai 3 bulan.

Berdasarkan data dari Stasiun BMKG Bebesen Kabupaten Aceh Tengah menunjukkan bahwa variabilitas suhu rata-rata bulanan berkisar antara  $18^{\circ}\text{C}$  sampai  $20^{\circ}\text{C}$ . Penyinaran matahari rata-rata berada pada kisaran 36-64%, kondisi kelembaban udara relatif rata-rata bulanan cukup tinggi yaitu berkisar antara 91-95%, dan penguapan antara 3,3-4,6 mm/hari.

#### **Hidrogeologi**

Lokasi penelitian terletak di Kabupaten Aceh Tengah merupakan wilayah dengan permukaan tanah yang datar dan berbukit-bukit. Untuk wilayah Pusat Kabupaten Takengon, daerah dengan kemiringan 0-8% terdapat hampir di sebagian besar Pusat Kabupaten Takengon, sedangkan daerah dengan tingkat kemiringan 8-25% hanya terdapat pada bagian timur selatan (pinggiran Danau Lut Tawar). Wilayah perencanaan sebagian besar (sekitar 74-53%) berada pada ketinggian 1.225-1.318 m di atas permukaan laut (mdpl) dan sebagian lagi yang lainnya berada pada ketinggian lebih dari 1.318 mdpl.

Topografi wilayah kabupaten Aceh Tengah sebagian besar berada pada ketinggian  $>3000$  mdpl kurang lebih 44,12% dan sisanya  $< 3000$  mdpl (55,88%). Pada ketinggian tersebut relatif banyak kendala untuk berbagai kegiatan pembangunan. Khususnya pada ketinggian  $>3000$  mdpl tidak dapat dikembangkan untuk budidaya yang bersifat ekonomi, hal ini dikarenakan daerah dengan ketinggian tersebut ditetapkan sebagai kawasan lindung. Lokasi penelitian berada di ketinggian 1000 mdpl dengan kelerengan 10-25%.

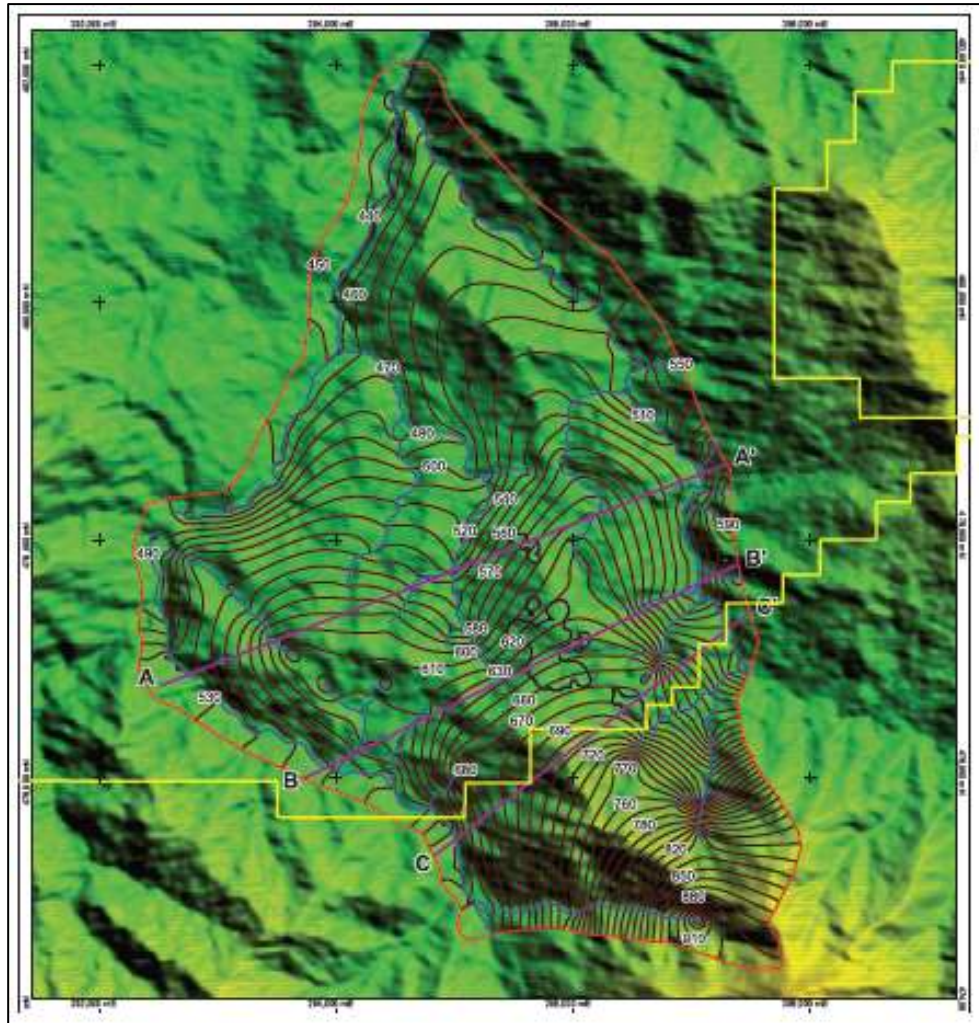
Berdasarkan hasil observasi di lokasi penelitian, terdapat indikasi awal rembesan (*seepage*) sebagai manifestasi air tanah pada beberapa titik dengan debit yang bervariasi (Gambar 1 dan Tabel 1). Gambaran hidrogeologi aktual berdasarkan hasil permodelan dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 1.** Indikasi rembesan (*seepage*) sebagai manifestasi air tanah

