JURNAL ENTROPI

Volume 21 Nomor 2, September 2026

p-ISSN: 1907-1965, e-ISSN: XXXX-XXXX

Journal Homepage: http://ejurnal.ung.ac.id/index.php/je



Kajian Mineralogi dan Interpretasi Geokimia Batuan Terindikasi Emas Berdasarkan Karakteristik Fisik

Dea Putri[1], La Alio[1], Kostiawan Sukamto[1], Akram La Kilo[1*], Wiwin Rewini Kunusa[1], Erni Mohamad[1]

[1]Universitas Negeri Gorontalo, Gorontalo 96554, Indonesia

*Corresponding author: akram@ung.ac.id

DOI: https://doi.org/10.34312/je.v21i2.42754

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengkaji karakteristik makroskopik batuan terindikasi emas serta menginterpretasikan kemungkinan proses mineralisasi hidrotermal berdasarkan ciri fisiknya. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif melalui observasi makroskopik terhadap tiga sampel batuan, yaitu Kem 5, Kem 6, dan Kem 7, dari wilayah pertambangan emas tradisional Bulagidun dan Labuton, Kabupaten Buol, Sulawesi Tengah. Pengamatan mencakup warna, tekstur, kilap, rekahan, keberadaan urat kuarsa, dan ciri oksidasi. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa Kem 5 memperlihatkan urat kuarsa dan material berkilap kuning metalik yang diduga berkaitan dengan mineral sulfida. Kem 6 didominasi warna cokelat kemerahan yang mengindikasikan kemungkinan oksidasi mineral pembawa besi, sedangkan Kem 7 menunjukkan rekahan, urat kuarsa, kilap metalik, dan iridesensi pada permukaan batuan. Karakteristik tersebut memberikan indikasi awal kemungkinan keterkaitan batuan dengan aktivitas hidrotermal dan perubahan mineral akibat oksidasi. Namun, pengamatan makroskopik belum dapat memastikan jenis mineral, tipe endapan, maupun kadar emas. Oleh karena itu, diperlukan analisis mineralogi dan geokimia instrumental untuk memverifikasi interpretasi awal tersebut.

Kata kunci: Mineralogi; Geokimia; Mineralisasi Emas; Hidrotermal.

Abstract

This study aimed to examine the macroscopic characteristics of rocks showing indications of gold mineralization and interpret possible hydrothermal mineralization processes based on their physical features. A descriptive qualitative approach was applied through macroscopic observations of three rock samples, namely Kem 5, Kem 6, and Kem 7, from traditional gold mining areas in Bulagidun and Labuton, Buol Regency, Central Sulawesi, Indonesia. The observations focused on color, texture, luster, fractures, quartz veins, and oxidation features. Kem 5 exhibited quartz veins and yellow metallic-lustered material potentially associated with sulfide minerals. Kem 6 was characterized by reddish-brown coloration, suggesting possible oxidation of iron-bearing minerals, whereas Kem 7 displayed fractures, quartz veins, metallic luster, and surface iridescence. These features provide preliminary indications of possible hydrothermal activity and mineral alteration through oxidation. However, macroscopic observations alone cannot conclusively identify mineral species, determine deposit types, or establish gold concentrations. Therefore, further instrumental mineralogical and geochemical analyses are required to verify these preliminary interpretations.

Keywords: *Mineralogy; Geochemistry; Gold Mineralization; Hydrothermal.*

The format cites this article in APA style:

Putri, D., Alio, L., Sukamto, K., La Kilo, A., Kunusa, W. R., & Mohamad, E. (2026). Kajian Mineralogi dan Interpretasi Geokimia Batuan Terindikasi Emas Berdasarkan Karakteristik Fisik. *Jurnal Entropi*, *21*(2), 96-106. https://doi.org/10.34312/je.v21i2.42754

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan wilayah yang memiliki potensi mineralisasi emas dan tembaga yang berkaitan dengan perkembangan aktivitas magmatisme dan tektonik. Carlile dan Mitchell (1994)

Copyright © 2026 Author (s) | Under the licensed under CC BY 4.0 International License |

