



Karakteristik Litologi dan Zonasi Alterasi Hidrotermal Sistem Epitermal Sulfidasi Tinggi pada Daerah Pit X PT. J Resources Bolaang Mongondow

Yunir Tulong^a, Indriati Martha Patuti^b, Ayub Pratama Aris^c

^{a, c}Program Studi Teknik Geologi, Universitas Negeri Gorontalo, Kota Gorontalo, Indonesia

^bProgram Studi Teknik Sipil, Universitas Negeri Gorontalo, Kota Gorontalo, Indonesia

ARTICLE INFO

Sejarah artikel:

Diterima: 15 Mei 2026

Disetujui: 16 Juni 2026

Dipublish: 30 Juni 2026

Keywords:

Alteration Zoning,
Hydrothermal Alteration,
Lithology, Spectral
Analysis, High
Sulphidation Epithermal

Corresponding author:

Yunir Tulong

Email:

yunirtulongjr17@gmail.com

ABSTRACT

Pit X of PT J Resources Bolaang Mongondow is a mineral prospect area that exhibits geological characteristics associated with a high sulphidation epithermal system. This study aims to identify the lithological characteristics and hydrothermal alteration zoning developed within the study area through the integration of geological mapping, petrographic analysis, and Analytical Spectral Device (ASD) spectral analysis. The results indicate that the study area is composed of four lithological units, namely diatrema breccia, tuff, volcanic dacite, and volcanic andesite. Geological structures are dominated by joints trending northwest-southeast to north-south, which act as pathways for hydrothermal fluid circulation and influence alteration distribution. Based on ASD and petrographic analyses, four hydrothermal alteration zones were identified: vuggy silica zone ($\pm 7\%$), massive silica zone ($\pm 29\%$), advanced argillic zone ($\pm 31\%$), and argillic zone ($\pm 33\%$). The alteration assemblages consist of alunite, pyrophyllite, dickite, kaolinite, illite, and smectite. The spatial distribution of these alteration zones reflects progressive changes in the physicochemical conditions of hydrothermal fluids from proximal to distal parts of the system. The occurrence of vuggy silica and advanced argillic alteration, together with characteristic alteration mineral assemblages, indicates the development of a high sulphidation epithermal system within the study area. These findings provide important information regarding lithological characteristics and hydrothermal alteration patterns that can be utilized to support geological interpretation and mineral exploration in the area.

How to cite this article:

Tulong, Y., Patuti, I. M., Aris, A. P. (2026). Karakteristik Litologi dan Zonasi Alterasi Hidrotermal Sistem Epitermal Sulfidasi Tinggi pada Daerah Pit X PT. J Resources Bolaang Mongondow. Journal of Applied Geoscience and Engineering, 5(1), 160-171. <https://doi.org/10.37905/jage.v5i1.39825>

1. PENDAHULUAN

Indonesia termasuk wilayah yang terletak pada jalur tektonik aktif Cincin Api Pasifik (*Pacific Ring of Fire*), yang ditandai oleh tingginya intensitas aktivitas magmatisme dan vulkanisme. Kondisi geologi tersebut menjadikan Indonesia memiliki potensi sumber daya mineral yang melimpah, terutama endapan hidrotermal yang berkaitan dengan busur magmatik. Salah satu jenis endapan yang umum dijumpai pada lingkungan vulkanik adalah sistem epitermal sulfidasi tinggi (*high sulphidation epithermal*), yang terbentuk akibat pengaruh fluida hidrotermal bersifat asam dan umumnya berasosiasi dengan mineralisasi emas serta tembaga (Myaing dkk., 2018; van Leeuwen & Rompo, 2022)

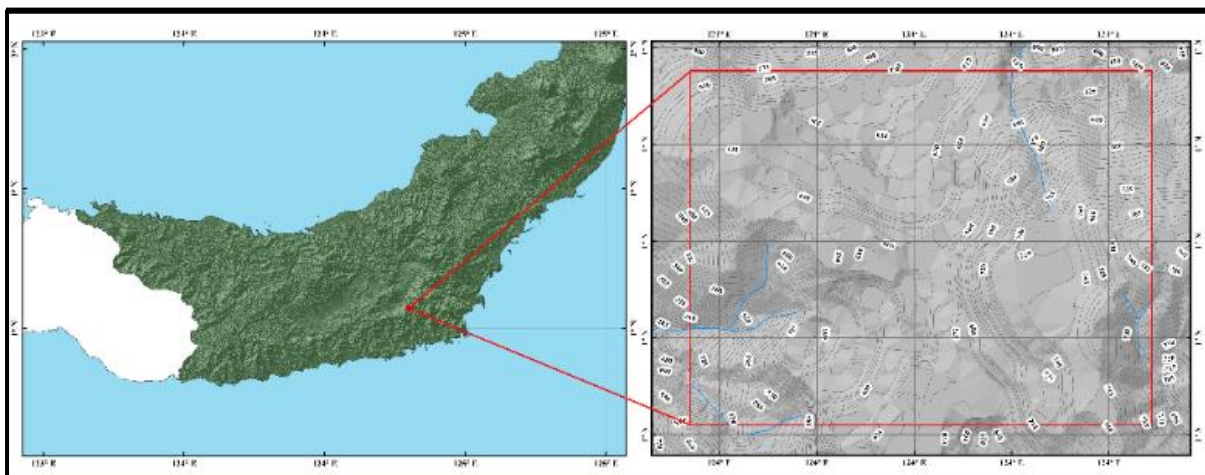
Interaksi antara batuan sampling (*wall rock*) maupun batuan induk (*host rock*) dengan fluida hidrotermal bersuhu tinggi dapat memicu terjadinya proses alterasi hidrotermal. Intensitas dan karakteristik alterasi dipengaruhi oleh temperatur, tekanan, serta kondisi kimia fluida. Proses ini berlangsung dalam sistem terbuka yang bersifat nonisokimia sehingga mengakibatkan perubahan komposisi mineral primer menjadi himpunan mineral sekunder, seperti kuarsa, *alunite*, *kaolinite*, *dickite*, *pyrophyllite*, *illite*, dan *smektite* (Aris dkk., 2022; Pereira dkk., 2024). Pada sistem epitermal sulfidasi tinggi, distribusi mineral alterasi umumnya memperlihatkan pola zonasi hidrotermal yang khas. Pola tersebut memberikan informasi mengenai evolusi fluida hidrotermal dan dapat digunakan sebagai indikator untuk memperkirakan kedekatan suatu daerah terhadap pusat mineralisasi (Titisari dkk., 2021; Listianingrum dkk., 2025).