**Tabel 1.** Debit rembesan pada musim penghujan

| No | Kode Mata air | Debit (m <sup>3</sup> /s) |
|----|---------------|---------------------------|
| 1  | Linge 1       | 0,048                     |
| 2  | Linge 2       | 0,023                     |
| 3  | Linge 3       | 0,063                     |



**Gambar 2.** Hidrogeologi aktual lokasi penelitian

Kondisi untuk terjadinya mata air adalah bahwa *hydraulic head* dalam akuifer (dalam hal ini akuifer sebagai sumber mata air) cukup mengalirkan air ke permukaan. Dalam akuifer tertekan, tidak ada aliran utama kecuali rembesan melalui sesar atau rekahan. Laju aliran mata air secara langsung berhubungan dengan gradien hidrolik antara akuifer dan permukaan.

Pada beberapa titik lubang bor dipasang alat piezometer. Piezometer yang dipasang pada lubang bor tersebut tetap kering sehingga dapat disimpulkan bahwa resapan air tanah minimal. Karena geometri tambang terbuka akan cukup besar, maka pengaruh air tanah pada kestabilan lereng *pit* harus diperhatikan. Untuk itu, air tanah harus dikelola dalam konteks rekayasa air tanah dengan mengalirkannya melalui *horizontal drainholes*. Konsep rekayasa air tanah yang direkomendasikan adalah sebagai berikut:

1. Muka air tanah cukup mungkin dangkal di beberapa lokasi calon penambangan atau pada wilayah rencana *pit*.
2. Struktur geologi batuan di beberapa calon dinding tambang mungkin mempunyai harga konduktivitas hidrolik yang cukup tinggi, namun demikian massa batuan di belakang *wall* mungkin tidak menyebabkan pengaliran air dari daerah di belakang *wall* menuju *pit* secara bebas, karena elevasi lembah di sekitarnya lebih rendah dari lokasi rencana *pit*.
3. Seiring dengan pembukaan dinding *pit*, secara alamiah akan menyebabkan air di dinding/zona lapukan kering. Namun untuk mempercepat dan menjaga dinding tetap kering disarankan menggunakan *drainholes* horizontal.
4. Perencanaan *drainholes* dapat dilakukan berdasarkan uji lapangan, sehingga dapat diperoleh konfigurasi *drainholes* horizontal dan vertikal yang optimal. Uji lapangan ini selanjutnya dapat dijadikan masukan bagi perencanaan yang didasarkan pada pemodelan air tanah.