Received: 11-11-2026 | Revised: 15-11-2026 | Accepted: 20-11-2026 | Available online: 21-11-2026

menjelaskan bahwa sistem mineralisasi emas dan tembaga di Indonesia berkembang pada berbagai lingkungan busur magmatik dengan karakteristik geologi yang berbeda. Salah satu wilayah yang memiliki indikasi mineralisasi tersebut adalah Bulagidun, Kabupaten Buol, Sulawesi Tengah. Lubis et al. (1994) melaporkan bahwa prospek Bulagidun merupakan sistem mineralisasi tembaga-emas (Cu–Au) yang berkaitan dengan intrusi batuan, breksi hidrotermal, serta alterasi mineral. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa wilayah Bulagidun memiliki karakteristik geologi yang relevan untuk dikaji dalam konteks mineralisasi hidrotermal.

Proses pembentukan mineralisasi hidrotermal dapat berlangsung melalui interaksi antara fluida pembawa unsur logam dan batuan yang dilaluinya. Interaksi tersebut dapat menyebabkan perubahan mineralogi, tekstur, serta komposisi kimia batuan. Ernowo et al (2022) melaporkan bahwa proses alterasi hidrotermal pada endapan emas Awak Mas di Sulawesi melibatkan perubahan mineral akibat interaksi fluida dengan batuan induk. Penelitian Kiray dan Cengiz (2024) juga menunjukkan bahwa alterasi hidrotermal dapat dikenali melalui karakteristik mineralogi dan petrografi yang didukung analisis geokimia. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan pentingnya kajian karakteristik batuan dalam memahami proses mineralisasi, sekaligus menunjukkan perlunya pengujian laboratorium untuk memastikan jenis dan intensitas alterasi.

Keberadaan urat kuarsa, mineral sulfida, dan rekahan batuan merupakan karakteristik yang dapat dijumpai pada berbagai sistem mineralisasi emas. Mulja dan Nur Heriawan (2022) melaporkan hubungan antara alterasi hidrotermal dan mineralisasi pada endapan emas epitermal Miwah di Aceh. Sementara itu, Ai Zamruddin et al. (2023) menunjukkan bahwa mineral sulfida, khususnya pirit dan arsenopirit, dapat berasosiasi dengan mineralisasi emas, tetapi karakteristik dan kandungan unsur di dalam mineral tersebut perlu ditentukan melalui analisis mineralogi dan geokimia. Ge et al. (2023) juga menjelaskan adanya hubungan antara urat kuarsa, mineral sulfida, dan perubahan batuan pada sistem mineralisasi emas. Dengan demikian, pengamatan karakteristik fisik dapat memberikan informasi awal mengenai kemungkinan keberadaan mineralisasi, tetapi belum cukup untuk memastikan identitas mineral maupun kandungan emas.

Pada kegiatan pertambangan emas tradisional, pengenalan batuan yang diduga berkaitan dengan mineralisasi sering dilakukan melalui pengamatan fisik, seperti warna, kilap, tekstur, urat kuarsa, dan perubahan warna akibat oksidasi. Pengamatan tersebut dapat menjadi tahap awal dalam mendeskripsikan karakteristik sampel batuan. Namun, kemiripan warna dan kilap antara beberapa jenis mineral dapat menyebabkan ketidakpastian dalam identifikasi. Oleh karena itu, interpretasi berdasarkan ciri makroskopik perlu dibedakan dari hasil identifikasi mineral secara definitif.

Penelitian sebelumnya telah memberikan informasi mengenai sistem mineralisasi Cu–Au di Bulagidun. Meskipun demikian, dokumentasi perbandingan karakteristik makroskopik sampel batuan dari titik penambangan tradisional tetap diperlukan sebagai informasi pendahuluan pada lokasi pengamatan yang dikaji. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan mengkaji karakteristik makroskopik batuan Kem 5, Kem 6, dan Kem 7 serta menginterpretasikan kemungkinan proses geokimia yang berkaitan dengan karakteristik fisik yang teramati. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi informasi awal untuk mendukung analisis mineralogi dan geokimia yang lebih lanjut.

METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif melalui pengamatan makroskopik terhadap karakteristik fisik batuan dan kajian literatur ilmiah. Pendekatan ini digunakan untuk

mendeskripsikan ciri batuan yang teramati serta menyusun interpretasi awal mengenai kemungkinan keberadaan mineral sulfida, proses oksidasi, dan aktivitas hidrotermal. Penelitian ini tidak melakukan identifikasi mineral secara instrumental pada data yang dibahas dalam artikel.

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama tiga bulan di wilayah pertambangan emas tradisional Desa Bulagidun dan Labuton, Kabupaten Buol, Provinsi Sulawesi Tengah. Kegiatan penelitian meliputi observasi lapangan dan pengambilan sampel batuan, pengamatan karakteristik makroskopik sampel, serta pengolahan dan interpretasi data berdasarkan literatur ilmiah yang relevan.

Subjek Penelitian

Subjek penelitian berupa sampel batuan yang diduga mengalami mineralisasi yang diambil dari beberapa titik tambang rakyat, yaitu Kem 5 (koordinat 0°57'57.5"N 121°47'19.3"E), Kem 6 (koordinat 0°57'32.68"N 121°47'13.61"E), dan Kem 7 (koordinat 0°57'19.9"N 121°47'33.9"E). Sampel dianalisis berdasarkan karakteristik visual meliputi warna, tekstur, kilap, rekahan, pola mineralisasi, dan indikasi oksidasi.

Data dan Teknik Pengumpulan Data

Data diperoleh melalui observasi makroskopik dan dokumentasi fotografi terhadap sampel batuan. Parameter pengamatan mencakup warna, tekstur, kilap, keberadaan urat kuarsa, rekahan, serta perubahan warna yang diduga berkaitan dengan proses oksidasi. Data pendukung dikumpulkan melalui penelusuran literatur ilmiah mengenai karakteristik mineral sulfida, alterasi, oksidasi mineral, dan pembentukan mineralisasi hidrotermal.

Teknik Analisis Data

Data dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan karakteristik makroskopik ketiga sampel batuan. Hasil observasi kemudian diinterpretasikan berdasarkan teori dan penelitian terdahulu yang relevan. Analisis dilakukan dengan membedakan ciri fisik yang dapat diamati secara langsung dari dugaan jenis mineral dan proses geokimia yang mungkin berkaitan dengan ciri tersebut. Keterbatasan interpretasi dipertimbangkan karena pengamatan makroskopik tidak dapat memastikan komposisi mineral, konsentrasi unsur, maupun tipe endapan mineralisasi secara definitif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Pengamatan makroskopik terhadap sampel batuan Kem 5, Kem 6, dan Kem 7 menunjukkan adanya variasi karakteristik fisik yang meliputi warna, tekstur, kilap, rekahan, urat kuarsa, serta indikasi oksidasi. Perbandingan karakteristik tersebut disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik makroskopis sampel batuan

Sampel	Ciri makroskopik	Interpretasi awal
Kem 5	Urat kuarsa dan material berkilap kuning metalik	Dugaan keberadaan mineral sulfida
Kem 6	Warna cokelat kemerahan dan ciri oksidasi	Dugaan oksidasi mineral pembawa besi
Kem 7	Rekahan, urat kuarsa, kilap metalik, dan iridesensi	Dugaan mineral logam dan perubahan permukaan



Gambar 1. Karakteristik makroskopik sampel batuan Kem 5

Berdasarkan pengamatan, sampel Kem 5 memperlihatkan urat kuarsa dan material berwarna kuning dengan kilap metalik pada permukaan batuan. Karakteristik tersebut

mengindikasikan kemungkinan keberadaan mineral sulfida, tetapi jenis mineralnya belum dapat ditentukan secara pasti.



Gambar 2. Karakteristik makroskopik sampel batuan Kem 6

Sampel Kem 6 menunjukkan dominasi warna cokelat kemerahan hingga kuning kecokelatan Karakteristik tersebut memperlihatkan ciri perubahan warna yang diduga berkaitan dengan proses oksidasi mineral pembawa besi.