Berbagai studi terkait sistem epitermal sulfidasi tinggi di Indonesia memperlihatkan bahwa pola persebaran alterasi hidrotermal dipengaruhi oleh karakteristik litologi dan struktur geologi yang berperan sebagai lintasan migrasi fluida hidrotermal. Hardjana (2012) melaporkan bahwa struktur geologi pada Distrik Bakan berperan penting dalam memfasilitasi migrasi fluida hidrotermal yang mengendalikan perkembangan sistem epitermal sulfidasi tinggi. Kondisi tersebut tercermin dari terbentuknya zona alterasi silisik, *advanced argillic*, dan *argillic*. Keberadaan mineral *alunite*, *kaolinite*, *dickite*, dan *pyrophyllite* telah dilaporkan oleh (Moniung dkk. 2025 dan Listianingrum dkk. 2025) sebagai penciri utama sistem epitermal sulfidasi tinggi di daerah Bakan, Sulawesi Utara. Namun, kajian mengenai hubungan antara karakteristik litologi dengan pola distribusi zonasi alterasi hidrotermal pada Pit X PT J Resources Bolaang Mongondow masih terbatas. Dengan demikian, diperlukan penelitian yang lebih rinci untuk memperoleh pemahaman yang lebih baik mengenai evolusi sistem hidrotermal pada daerah tersebut.

Melalui integrasi data pemetaan geologi, analisis petrografi, dan analisis spektral ASD, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik litologi, mineral alterasi, serta pola zonasi alterasi hidrotermal yang berkembang pada daerah Pit X PT J Resources Bolaang Mongondow. Informasi yang dihasilkan diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai karakteristik geologi dan perkembangan alterasi hidrotermal, serta menjadi acuan dalam menginterpretasikan sistem epitermal sulfidasi tinggi pada daerah penelitian.

2. METODE

Lokasi penelitian mencakup daerah Pit X PT J Resources Bolaang Mongondow yang berada dalam wilayah administratif Kabupaten Bolaang Mongondow, Provinsi Sulawesi Utara (Gambar 1).



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

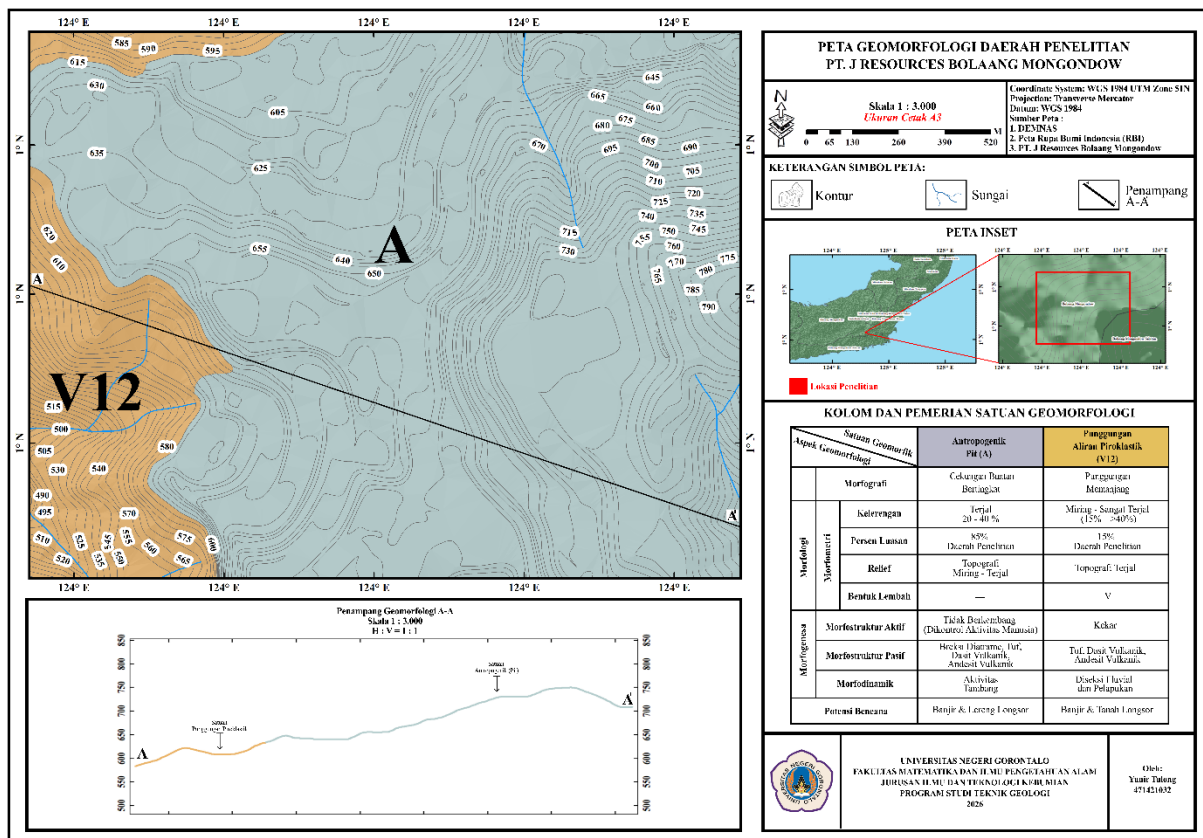
Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan, meliputi studi literatur, pemetaan geologi, pengambilan sampel batuan, analisis laboratorium, dan pengolahan data. Data lapangan diperoleh menggunakan metode *wall mapping* dan *floor mapping* guna mengidentifikasi karakteristik litologi, struktur geologi, serta perkembangan alterasi hidrotermal pada daerah penelitian. Sampel batuan yang representatif selanjutnya dipilih dan digunakan sebagai bahan untuk analisis laboratorium.