5. Sumur pantau air tanah perlu dibuat untuk memantau perkembangan fluktuasi air tanah merespons penurunan muka air tanah melalui *drainholes*. Pemantauan air tanah dapat digunakan sebagai pendukung untuk pemantauan lingkungan dan pemantauan progress *dewatering* air tanah.
6. Desain awal dan konseptual *drainholes* yang direkomendasikan dapat dijelaskan sebagai berikut: *drainhole* dibuat dalam kelompok (*cluster*) terdiri dari dua atau tiga pipa berdiameter 5 cm. Jarak antar kelompok *drainholes* dalam arah horizontal adalah 40 meter.

**Hidrostratigrafi**

Litologi daerah penelitian terdiri dari beberapa batuan, yaitu *limestone*, *jasperoid silicified*, dan *mudstone*. Daerah penelitian memiliki ciri litologi batuan sedimen yang bersifat akuifer. Gambar 3 menunjukkan interpretasi hidrostratigrafi batuan di lokasi penelitian. Litologi *mudstone* sebagai lapisan akuitart, yang dapat menampung air tanah namun sulit untuk mengalirkan air. Litologi karbonatan dan batugamping di lokasi penelitian sebagai akuifer, yang merupakan unit batuan yang mampu menampung dan mengalirkan air tanah. Sedangkan litologi andesit dan diorit diinterpretasikan sebagai akuifug, yang tidak mampu menampung ataupun mengalirkan air. Akuifer terbatas juga terdapat pada unit batuan jasperoid, hal ini dikarenakan adanya struktur yang membuat kemunculan rekahan pada unit batuan tersebut.

Zona mineralisasi merupakan ubahan batuan sedimen yang mengalasi atau berubah silifikasi. Dari sebaran pemboran pada zona mineralisasi dapat diindikasikan bahwa seluruh lubang bor tidak melewati muka air tanah. Hal ini dikarenakan batuan bijih dekat dengan permukaan dan sebagian sudah tersingkap serta rata-rata ketebalan batuan bijih adalah tipis (maksimum tebal 15 meter).

| GROUP NAME  | LITHOLOGY TYPE  | SCHEMATIC SECTION | COMMENTS   | HYDROSTRATIGRAPHY | REMARKS           |
|---|---|-------------------|--|-------------------|-------------------|
| Mudstone / Siltstone  | Shallow marine lagoonal or shallow basin well bedded deposits. In Bintang 2 unmineralized limestone is below mudstone but overlies the mineralized limestone unit.                              |                   | Good surface exposure on road to camp and top ABD-01 & ABD-02  |                   | AQUITARD          |
| Carbonate Host in Bulan<br>Volcaniclastic Host in Bintang 1 | Shallow marine carbonates and bedded calcareous sediments areally extensive but between 10 - 20m thick unit. In Bintang intercalated with Volcaniclastic unit with distinct calcareous nodules. |                   | Prefentially silicified with collapse breccias from volume change infilled by later quartz and sulfides. Clay-pyrite with quartz-sulfide veining in volcaniclastic unit. <b>Gold mineralization within this zone only.</b> |                   | AQUIFER / AQUIFUG |
| Limestone (>100m)   | Limestone unit  |                   | Base of mineralization encountered in all holes to date. ABD-04 penetrated @ 100m of this unit.  |                   | AQUIFER / AQUIFUG |
| Inferred Basement   | Inferred older andesite / diorite complex with intrusive dykes and sills.   |                   | Inferred only not encountered in drillhole to date or regional mapping.  |                   | AQUIFUG           |

**Gambar 3.** Interpretasi hidrostratigrafi batuan di Lokasi Penelitian

**Sistem Hidrogeologi**

Berdasarkan interpretasi litologi dan pembentukan geologi, diperkirakan bahwa sistem air tanah di lokasi penelitian dibentuk oleh akuifer dengan media pori dan rekahan. Akuifer dengan media pori merupakan interpretasi dari litologi batugamping. Akuifer dengan media rekahan merupakan interpretasi dari litologi batuan beku yang terkekarkan akibat intrusi yang terjadi. Lapisan akuitart dan akuifug merupakan media yang tidak mampu mengalirkan atau mengeluarkan air, media ini diinterpretasikan dari litologi *mudstone*, *jasperoid*, dan andesit tersilisifikasi. Berdasarkan persebaran litologi, dapat membentuk sistem akuifer tertekan, di mana bila litologi batugamping yang jenuh air berada di bawah lapisan *mudstone* yang *impermeable*. Debit air tanah berpotensi tidak cukup besar, dikarenakan elevasi penambangan berada di atas sungai-sungai besar, sehingga air tanah akan cenderung keluar kearah sungai.