Gambar 3. Karakteristik makroskopik sampel batuan Kem 7

Sementara itu, sampel Kem 7 memperlihatkan rekahan dan urat kuarsa serta material berkilap metalik dengan gejala iridesensi pada sebagian permukaannya. Gejala tersebut menunjukkan adanya variasi karakteristik permukaan mineral, tetapi penyebab kimia dan identitas mineral belum dapat dipastikan melalui pengamatan visual saja.

Pembahasan

Interpretasi Mineralogi Berdasarkan Karakteristik Makroskopik

Hasil pengamatan makroskopik pada sampel Kem 5 dan Kem 7 memperlihatkan adanya material dengan kilap metalik yang mengindikasikan kemungkinan keberadaan mineral logam. Pada sampel Kem 5, material berwarna kuning metalik ditemukan bersamaan dengan bagian batuan yang diduga merupakan urat kuarsa. Sementara itu, sampel Kem 7 menunjukkan permukaan berkilap metalik disertai gejala iridesensi pada beberapa bagian. Perbedaan karakteristik fisik tersebut dapat mencerminkan variasi mineral penyusun batuan. Akan tetapi, kesamaan warna dan kilap pada berbagai jenis mineral menyebabkan pengamatan makroskopik belum dapat digunakan sebagai dasar identifikasi mineral secara pasti.

Penelitian Azzaman et al. (2026) pada endapan emas Leon di Ratatotok, Sulawesi Utara, menunjukkan bahwa pembentukan mineral sulfida dapat berlangsung melalui beberapa tahapan mineralisasi dengan karakteristik tekstur dan komposisi kimia yang berbeda. Identifikasi tahapan tersebut dilakukan melalui pengamatan tekstur mineral serta analisis unsur jejak dan isotop sulfur. Temuan ini menunjukkan bahwa penentuan karakteristik dan proses pembentukan mineral sulfida memerlukan analisis mineralogi dan geokimia yang lebih mendalam, sehingga tidak dapat hanya didasarkan pada sifat fisik yang terlihat secara langsung.

Penelitian Liao et al. (2025) pada endapan emas Yanzhupo di China menunjukkan bahwa mineral pirit dapat terbentuk dalam beberapa generasi yang memiliki perbedaan karakteristik tekstur dan komposisi unsur jejak. Melalui pengamatan petrografi, pencitraan elektron hambur balik, dan analisis geokimia, penelitian tersebut mengidentifikasi hubungan antara perubahan karakteristik pirit dan tahapan mineralisasi emas. Zhang et al. (2024) juga melaporkan bahwa variasi kandungan unsur jejak serta komposisi isotop sulfur dan timbal pada pirit dapat digunakan untuk memahami kondisi pembentukan mineralisasi emas. Kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa mineral yang memiliki penampakan fisik serupa belum tentu mempunyai karakteristik

geokimia yang sama. Oleh karena itu, material berkilap metalik pada Kem 5 dan Kem 7 belum dapat diidentifikasi sebagai mineral sulfida tertentu tanpa pengujian mineralogi dan geokimia lebih lanjut.

Keberadaan material berkilap metalik pada batuan dapat memberikan indikasi awal adanya mineral logam, tetapi tidak secara langsung menunjukkan keterdapatan emas. Dalam sistem mineralisasi hidrotermal, emas dapat berasosiasi dengan mineral sulfida seperti pirit, baik sebagai partikel berukuran sangat kecil maupun dalam bentuk yang terikat pada struktur mineral. Hubungan tersebut berkaitan dengan kondisi fisikokimia selama proses pembentukan dan pengendapan mineral, sebagaimana dijelaskan melalui analisis unsur jejak pirit serta isotop sulfur dan timbal pada endapan emas Linglong (Ren et al., 2025). Dengan demikian, material berkilap metalik yang ditemukan pada sampel Kem 5 dan Kem 7 belum dapat digunakan untuk memastikan keberadaan maupun konsentrasi emas tanpa didukung analisis mineralogi dan geokimia lebih lanjut.