Pengamatan petrografi pada sayatan tipis digunakan untuk mengidentifikasi tekstur batuan dan komposisi mineral penyusunnya sebagai dasar penentuan karakteristik litologi. Sementara itu, mineral alterasi dikenali melalui analisis *Analytical Spectral Device* (ASD) pada rentang spektrum *Visible Near Infrared* (VNIR) dan *Short Wave Infrared* (SWIR) dengan memanfaatkan karakteristik absorpsi spektral masing-masing mineral. Selanjutnya, data hasil pemetaan lapangan, petrografi, dan analisis spektral diintegrasikan dan diolah menggunakan *ArcMap 10.8* untuk menyusun peta geologi dan peta zonasi alterasi. Interpretasi akhir dilakukan dengan mengevaluasi hubungan antara litologi, struktur geologi, dan distribusi mineral alterasi sehingga perkembangan sistem epitermal sulfidasi tinggi pada daerah penelitian dapat dipahami secara lebih komprehensif.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Geomorfologi Daerah Penelitian

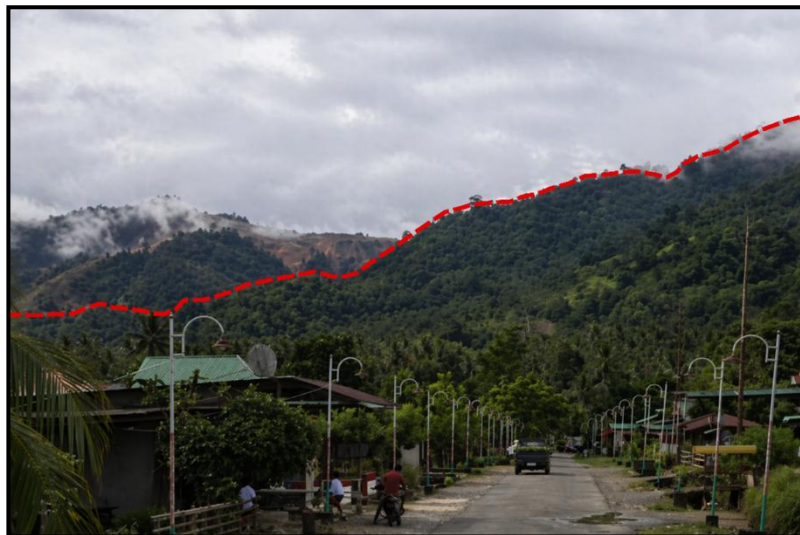
Berdasarkan analisis geomorfologi yang mengacu pada klasifikasi Brahmantyo & Salim (2006); Disastra dkk. (2021); Nugraha dkk. (2022) daerah penelitian tersusun atas dua satuan geomorfologi, yaitu Satuan Antropogenik Pit dan Satuan Punggungan Aliran Piroklastik yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta Geomorfologi Daerah Penelitian yang Menunjukkan Penyebaran Satuan Antropogenik Pit dan Satuan Punggungan Aliran Piroklastik.



Gambar 3. Kenampakan Morfologi Satuan Antropogenik Pit pada Daerah Penelitian



Gambar 4. Kenampakan Morfologi Satuan Punggungan Aliran Piroklastik pada Daerah Penelitian

Sebagian besar daerah penelitian, yaitu sekitar 85%, ditempati oleh Satuan Antropogenik Pit. Satuan geomorfologi ini berkembang sebagai akibat dari aktivitas penambangan terbuka yang membentuk morfologi berupa jenzang tambang (*bench*) dengan kemiringan lereng antara 20–40%. Penyusunnya terdiri atas breksi diatrema, tuf, dasit vulkanik, dan andesit vulkanik. Keberadaan satuan tersebut mencerminkan perubahan bentuk lahan alami yang sepenuhnya dikontrol oleh aktivitas penambangan sehingga menghasilkan bentang alam antropogenik (Gambar 3).

Satuan Punggungan Aliran Piroklastik memiliki sebaran sekitar 15% dari total wilayah penelitian dan dicirikan oleh morfologi punggungan memanjang dengan kemiringan lereng antara 15% hingga lebih dari 40%. Satuan ini tersusun atas batuan vulkanik berupa tuf, dasit vulkanik, dan andesit vulkanik yang merupakan hasil aktivitas vulkanisme purba. Pola perkembangan morfologi punggungan tersebut dipengaruhi oleh karakteristik litologi dan struktur geologi yang mengontrol berlangsungnya proses pelapukan dan erosi (Gambar 4).

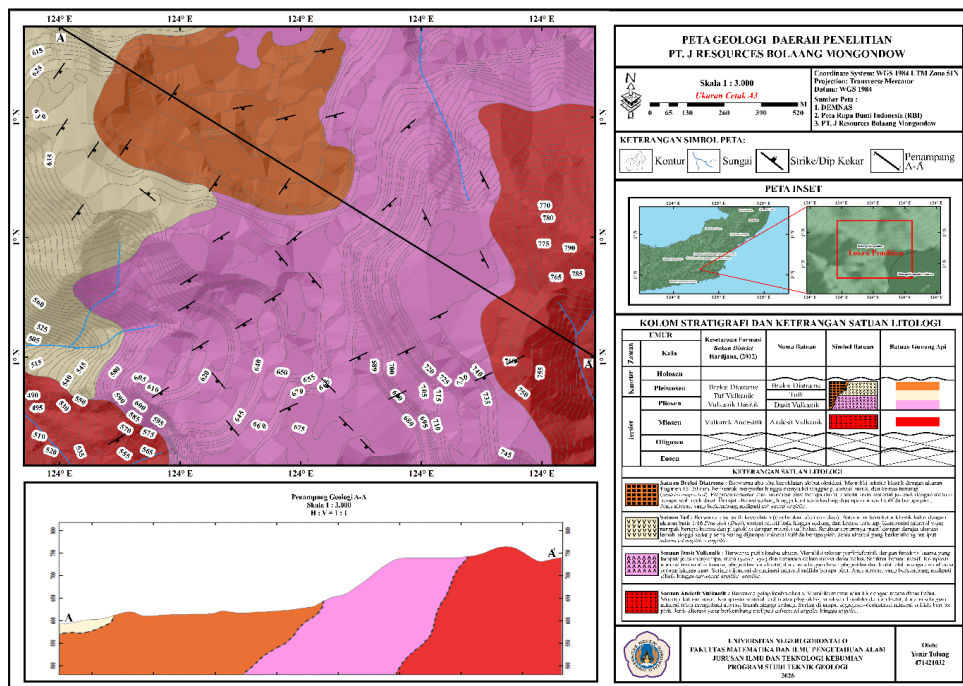
Secara keseluruhan, perkembangan bentang alam pada daerah penelitian mencerminkan pengaruh aktivitas vulkanisme, struktur geologi, dan perubahan morfologi yang diakibatkan oleh kegiatan penambangan. Interaksi ketiga faktor tersebut turut mengontrol distribusi litologi serta pola perkembangan alterasi hidrotermal pada daerah penelitian.