### Studi Geokimia Potensi Air Asam Tambang

Air Asam Tambang (AAT) adalah potensi yang dapat terjadi di area pertambangan dikarenakan adanya mineral sulfida pada batuan sisa yang teroksidasi selama kegiatan penambangan dan penimbunan. Hasil oksidasi batuan tersebut kemudian terlindikan oleh air (air hujan) yang mengakibatkan peningkatan keasaman di air dan peningkatan konsentrasi logam-logam terlarut. Proses pembentukan AAT terdapat 4 tahap reaksi, yaitu: pelapukan dan oksidasi, oksidasi lanjutan, konversi ion logam, dan yang terakhir adalah reaksi pelarutan-pengendapan *reversibel*. AAT dapat mengakibatkan pencemaran air permukaan dan air tanah, menurunkan pH dan meningkatkan unsur yang berbahaya bagi lingkungan sekitar. Dampak lain yang dapat ditimbulkan oleh AAT adalah risiko kesehatan untuk masyarakat sekitar tambang, kontaminasi pada area reklamasi yang dapat mengakibatkan kegagalan pembibitan, serta mengganggu kestabilan ekosistem sungai.

#### Uji Statik

Prediksi potensi AAT pada lokasi penelitian dilakukan dengan pengujian statik yang memberikan kelebihan berupa waktu analisis yang relatif singkat, hasil yang akurat, dan biaya yang relatif lebih murah. Uji statik ditujukan untuk memeriksa potensi material untuk membentuk asam, menetralkan asam, atau melindungi logam yang terkandung pada batuan sampel. Uji statik yang dilakukan untuk prediksi potensi adalah uji pH Pasta, *Acid Base Accounting*, dan *Net Acid Generation Test*.

Uji pH pasta bertujuan untuk mengetahui interaksi batuan saat pertama kali tersingkap dan bereaksi dengan air. Pengujian dilakukan dengan mencampur sampel batuan dengan ukuran <75 µm sebanyak 25gram dengan air hingga perbandingannya 1:2. Campuran tersebut diaduk merata hingga membentuk pasta dan dibiarkan bereaksi selama 12 jam, kemudian diperiksa pHnya.

Pengujian *Acid Base Accounting* atau kesetimbangan asam basa dilakukan dengan menganalisis Total Sulfur (TS), Potensi Pembentukan Asam Maksimum (PPAM), Kapasitas Penetralan Asam (KPA), dan Potensi Pembentukan Asam Bersih (PPAB). Penghitungan TS dilakukan menggunakan alat LECO dengan sampel sebanyak 1 gram. TS ini akan berpengaruh pada penghitungan PPAM, dengan mengalikan nilai TS dalam persen dengan 30,625 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/ton batuan. KPA ditentukan dengan penambahan HCl ke dalam sampel batuan yang kemudian dibiarkan bereaksi dengan pemanasan selama 1-2 jam, kemudian didinginkan. PPAB dihitung secara matematis dari selisih nilai PPAM dengan nilai KPA.

Uji *Net Acid Generation* (NAG) atau Pembentukan Asam Neto (PAB) meliputi penambahan hidrogen peroksida ke dalam sampel dengan ukuran <75 µm dan dibiarkan hingga reaksi oksidasinya selesai (maksimal 24 jam). Sampel kemudian dipanaskan 1-2 jam, kemudian saat sampel sudah bersuhu ruangan, akan dilakukan pengukuran pH. Hasil uji statik disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Kriteria karakterisasi geokimia

| KPA                                    | NAG pH   | PPAB              |
|--|----------|-------------------|
| <1 <i>Potentially Acid Producer</i>    | <4,5 PAF | >0 PAF (teoritis) |
| >2 <i>Potentially Acid Neutralizer</i> | >4,5 NAF | ≤0 NAF (teoritis) |