Wakila et al. (2025) melakukan kajian terhadap alterasi dan mineralisasi sulfida di daerah Lipukasi, Sulawesi Selatan, dengan mengombinasikan pengamatan megaskopis, analisis mineragrafi, dan difraksi sinar-X (XRD). Melalui pendekatan tersebut, beberapa mineral dapat diidentifikasi, di antaranya pirit (FeS_2), kalkopirit ($CuFeS_2$), galena (PbS), hematit (Fe_2O_3), dan goetit (FeO(OH)). Penelitian tersebut memperlihatkan bahwa pengamatan secara visual memiliki peran dalam tahap awal karakterisasi batuan, sedangkan identifikasi mineral secara spesifik memerlukan dukungan pengujian instrumental.

Berdasarkan karakteristik yang diperoleh serta perbandingannya dengan penelitian terdahulu, material berkilap metalik pada sampel Kem 5 dan Kem 7 diduga memiliki kesamaan sifat fisik dengan mineral sulfida. Meskipun demikian, keberadaan pirit, kalkopirit, maupun jenis mineral logam lainnya belum dapat dikonfirmasi. Gejala iridesensi yang teramati pada Kem 7 juga belum dapat dijadikan dasar untuk menentukan jenis mineral atau proses kimia yang menyebabkan perubahan warna pada permukaannya. Oleh sebab itu, interpretasi mineralogi dalam penelitian ini masih bersifat pendahuluan dan memerlukan analisis instrumental untuk memastikan mineral penyusun batuan.

Interpretasi Zona Oksidasi dan Perubahan Mineral

Sampel Kem 6 memperlihatkan dominasi warna cokelat kemerahan hingga kuning kecokelatan yang berbeda dari karakteristik Kem 5 dan Kem 7. Perubahan warna tersebut diduga berkaitan dengan proses oksidasi mineral pembawa besi. Secara kimia, oksidasi mineral sulfida seperti pirit (FeS_2) dapat berlangsung melalui interaksi dengan oksigen dan air yang menyebabkan pelepasan unsur terlarut serta pembentukan produk oksidasi. Proses tersebut dipengaruhi oleh karakteristik mineral dan kondisi lingkungan (Mahanta et al., 2024). Pada lingkungan supergen, perubahan pirit juga dapat berkaitan dengan pembentukan mineral sekunder seperti goetit (Taivalkoski et al., 2024). Meskipun demikian, warna permukaan Kem 6 belum dapat digunakan untuk memastikan bahwa mineral yang mengalami oksidasi adalah pirit atau bahwa mineral hasil perubahannya berupa hematit maupun goetit.

Nzulu et al. (2024) mengkaji reaktivitas kimia dan perubahan mineral pirit pada wilayah konsesi emas Kubi di Ghana melalui analisis XRD, EDX, dan XPS serta perlakuan pemanasan dalam udara. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa mineral pirit dapat mengalami perubahan karakteristik akibat reaksi kimia pada kondisi tertentu, termasuk pembentukan fase oksida besi seperti hematit. Temuan ini memberikan gambaran mengenai kemungkinan transformasi mineral sulfida besi sebagai akibat interaksi dengan kondisi lingkungan yang mendukung berlangsungnya reaksi oksidasi.

Proses oksidasi supergen dapat menyebabkan transformasi mineral pirit menjadi goetit pada material sedimen glasial (till). Perubahan tersebut tidak hanya memengaruhi karakteristik mineralogi, tetapi juga berhubungan dengan redistribusi unsur selama proses alterasi. Goetit merupakan mineral oksihidroksida besi dengan rumus kimia FeO(OH), sedangkan hematit termasuk mineral oksida besi dengan rumus Fe_2O_3. Kedua mineral tersebut dapat terbentuk pada lingkungan yang mengalami oksidasi, bergantung pada kondisi fisikokimia yang memengaruhi proses pembentukannya (Taivalkoski et al., 2024).