3.2 Stratigrafi Daerah Penelitian

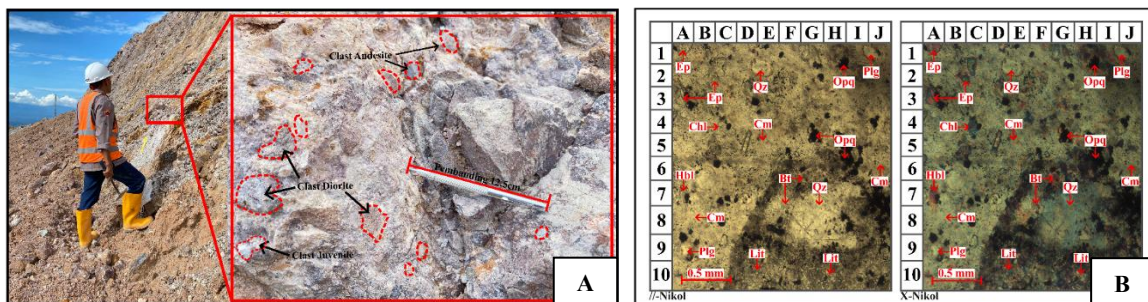
Berdasarkan data hasil pemetaan geologi, daerah penelitian dapat dibagi menjadi empat satuan litologi yang terdiri atas Satuan Breksi Diatrema, Satuan Tuf, Satuan Dasit Vulkanik, dan Satuan Andesit Vulkanik. Klasifikasi satuan batuan tersebut didasarkan pada karakteristik megaskopis, hasil analisis petrografi, hubungan lapangan, serta distribusi litologi yang berkembang pada daerah penelitian. Satuan Dasit Vulkanik menjadi litologi yang paling dominan dengan luas sekitar 48% dari total wilayah penelitian, sedangkan Satuan Andesit Vulkanik, Satuan Tuf, dan Satuan Breksi *Diatrema* masing-masing memiliki proporsi sebesar 24%, 16%, dan 12%. Sebaran litologi daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 5.

1. Satuan Breksi *Diatrema*

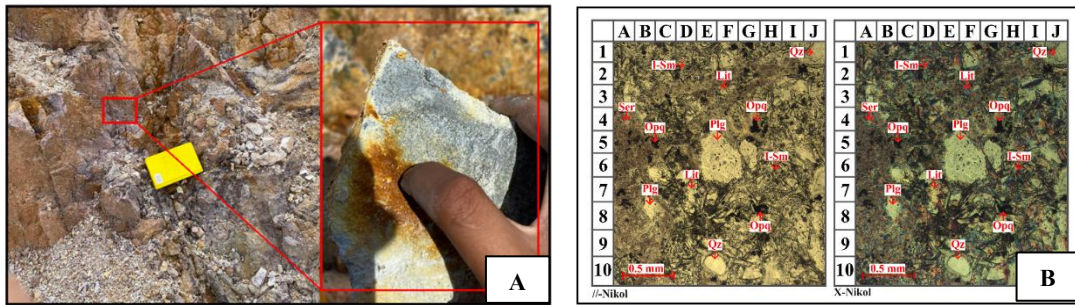
Sekitar 12% wilayah penelitian ditempati oleh Satuan Breksi *Diatrema* yang tersebar pada bagian utara hingga barat laut daerah penelitian. Pengamatan megaskopis menunjukkan bahwa batuan ini berwarna abu-abu hingga coklat dengan tekstur klastik, ukuran fragmen berkisar antara 64 mm hingga lebih dari 64 mm, serta bentuk fragmen menyudut sampai menyudut tanggung dengan kemas tertutup (*matrix-supported*). Fragmen-fragmen tersebut umumnya tersusun oleh batuan diorit hingga andesit yang tertanam dalam matriks vulkanik. Analisis petrografi memperlihatkan keberadaan mineral kuarsa, plagioklas, hornblende, biotit, fragmen litik, serta mineral lempung. Asosiasi mineral tersebut menunjukkan bahwa batuan telah mengalami alterasi hidrotermal dengan tingkat perkembangan sedang hingga kuat. Kenampakan singkapan maupun sayatan tipis breksi diatrema dapat diamati pada Gambar 6.



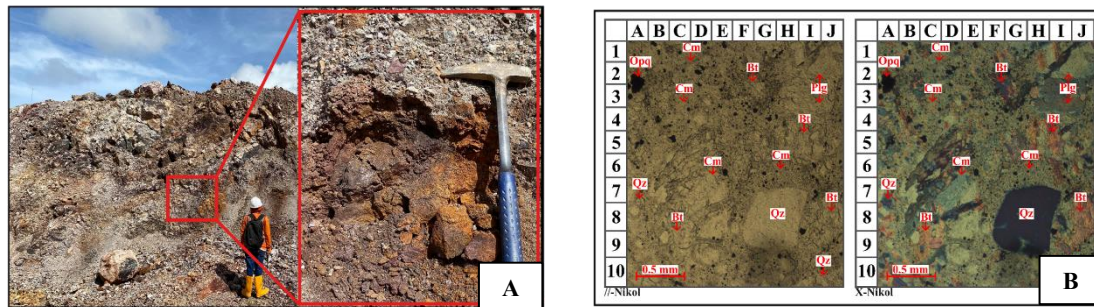
Gambar 5. Peta Geologi Daerah Penelitian



Gambar 6. Stasiun Pengamatan Satuan Breksi *Diatrema* (A), Sayatan Tipis Satuan Breksi *Diatrema* (B)



Gambar 7. Stasiun Pengamatan Satuan Tuf (A), Sayatan Tipis Satuan Tuf (B)



Gambar 8. Stasiun Pengamatan Satuan Dasit Vulkanik (A), Sayatan Tipis Satuan Dasit Vulkanik (B)