Ket: PAF= *Potentially Acid Forming*; NAF= *Non-Acid Forming*; UC= *Uncertain*

Pengujian sampel AAT yang diambil mewakili seluruh litologi di lokasi penelitian. Terdapat 8 (delapan) sampel yang diambil untuk diuji karakteristik geokimianya (Tabel 3). Setelah ketiga uji statik dilakukan, maka akan didapat hasil uji statik masing-masing sampel (Tabel 4). Berdasarkan hasil uji statik, sampel digolongkan ke dalam beberapa klasifikasi (Tabel 5).

**Tabel 3.** Sampel air asam tambang

| No | Kode        | Litologi                   |
|----|-------------|----------------------------|
| 1  | LAA-3 AST-3 | <i>Silicified mudstone</i> |
| 2  | LAA-4 AST-4 | <i>Silicified mudstone</i> |



|   |              |  |
|---|--------------|--|
| 3 | LAA-5 AST-5  | <i>Silicified hydrothermal breccia</i> |
| 4 | LAA-6 AST-6  | <i>Mudstone</i>                        |
| 5 | LAA-7 AST-8  | <i>Limestone</i>                       |
| 6 | LAA-8 AST-9  | <i>Silicified mudstone</i>             |
| 7 | LAA-3 AST-02 | <i>Limestone</i>                       |
| 8 | LAA-4 AST-01 | <i>Silicified Mudstone</i>             |

**Tabel 4.** Hasil uji statik air asam tambang

| No | Kode         | Litologi                               | Total Sulfur (%) | PPAM  | KPA    | KPA/PPAM | PPAB    | pH Pasta | PAN pH | PAN    |        |
|----|--------------|--|------------------|-------|--------|----------|---------|----------|--------|--------|--------|
|    |              |  |                  |       |        |          |         |          |        | pH 4,5 | pH 7,0 |
| 1  | LAA-3 AST-3  | <i>Silicified mudstone</i>             | 0,16             | 4,9   | 2,47   | 0,5      | 2,43    | 5,73     | 6,6    | 0,00   | 3,00   |
| 2  | LAA-4 AST-4  | <i>Silicified mudstone</i>             | 0,43             | 13,17 | 554,04 | 42,07    | -540,87 | 8,18     | 12,55  | 0,00   | 0,00   |
| 3  | LAA-5 AST-5  | <i>Silicified hydrothermal breccia</i> | 0,22             | 6,74  | 2,42   | 0,36     | 4,32    | 6,03     | 6,4    | 0,00   | 1,00   |
| 4  | LAA-6 AST-6  | <i>Mudstone</i>                        | 0,3              | 9,19  | 2,83   | 0,31     | 6,36    | 7,1      | 6,96   | 0,00   | 0,25   |
| 5  | LAA-7 AST-8  | <i>Limestone</i>                       | 0,34             | 10,41 | 679,84 | 65,29    | -669,43 | 7,4      | 10,35  | 0,00   | 0,00   |
| 6  | LAA-8 AST-9  | <i>Silicified mudstone</i>             | 0,27             | 8,27  | 4,54   | 0,55     | 373     | 8,11     | 6,82   | 0,00   | 0,74   |
| 7  | LAA-3 AST-02 | <i>Limestone</i>                       | 0,35             | 10,72 | 793,8  | 74,06    | -783,08 | 9,62     | 10,15  | 0,00   | 0,00   |
| 8  | LAA-4 AST-01 | <i>Silicified Mudstone</i>             | 0,33             | 10,11 | 3,18   | 0,31     | 6,93    | 7,66     | 5,04   | 0,00   | 8,71   |