Mahanta et al. (2024) mengkaji proses oksidasi pirit melalui percobaan pelindian dalam media air pada kondisi temperatur dan waktu yang berbeda. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa perubahan komposisi mineral dapat memengaruhi laju oksidasi pirit serta pembentukan kondisi asam akibat reaksi mineral dengan lingkungan. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa proses oksidasi mineral sulfida tidak hanya berkaitan dengan perubahan penampakan fisik, tetapi juga melibatkan reaksi kimia yang dipengaruhi oleh karakteristik mineral dan kondisi lingkungannya. Dengan demikian, warna cokelat kemerahan yang teramati pada Kem 6 dapat digunakan sebagai petunjuk awal kemungkinan perubahan mineral pembawa besi, tetapi belum dapat memastikan jenis maupun mekanisme oksidasi yang berlangsung pada sampel tersebut.

Dominasi warna cokelat kemerahan pada Kem 6 dapat diinterpretasikan sebagai indikasi awal kemungkinan perubahan mineral pembawa besi akibat oksidasi. Pembentukan mineral sekunder, seperti goetit dan hematit, dapat berlangsung pada kondisi lingkungan tertentu melalui proses perubahan mineral yang mengandung besi (Taivalkoski et al., 2024). Namun, karakteristik warna tersebut belum dapat memastikan keberadaan mineral tertentu ataupun pembentukan zona gossan. Dengan demikian, interpretasi oksidasi pada Kem 6 masih bersifat pendahuluan dan memerlukan karakterisasi mineralogi untuk memperoleh informasi yang lebih pasti.

Interpretasi Geokimia dan Indikasi Aktivitas Hidrotermal

Keberadaan bagian batuan yang diduga berupa urat kuarsa, rekahan, serta material berkilap metalik pada sampel Kem 5 dan Kem 7 memberikan indikasi awal kemungkinan adanya pengaruh aktivitas hidrotermal. Pada sistem hidrotermal, rekahan batuan dapat menjadi jalur migrasi fluida yang mengandung berbagai komponen terlarut. Perubahan kondisi temperatur, tekanan, komposisi fluida, dan interaksi dengan batuan sekitarnya dapat memengaruhi proses pelarutan maupun pengendapan mineral. Meskipun demikian, keberadaan urat kuarsa dan rekahan tidak selalu berkaitan secara langsung dengan pembentukan mineralisasi emas.

Keberadaan urat kuarsa dalam sistem mineralisasi hidrotermal dapat berkaitan dengan proses pengendapan mineral yang berlangsung melalui beberapa tahapan. Asosiasi antara kuarsa, pirit, dan mineral sulfida polimetalik dapat mencerminkan perubahan kondisi fisikokimia selama pembentukan endapan (Huang et al., 2024). Meskipun demikian, keberadaan kuarsa tidak selalu menunjukkan pengayaan emas secara langsung. Oleh karena itu, bagian batuan yang diduga merupakan urat kuarsa pada sampel Kem 5 dan Kem 7 hanya dapat digunakan sebagai indikasi awal kemungkinan aktivitas hidrotermal, sedangkan hubungan dengan mineralisasi emas masih memerlukan verifikasi melalui analisis mineralogi dan geokimia.

Kiray dan Cengiz (2024) meneliti karakteristik alterasi hidrotermal pada endapan emas epitermal Kestanelik di Turki menggunakan pendekatan petrografi dan analisis geokimia. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa interaksi antara fluida hidrotermal dan batuan induk dapat menghasilkan perubahan himpunan mineral

alterasi. Identifikasi karakteristik tersebut dilakukan berdasarkan data mineralogi dan geokimia, sehingga interpretasi proses alterasi tidak semata-mata mengandalkan perubahan warna maupun tekstur yang terlihat pada batuan.