2. Satuan Tuf

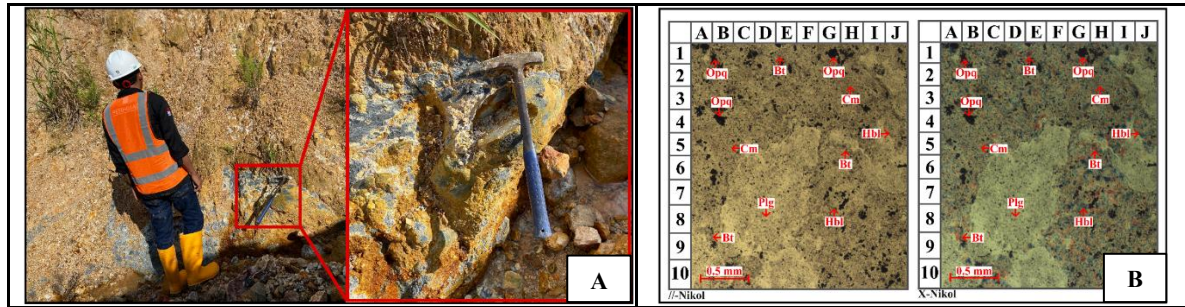
Sekitar 16% wilayah penelitian ditempati oleh Satuan Tuf yang tersebar pada bagian barat laut hingga barat daerah penelitian. Pengamatan megaskopis menunjukkan bahwa batuan ini berwarna abu-abu hingga putih kecoklatan, berukuran butir abu halus, dan memiliki struktur masif. Hasil pengamatan petrografi memperlihatkan bahwa batuan tersusun atas kuarsa, plagioklas, fragmen litik tuf, serta mineral alterasi berupa *illite-smectite* dan *serisite*. Asosiasi mineral tersebut mengindikasikan bahwa batuan induk telah mengalami proses alterasi hidrotermal. Kondisi singkapan dan kenampakan sayatan tipis Satuan Tuf dapat diamati pada Gambar 7.

3. Satuan Dasit Vulkanik

Dengan luas sekitar 48% dari total wilayah penelitian, Satuan Dasit Vulkanik menjadi litologi yang paling dominan dan tersebar pada bagian selatan, tengah, hingga utara daerah penelitian. Pengamatan megaskopis menunjukkan bahwa batuan ini memiliki warna putih keabu-abuan hingga kecoklatan dengan tekstur porfiritik-afanitik yang dicirikan oleh kehadiran fenokris kuarsa (*quartz eye*) di dalam massa dasar halus. Analisis petrografi memperlihatkan bahwa mineral penyusun utama terdiri atas kuarsa, plagioklas, dan biotit, yang sebagian telah mengalami alterasi menjadi mineral lempung. Kehadiran mineral opak yang diinterpretasikan sebagai pirit menunjukkan bahwa satuan ini telah dipengaruhi oleh aktivitas hidrotermal. Kondisi singkapan dan kenampakan sayatan tipis dasit vulkanik dapat diamati pada Gambar 8.

4. Satuan Andesit Vulkanik

Sekitar 24% wilayah penelitian ditempati oleh Satuan Andesit Vulkanik yang tersebar pada bagian timur-tenggara dan barat daya daerah penelitian. Pengamatan megaskopis menunjukkan bahwa batuan ini dicirikan oleh warna abu-abu gelap, tekstur afanitik hingga porfiritik, serta struktur masif. Analisis petrografi memperlihatkan keberadaan plagioklas, hornblende, dan biotit sebagai mineral penyusun utama, yang sebagian telah mengalami ubahan menjadi mineral lempung. Kehadiran mineral opak yang diinterpretasikan sebagai pirit menunjukkan bahwa proses hidrotermal turut mempengaruhi perkembangan satuan ini. Kondisi singkapan dan kenampakan sayatan tipis andesit vulkanik dapat diamati pada Gambar 9.



Gambar 9. Stasiun Pengamatan Satuan Andesit Vulkanik (A), Sayatan Tipis Satuan Andesit Vulkanik (B)

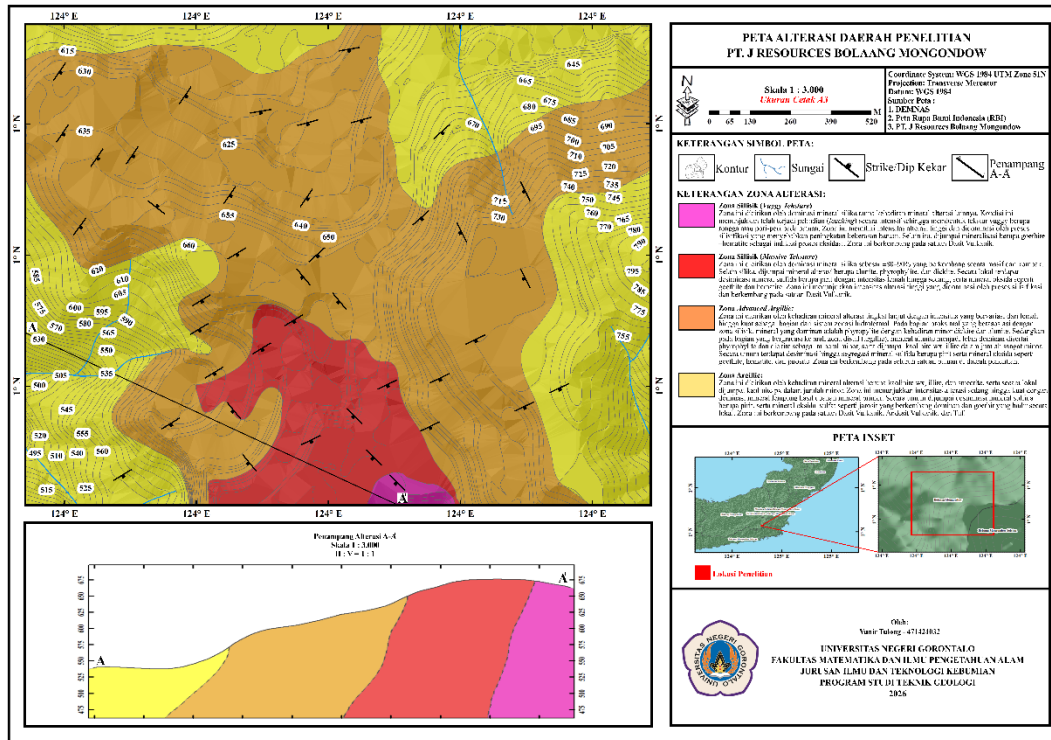
Keberadaan asosiasi litologi berupa andesit, dasit, tuf, dan breksi diatrema menunjukkan bahwa daerah penelitian berkembang dalam lingkungan vulkanik yang berkaitan erat dengan aktivitas magmatisme dan hidrotermal. Karakteristik tersebut merupakan salah satu ciri yang umum dijumpai pada sistem epitermal sulfidasi tinggi di Distrik Bakan. Hardjana (2012) melaporkan bahwa sistem epitermal sulfidasi tinggi di wilayah tersebut berkembang pada batuan vulkanik berkomposisi menengah hingga asam yang tersusun atas tuf, andesit, dasit, dan breksi diatrema. Kemiripan karakteristik litologi tersebut mengindikasikan bahwa batuan penyusun daerah penelitian berfungsi sebagai batuan inang (*host rock*) yang memiliki peranan penting dalam perkembangan alterasi hidrotermal dan pembentukan mineralisasi pada sistem epitermal sulfidasi tinggi.