**Tabel 5.** Klasifikasi geokimia sampel berdasarkan uji statik

| No | Kode         | Litologi                               | Klasifikasi |
|----|--------------|--|-------------|
| 1  | LAA-3 AST-3  | <i>Silicified mudstone</i>             | UC          |
| 2  | LAA-4 AST-4  | <i>Silicified mudstone</i>             | NAF         |
| 3  | LAA-5 AST-5  | <i>Silicified hydrothermal breccia</i> | UC          |
| 4  | LAA-6 AST-6  | <i>Mudstone</i>                        | UC          |
| 5  | LAA-7 AST-8  | <i>Limestone</i>                       | NAF         |
| 6  | LAA-8 AST-9  | <i>Silicified mudstone</i>             | UC          |
| 7  | LAA-3 AST-02 | <i>Limestone</i>                       | NAF         |
| 8  | LAA-4 AST-01 | <i>Silicified Mudstone</i>             | UC          |

Dari 8 (delapan) sampel yang diuji, terdapat 3 sampel yang dikategorikan NAF yang cenderung memiliki kemampuan menetralkan asam dan 5 sampel yang lain termasuk kategori UC karena kriteria karakterisasi memberikan hasil yang bertentangan. Dengan mempertimbangkan nilai dari masing-masing parameter uji pada semua sampel UC, yang memiliki PPAM rendah, pH pasta yang cenderung netral, dan keberadaan KPA yang kecil, maka sampel tersebut memiliki sifat yang cenderung seperti NAF (*inert*).

Hasil uji statik tersebut juga menyimpulkan bahwa litologi *limestone* umumnya adalah batuan dengan kategori NAF yang cenderung memiliki kemampuan menetralkan asam, sedangkan untuk litologi *silicified mudstone*, *mudstone*, dan *silicified hydrothermal breccia* umumnya cenderung sebagai batuan NAF, kecuali pada kondisi terdapat akumulasi mineral sulfida yang biasanya terdapat di zona mineralisasi pembawa emas. Zona tersebut berpotensi menghasilkan air sedikit asam.

### Pengelolaan Air Asam Tambang

Secara umum, pencegahan air asam tambang dapat melalui beberapa upaya berikut:

1. Manajemen penempatan batuan sisa
2. Pengapsulan (*dry cover*)
3. Metode perendaman (*wet cover*)
4. Pencampuran material pembentuk asam dengan material yang tidak berpotensi

5. membentuk asam atau bersifat basa.
6. Penggunaan metode lainnya sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

### Rekomendasi Hidrogeologi

Berdasarkan pengamatan lapangan dan analisis kajian hidrogeologi, perlu dilakukan kajian tentang model neraca air lokasi penelitian dengan beberapa alasan sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui dan memperkirakan kapasitas, jumlah dan proporsi masing-masing komponen di dalam model neraca air sebagai gambaran tentang kondisi awal tata atau sistem air di lokasi studi.
2. Untuk mengetahui daya dukung lingkungan tata air di lokasi studi karena adanya kebutuhan air untuk pabrik pengolahan dan pengangkutan tailing dari pabrik pengolahan ke TSF.
3. Untuk mengetahui dan memperkirakan respons tata air akibat adanya beberapa kegiatan penambangan dengan beberapa obyek yang mempengaruhi tata air.

### PENUTUP

Kesimpulan dari hasil kajian adalah sebagai berikut: Kontrol struktur geologi berpengaruh terhadap pola sebaran air tanah menjadi lebih kompleks. Berdasarkan hasil sebaran pemboran pada zona mineralisasi dapat diindikasikan bahwa seluruh lubang bor tidak melewati muka air tanah karena permukaan potensiometrik berada di atas permukaan tanah. Manifestasi air tanah yang dijumpai berupa rembesan (*seepage*). Berdasarkan hasil uji statik, batuan di lokasi penelitian tidak berpotensi membentuk air asam tambang.