Liu et al. (2025) melaporkan bahwa mineralisasi pada endapan emas Zhilingtou di China berkembang melalui beberapa tahapan pembentukan urat kuarsa dan mineral sulfida. Interpretasi tersebut diperoleh melalui kombinasi pengamatan hubungan antarurat, analisis inklusi fluida, serta komposisi isotop yang digunakan untuk memahami perkembangan sistem hidrotermal. Perkembangan alterasi hidrotermal dan mineralisasi dapat dipengaruhi oleh interaksi antara fluida pembawa unsur logam dan batuan induk. Pada endapan emas Nibao di China, karakteristik geokimia batuan dan kandungan unsur jejak pada kuarsa serta pirit menunjukkan bahwa intensitas silisikasi tidak selalu berkaitan langsung dengan peningkatan mineralisasi emas (Chen et al., 2025). Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan mineral silika pada batuan belum dapat dijadikan indikator tunggal untuk menentukan kandungan emas. Oleh karena itu, bagian batuan yang diduga merupakan urat kuarsa pada sampel Kem 5 dan Kem 7 dapat digunakan sebagai petunjuk awal kemungkinan aktivitas hidrotermal, tetapi belum cukup untuk memastikan keberadaan maupun konsentrasi emas. Peng et al. (2025) menggunakan karakteristik tekstur dan unsur jejak pada kuarsa untuk menafsirkan proses pembentukan endapan emas. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa urat kuarsa dan rekahan dapat menjadi informasi awal mengenai kemungkinan aktivitas hidrotermal, tetapi penentuan proses pembentukannya tetap memerlukan bukti mineralogi dan geokimia yang memadai. Oleh karena itu, karakteristik Kem 5 dan Kem 7 belum dapat digunakan untuk menetapkan tipe sistem mineralisasi tertentu.

Penelitian Azzaman et al. (2026) pada endapan emas Leon di Sulawesi Utara menunjukkan bahwa interpretasi pembentukan mineralisasi sulfida dapat dilakukan melalui kajian karakteristik mineral dan komposisi geokimianya. Analisis unsur jejak dan isotop sulfur digunakan untuk memahami kondisi serta tahapan pembentukan mineral bijih. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan pentingnya penggunaan data mineralogi dan geokimia dalam menjelaskan proses mineralisasi yang berlangsung pada suatu sistem geologi.

Selain itu, Wakila et al. (2025) mengkaji karakteristik alterasi dan mineralisasi sulfida di wilayah Lipukasi, Sulawesi Selatan, dengan memadukan pengamatan megaskopis, mineragrafi, dan analisis XRD. Penelitian tersebut memperlihatkan bahwa pengamatan fisik batuan dapat memberikan gambaran awal mengenai kemungkinan adanya alterasi dan mineralisasi, sedangkan penentuan karakteristik mineral secara spesifik membutuhkan metode analisis tambahan.

Berdasarkan hasil pengamatan dan perbandingan dengan penelitian terdahulu, rekahan serta bagian batuan yang diduga merupakan urat kuarsa pada Kem 5 dan Kem 7 dapat menunjukkan kemungkinan adanya jalur pengisian mineral yang berkaitan dengan aktivitas fluida. Namun, proses pembentukan batuan tersebut belum dapat ditentukan secara pasti karena penelitian ini tidak mencakup pengamatan mikroskopik, analisis komposisi mineral, maupun karakterisasi fluida hidrotermal. Dengan demikian, interpretasi geokimia yang dihasilkan masih terbatas pada kemungkinan proses yang dapat menjelaskan karakteristik fisik batuan dan belum dapat digunakan untuk menentukan tipe endapan mineralisasi secara definitif.

Perbandingan Karakteristik Batuan dan Keterbatasan Interpretasi

Hasil perbandingan makroskopik menunjukkan bahwa sampel Kem 5, Kem 6, dan Kem 7 memiliki karakteristik fisik yang bervariasi. Sampel Kem 5 memperlihatkan material berkilap kuning metalik yang ditemukan bersama bagian batuan yang diduga merupakan urat kuarsa. Sampel Kem 6

didominasi warna cokelat kemerahan yang mengindikasikan kemungkinan adanya perubahan mineral pembawa besi akibat oksidasi. Adapun sampel Kem 7 menunjukkan rekahan, bagian yang diduga sebagai urat kuarsa, material berkilap metalik, serta gejala iridesensi pada beberapa bagian permukaan. Variasi tersebut menunjukkan adanya perbedaan ciri fisik antarsampel, tetapi belum cukup untuk menentukan kadar emas maupun tingkat prospektivitas setiap lokasi.