3.3 Struktur Geologi Daerah Penelitian

Berdasarkan hasil pengukuran lapangan, orientasi kekar dominan menunjukkan arah barat-laut–tenggara (NW–SE) hingga utara–selatan (N–S). Pola tersebut relatif sejalan dengan struktur regional yang berkembang pada Distrik Bakan. Keberadaan rekahan meningkatkan permeabilitas batuan dan berperan sebagai jalur utama migrasi fluida hidrotermal yang mengontrol perkembangan alterasi pada sistem epitermal. Sillitoe (2015) menjelaskan bahwa struktur rekahan dan zona permeabel merupakan elemen penting dalam evolusi sistem epitermal karena berfungsi sebagai jalur naiknya fluida hidrotermal menuju zona alterasi dan mineralisasi. Pada Distrik Bakan, Hardjana (2012); Christi dkk. (2024) juga melaporkan bahwa struktur berarah NW–SE hingga N–S mengontrol distribusi alterasi dan mineralisasi emas. Keberadaan struktur berarah NW–SE hingga N–S pada daerah penelitian menunjukkan bahwa struktur tersebut berperan sebagai jalur permeabel bagi migrasi fluida hidrotermal. Kondisi ini mengakibatkan perkembangan alterasi hidrotermal cenderung mengikuti zona-zona rekahan yang memiliki permeabilitas tinggi. Dengan demikian, struktur geologi menjadi salah satu faktor utama yang mengontrol distribusi alterasi pada sistem epitermal sulfidasi tinggi di daerah penelitian. Dengan demikian, struktur kekar yang berkembang pada daerah penelitian diinterpretasikan memiliki peranan penting dalam mengontrol persebaran alterasi hidrotermal dan perkembangan sistem epitermal sulfidasi tinggi pada daerah penelitian.

3.4 Alterasi Hidrotermal Daerah Penelitian

Berdasarkan hasil pemetaan geologi, analisis petrografi, dan analisis spektral ASD, daerah penelitian menunjukkan perkembangan alterasi hidrotermal yang cukup intensif. Mineral alterasi yang teridentifikasi meliputi *alunite*, *pyrophyllite*, *dickite*, *kaolinite*, *illite-smectite*, serisit, klorit, dan epidot. Kehadiran himpunan mineral tersebut menunjukkan karakteristik alterasi yang umum berkembang pada sistem epitermal sulfidasi tinggi, yang dicirikan oleh asosiasi mineral kuarsa, *alunite*, *pyrophyllite*, *dickite*, *kaolinite*, serta mineral lempung lainnya sebagai hasil interaksi fluida hidrotermal asam dengan batuan induk (Simmons dkk., 2005; Thomsen, 2015). Berdasarkan karakteristik himpunan mineral alterasi yang berkembang, daerah penelitian dibagi menjadi empat zona alterasi hidrotermal, yaitu zona silisik bertekstur *vuggy* ($\pm 7\%$), zona silisik bertekstur *massive* ($\pm 29\%$), zona *advanced argillic* ($\pm 31\%$), dan zona *argillic* ($\pm 33\%$). Zonasi tersebut menunjukkan pola alterasi yang umum dijumpai pada sistem epitermal sulfidasi tinggi di wilayah Sulawesi Utara dan daerah prospek emas hidrotermal lainnya (Azzaman dkk., 2022; Tangkawarow dkk., 2025). Peta alterasi daerah penelitian ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Peta Alterasi Zona Alterasi Daerah Penelitian

1. Zona Alterasi Silisik Bertekstur Vuggy

Zona silisik bertekstur *vuggy* tersebar pada bagian selatan daerah penelitian dan mencakup sekitar ±7% dari total luas daerah penelitian. Zona ini berkembang pada satuan dasit vulkanik dan teridentifikasi pada sampel Y.032.MRC dan Y.033.MRC. Hasil analisis ASD menunjukkan dominasi mineral silika tanpa kehadiran mineral alterasi lainnya, yang mengindikasikan telah terjadinya proses pelindian (*leaching*) secara intensif terhadap mineral primer sehingga menyisakan residu silika. Kehadiran tekstur *vuggy* menunjukkan bahwa zona ini terbentuk pada kondisi fluida hidrotermal yang sangat asam (pH 1–3) dengan kisaran temperatur sekitar 200–300°C. Karakteristik tersebut merupakan ciri khas zona proksimal pada sistem epitermal sulfidasi tinggi yang umumnya berkembang di dekat pusat *upflow* fluida hidrotermal (Corbett & Leach, 1998; Titisari dkk., 2021). Keberadaan zona silisik bertekstur *vuggy* pada daerah penelitian menunjukkan kesamaan dengan model alterasi sistem epitermal sulfidasi tinggi yang dicirikan oleh dominasi silika residu akibat pelarutan intensif mineral primer oleh fluida magmatik asam. Oleh karena itu, zona ini diinterpretasikan sebagai bagian dari zona proksimal sistem epitermal sulfidasi tinggi yang berkembang pada daerah penelitian. Kenampakan sampel pada zona alterasi silisik *vuggy texture* ditunjukkan pada gambar 11.



Gambar 11. Sampel pada Zona Alterasi Silisik Vuggy Texture



Gambar 12. Sampel pada Zona Alterasi Silisik *Massive Texture*

2. Zona Alterasi Silisik Bertekstur *Massive*

Zona alterasi silisik bertekstur masif tersebar pada bagian tengah hingga selatan daerah penelitian dan mencakup sekitar $\pm 29\%$ dari total luas daerah penelitian. Zona ini dicirikan oleh dominasi mineral silika sebesar $\pm 80\text{--}90\%$ dengan asosiasi *alunite* dan *pyrophyllite* \pm *dickite* berdasarkan hasil analisis ASD. Kehadiran himpunan mineral tersebut menunjukkan proses silisifikasi intensif pada kondisi fluida hidrotermal sangat asam (pH 1–3) dengan temperatur sekitar 180–300°C. Menurut Corbett & Leach (1998), karakteristik tersebut merupakan penciri zona silisik pada sistem epitermal sulfidasi tinggi. Hasil penelitian ini juga menunjukkan kemiripan dengan zona silisifikasi pada endapan epitermal di Selogiri, Jawa Tengah, yang dicirikan oleh dominasi silika dan asosiasi mineral alterasi suhu tinggi sebagai hasil interaksi fluida hidrotermal asam dengan batuan vulkanik Sutarto dkk. (2016). Oleh karena itu, zona ini diinterpretasikan sebagai bagian dari zona proksimal hingga transisi sistem epitermal sulfidasi tinggi pada daerah penelitian. Kenampakan sampel pada zona alterasi silisik *massive texture* ditunjukkan pada gambar 12.