Saran untuk kegiatan pertambangan dan pengolahan bijih emas DMP adalah melakukan kajian lebih lanjut untuk model neraca air. Apabila pencegahan pembentukan air asam tambang telah dilakukan, namun masih terbentuk air asam tambang, maka dapat dilakukan penanggulangan terhadap terbentuknya AAT. Penanggulangan dilakukan hingga AAT memenuhi baku mutu lingkungan hidup sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan sebelum dilepas ke badan air permukaan. Penanggulangan terhadap terbentuknya AAT dapat dilakukan secara aktif maupun pasif. Penanggulangan terhadap terbentuknya AAT secara aktif dapat dilakukan dengan penggunaan bahan kimia penetral asam seperti kapur penggunaan metode lainnya seperti perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Sementara penanggulangan secara pasif dapat dilakukan dengan lahan basah, *Open limestone channel* dan penggunaan metode lainnya sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

### DAFTAR PUSTAKA

- Abdelaal, A., Sultan, M., Elhebiry, M., Krishnamurthy, R.V., Sturchio, N., 2021, Integrated Studies to Identify Site-Specific Parameters for Environmentally Benign Mining Operations: A Case Study from the Sukari Gold Mine Egypt, *Science of the Total Environment* 750, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141654>
- Al, T., A., Blowes, D., W., 1999, The Hydrogeology of a Tailings Impoundment Formed by Central Discharge of Thickened Tailings: Implications for Tailings Management, *Journal of Contaminant Hydrology* 38, 489-505.
- Amezega, et al, 2011, A Rich Vein Mining and The Pursuit of Sustainability, *Environ Sci. Tech* 45, 21-26.
- Biddau, R., Cidu, R. 2005 Hydrogeochemical Baseline Studies Prior to Gold Mining: A Case Study in Sardinia (Italy), *Journal of Geochemical Exploration* 86, 61-85, <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.04.001>
- Chotpantararat, S., Thamrongsrisakul, J. 2021 Natural and Anthropogenic Factors Influencing Hydrochemical Characteristics and Heavy Metals in Groundwater Surrounding a Gold Mine, Thailand, *Journal of Asian Earth Sciences* 211, <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.104692>
- Cozma A.I, et al, 2016, Using Natural Tracers to Track The Groundwater Flow In A Mining Area. *Procedia Environmental Sciences* 32 (211-220) <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.026>

Currel M.J, et al, 2017, Problems with the application of hydrogeological science to regulation of Australian mining projects: Carmichael Mine and Doongmabulla Springs. *Journal of Hydrology* 548 (674-682). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.031>

ERMITE Consortium, 2004, *Mining Impacts on The Fresh Water Environment: Technical and Managerial Guidelines for Catchment Scale Management*, In: Younger P.I, Wolkersdorfer, C.H. (Eds), Mine Water Environment, Page S1-S80

Karmadibrata, S. 2013. Review of the Mineral Development in Indonesia, *Procedia Earth and Planetary Science* 6, 6-7, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeps.2013.01.064>

Kirwin, D.,J., Royle, D., Z., Sediment-Hosted Gold Deposits in Southeast Asia, *The Society of Resource Geology* 69 (2), 1-23, <https://doi.org/10.1111/rge.12189>

Lovering, T., G., 1962, *Economic Geology and the Bulletin of The Society of Economic Geologists*, vol. 57, no. 6. 861-889. Colorado: U.S. Geological Survey.

Mudd, G.,M., 2020, Mining and Water Resources, *Encyclopedia of the World's Biomes*, 45-54, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12131-1>

Northey, S.A, Et Al. Water Foot Printing and Mining: Where Are the Limitations and Opportunities, *J. Clean. Prod.* 135, 1098-1116

Resosudarmo, B., P., Resosudarmo, I.A.P., Sarosa, W., Subiman, N.L., 2009, Socioeconomic Conflicts in Indonesia Mining Industry, Cronin, R., Pandya, A. (Eds.), *Exploiting Natural Resources Growth, Instability, and Conflict in the Middle East and Asia*, 33-46, Washington: The Henry L. Stimson Center.

Smith, L. 2015. Hydrogeology, *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09469-0>

The Association of Southeast Asian Nations, 2022, *Strengthening ASEAN Cooperation in Minerals: Development Prospects of ASEAN Minerals Cooperation (DPAMC)*, Jakarta: The ASEAN Secretariat.

Zago M.M., Maximilian F., & Joao EFR., 2020, Groundwater Infiltration in A Gold Mine–A Geoelectrical Investigation Model as An Aid to Dewatering Process Determination. *Journal of Applied Geophysics* Volume 172 Januari 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103909>