3. Zona Alterasi *Advanced Argillic*

Zona alterasi *advanced argillic* tersebar pada bagian tenggara, tengah hingga barat laut daerah penelitian dengan luasan sekitar $\pm 31\%$. Zona ini dicirikan oleh kehadiran mineral *alunite*, *pyrophyllite* \pm *dickite*, serta *kaolinite* *wx-illite* dalam jumlah minor berdasarkan hasil analisis ASD. Asosiasi mineral tersebut menunjukkan kondisi fluida hidrotermal yang sangat asam (pH 1–3) pada kisaran temperatur sekitar 150–300°C. Selain itu, dijumpai mineral pirit, goetit, hematit, dan jarosit yang mengindikasikan intensitas alterasi yang tinggi. Karakteristik himpunan mineral alterasi tersebut sejalan dengan zona *advanced argillic* pada sistem epitermal sulfidasi tinggi yang dicirikan oleh kehadiran mineral *alunite*, *kaolinit*, *dickite*, dan *pyrophyllite* sebagai hasil interaksi fluida hidrotermal asam dengan batuan induk (Arifin, 2013; Titisari dkk., 2021). Menurut Corbett & Leach (1998) zona *advanced argillic* umumnya berkembang sebagai zona transisi antara alterasi silisik pada bagian proksimal dan alterasi argilik pada bagian distal. Oleh karena itu, zona alterasi pada daerah penelitian diinterpretasikan sebagai zona *advanced argillic* yang berkembang dalam sistem epitermal sulfidasi tinggi. Kenampakan sampel pada zona alterasi *advanced argillic* ditunjukkan pada gambar 13.



Gambar 13. Sampel pada Zona Alterasi *advanced argillic*



Gambar 14. Sampel pada Zona Alterasi *argillic*

4. Zona Alterasi *Argillic*

Zona alterasi *argillic* tersebar pada bagian luar daerah penelitian dan mencakup sekitar $\pm 33\%$ dari total luas daerah penelitian. Zona ini dicirikan oleh dominasi mineral *kaolinite wx*, *illite*, dan *smectite* berdasarkan hasil analisis ASD dan pengamatan petrologi, dengan kehadiran *kaolinite px* sebagai mineral minor. Selain itu, dijumpai mineral pirit, jarosit, dan goetit yang mengindikasikan proses alterasi hidrotermal dengan intensitas sedang hingga kuat. Asosiasi mineral tersebut menunjukkan kondisi fluida hidrotermal asam hingga mendekati netral pada kisaran temperatur sekitar 100–200°C. Kehadiran mineral lempung berupa *kaolinite*, *illite*, dan *smectite* menunjukkan perkembangan alterasi argilik yang umum terbentuk pada bagian distal sistem hidrotermal akibat interaksi fluida hidrotermal dengan batuan vulkanik pada temperatur yang relatif lebih rendah. Karakteristik tersebut sejalan dengan himpunan mineral alterasi argilik yang berkembang pada sistem sulfidasi tinggi yang dicirikan oleh asosiasi mineral lempung hasil perubahan kondisi fisik dan kimia fluida hidrotermal (Bensaman dkk., 2024). Berdasarkan klasifikasi (Corbett & Leach (1998), zona ini diinterpretasikan sebagai zona distal sistem epitermal sulfidasi tinggi pada daerah penelitian. Kenampakan sampel pada zona alterasi *argillic* ditunjukkan pada gambar 14.

Pola distribusi keempat zona alterasi tersebut menunjukkan perkembangan zonasi alterasi yang sistematis dari bagian proksimal menuju bagian distal sistem hidrotermal. Zona silisik bertekstur *vuggy* dan silisik masif berkembang pada bagian yang lebih dekat terhadap pusat *upflow* fluida hidrotermal, sedangkan zona *advanced argillic* dan *argillic* berkembang ke arah luar sebagai respons terhadap perubahan temperatur, pH, serta komposisi fluida hidrotermal. Pola zonasi tersebut merupakan karakteristik yang umum dijumpai pada sistem epitermal sulfidasi tinggi dan menunjukkan evolusi fluida hidrotermal dari kondisi sangat asam menuju kondisi yang relatif lebih netral.

4. KESIMPULAN

Daerah penelitian tersusun atas empat satuan litologi, yaitu breksi diatrema, tuf, dasit vulkanik, dan andesit vulkanik, dengan dasit vulkanik sebagai litologi yang paling dominan. Struktur geologi yang berkembang didominasi oleh kekar berarah barat-laut–tenggara hingga utara–selatan yang berperan sebagai jalur permeabilitas fluida hidrotermal dan mengontrol persebaran alterasi pada batuan.

Berdasarkan integrasi data pemetaan geologi, analisis petrografi, dan analisis spektral ASD, daerah penelitian menunjukkan perkembangan empat zona alterasi hidrotermal, yaitu zona silisik bertekstur *vuggy* ($\pm 7\%$), zona silisik bertekstur *massive* ($\pm 29\%$), zona *advanced argillic* ($\pm 31\%$), dan zona *argillic* ($\pm 33\%$). Zona alterasi tersebut dicirikan oleh kehadiran mineral *alunite*, *pyrophyllite*, *dickite*, *kaolinite*, *illite*, dan *smectite* yang menunjukkan perubahan kondisi fisik dan kimia fluida hidrotermal dari bagian proksimal menuju distal sistem.

Karakteristik litologi vulkanik, keberadaan struktur rekahan sebagai jalur sirkulasi fluida, serta berkembangnya zonasi alterasi yang tersusun dari zona silisik hingga *argillic* menunjukkan bahwa daerah penelitian merupakan bagian dari sistem epitermal sulfidasi tinggi (*High Sulphidation Epithermal*).

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. J Resources Bolaang Mongondow yang telah memberikan izin penelitian, dukungan data, serta fasilitas selama kegiatan penelitian berlangsung di daerah Pit X. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Universitas Negeri Gorontalo khususnya Program Studi Teknik Geologi atas dukungan akademik dan fasilitas selama proses penelitian dan penyusunan jurnal ini. Penulis turut mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing atas bimbingan akademik serta dukungan pendanaan publikasi artikel ilmiah ini hingga dapat diselesaikan dan diajukan ke jurnal.

6. REFERENSI

- Arifin, A. (2013). Tipe Endapan Epitermal Daerah Prospek Bakau Kecamatan Lolayan Kabupaten Bolaang Mongondow Propinsi Sulawesi Utara. *Jurnal Ilmiah MTG*, 6(1), 11–13.
- Aris, A. P., Mawaleda, M., Tonggiroh, A., Ninasafitri, N., & Sukamto, K. (2022). Alterasi dan Mineralisasi Daerah Kolaka Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara. *Jurnal GEOMining*, 3(2), 57–66. <https://doi.org/10.33387/geomining.v3i2.5425>
- Azzaman, M. A., Idrus, A., Titisari, A. D., & Ambarsari, I. S. (2022). *Identifikasi Litologi dan Struktur Serta Kaitannya Terhadap Mineralisasi Emas di Daerah Rataatok Selatan Minahasa Tenggara Sulawesi Utara*. 2(2).
- Bensaman, B., Rosana, M. F., & Yuningsih, E. T. (2024). High Sulphidation Mineralization and Advanced Argillic Alteration within Concealed Gajah Tidur Porphyry, Grasberg District, Papua. *Indonesian Journal on Geoscience*, 11(1), 15–33. <https://doi.org/10.17014/ijog.11.1.15-33>
- Brahmantyo, B., & Salim, B. (2006). Klasifikasi Bentuk Muka Bumi (Landform) untuk Pemetaan Geomorfologi pada Skala 1:25.000 dan Aplikasinya untuk Penataan Ruang. *Jurnal Geoaplika*, 1(2), 71–78. <https://doi.org/10.31227/osf.io/8ah6v>
- Christi, G. D., Sulistiyono, S., Handayani, T., & Widhiyatna, D. (2024). Analisis Alterasi dan Mineralisasi Berdasarkan Pengamatan Megaskopik dan Mikroskopik pada Daerah Prospek X Kabupaten Bolaang Mongondow, Sulawesi Utara: Alteration and Mineralisation Analysis Based On Observation Of Megascopic and Microscopic On Prospect “X” In Bolaang Mongondow Regency At North Sulawesi. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 19(1), 1–10. <https://doi.org/10.47599/bsdg.v19i1.436>

- Corbett, G. J., & Leach, T. M. (1998). *Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization*. Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/SP.06>
- Disastra, D. A., Sutarto, & Sutanto. (2021). Geologi dan Pengayaan Endapan Mineral Timah dan Unsur Tanah Jarang (Utj) Sekunder Placer dan Tailing Daerah Cambai Selatan dan Sekitarnya, Kabupaten Bangka Tengah, Provinsi Bangka Belitung. *Jurnal Ilmiah Geologi Pangea*, 8(6), 40–43.
- Hardjana, I. (2012). The Discovery, Geology and Exploration of the High Sulphidation Au-Mineralization System in the Bakan District, North Sulawesi. *Proceedings of the Sulawesi Mineral Resources 2011 Seminar*, 1, 161–186.
- Listianingrum, W., Trianda, O., Nugrahini, A., & Babarsari, J. (2025). Tinggi Pada Pit “X” PT. J Resources Bolaang. *GEODA*, 4(2).
- Moniung, G. J., Isnawan, D., & Astuti, T. L. R. (2025). Studi Zona Alterasi Daerah X, Kecamatan Lolayan, Kabupaten Bolaang Mongondow, Provinsi Sulawesi Utara Berdasarkan Analytical Spectral Devices (ASD). *GEODA*, 04(01).
- Myaing, Y. Y., Idrus, A., & Titisari, A. D. (2018). Fluid Inclusion Study of The Tumpangpitu High Sulfidation Epithermal Gold Deposit in Banyuwangi District, East Java, Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 3(1), 8. <https://doi.org/10.24273/jgeet.2018.3.01.1039>
- Nugraha, A. M. S., Hall, R., & BouDagher-Fadel, M. (2022). The Celebes Molasse: A revised Neogene stratigraphy for Sulawesi, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 228, 105140. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2022.105140>
- Pereira, M. L., Zanon, V., Fernandes, I., Pappalardo, L., & Viveiros, F. (2024). Hydrothermal alteration and physical and mechanical properties of rocks in a volcanic environment: A review. *Earth-Science Reviews*, 252, 104754. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104754>
- Sillitoe, R. H. (2015). Epithermal paleosurfaces. *Mineralium Deposita*, 50(7), 767–793. <https://doi.org/10.1007/s00126-015-0614-z>
- Simmons, S. F., White, N. C., & John, D. A. (2005). Geological Characteristics of Epithermal Precious and Base Metal Deposits. Dalam J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb, & J. P. Richards, *One Hundredth Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/AV100.16>
- Sutarto, S., Idrus, A., Harijoko, A., Setijadji, L. D., Meyer, F. M., Sindern, S., & Putranto, S. (2016). Hydrothermal Alteration and Mineralization of the Randu Kuning Porphyry Cu-Au and Intermediate Sulphidation Epithermal Au-Base Metals Deposits in Selogiri, Central Java, Indonesia. *Journal of Applied Geology*, 1(1), 1–18. <https://doi.org/10.22146/jag.26951>
- Tangkawarow, A. B., Wirakusumah, A. D., & Rham, D. (2025). Identifikasi Tipe Cebakan Bijih di Area Pit Ars, Pt J Resources Bolaang Mongondow, Sulawesi Utara. *Journal of Integrated Applied Geoscience, Mining, and Metallurgy*, 2(1), 111–123.
- Thomsen, M. (2015). *High Sulphidation Gold Deposits—A Summary* (hlm. 3) [Report]. North American Strategic Minerals Inc. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2302.1289>
- Titisari, A. D., Pratomo, S. U., & Idrus, A. (2021). Hydrothermal Alteration of High Sulfidation Epithermal Deposits in Secang Area, Tulungagung, East Java, Indonesia. *Journal of Applied Geology*, 5(2), 73. <https://doi.org/10.22146/jag.55235>
- van Leeuwen, T. M., & Rompo, I. (2022). *High Sulfidation Au (-Ag-Cu) Deposits in Indonesia: A Review*. Indonesian Association of Geologists (IAGI).