Yang et al. (2024) menjelaskan bahwa emas dapat ditemukan dalam bentuk yang tidak terlihat secara langsung (invisible gold) pada mineral pirit yang mengandung arsenik. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa proses pelarutan dan pengendapan kembali dapat memengaruhi distribusi serta pengayaan emas di dalam mineral sulfida. Kondisi ini menunjukkan bahwa keberadaan emas tidak selalu dapat dikenali melalui pengamatan warna atau kilap batuan, terutama apabila emas terdapat dalam ukuran yang sangat kecil atau berasosiasi dengan struktur mineral tertentu.

Kovalchuk et al. (2024) melakukan penelitian eksperimental mengenai hubungan emas dan arsenik pada mineral pirit serta markasit dalam kondisi hidrotermal. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kandungan unsur pada mineral sulfida berkaitan dengan kondisi pembentukannya, sehingga karakteristik kimia mineral tidak dapat disimpulkan hanya berdasarkan penampakan makroskopik. Sejalan dengan hal tersebut, Prokofiev et al. (2023) mengkaji kandungan unsur jejak dalam mineral pirit dan hubungannya dengan temperatur kristalisasi pada endapan emas Darasun, Rusia. Penelitian tersebut menunjukkan pentingnya data komposisi unsur dan kondisi pembentukan mineral dalam menginterpretasikan karakteristik mineralisasi emas. Dengan demikian, perbedaan warna dan kilap pada sampel Kem 5, Kem 6, dan Kem 7 belum dapat digunakan sebagai dasar penentuan konsentrasi emas maupun peringkat prospektivitas antarsampel.

Azzaman et al. (2026) melaporkan adanya variasi karakteristik mineral sulfida yang berkaitan dengan tahapan pembentukan mineralisasi pada endapan emas Leon. Perbedaan karakteristik tersebut mencerminkan adanya perubahan kondisi pembentukan mineral dan komposisi unsur selama berlangsungnya proses mineralisasi. Oleh karena itu, kesamaan warna maupun kilap pada beberapa sampel batuan tidak dapat secara langsung menunjukkan kesamaan kandungan unsur atau proses pembentukan mineral.

Perbedaan karakteristik makroskopik pada Kem 5, Kem 6, dan Kem 7 memperlihatkan variasi penampakan batuan yang diduga berkaitan dengan kemungkinan keberadaan mineral logam, perubahan mineral pembawa besi, dan aktivitas hidrotermal. Akan tetapi, material berkilap kuning metalik pada Kem 5 belum membuktikan adanya kandungan emas, warna cokelat kemerahan pada Kem 6 belum memastikan terbentuknya zona gossan, dan iridesensi pada Kem 7 belum dapat menunjukkan identitas mineral sulfida tertentu. Keterbatasan tersebut menegaskan bahwa interpretasi berdasarkan pengamatan makroskopik masih bersifat pendahuluan. Identifikasi mineral secara definitif dan penentuan konsentrasi unsur memerlukan analisis instrumental yang sesuai, sedangkan interpretasi tipe endapan juga memerlukan dukungan data geologi dan geokimia yang lebih lengkap.

KESIMPULAN

Kajian mineralogi dan interpretasi geokimia berdasarkan karakteristik fisik menunjukkan adanya variasi ciri makroskopik pada sampel batuan Kem 5, Kem 6, dan Kem 7. Sampel Kem 5 memperlihatkan urat kuarsa dan material berkilap kuning metalik yang diduga berkaitan dengan keberadaan mineral sulfida. Sampel Kem 6 menunjukkan dominasi warna cokelat kemerahan yang

mengindikasikan kemungkinan proses oksidasi mineral pembawa besi, sedangkan Kem 7 memperlihatkan rekahan, urat kuarsa, kilap metalik, dan iridesensi pada permukaan batuan. Karakteristik tersebut menunjukkan indikasi awal kemungkinan keterkaitan batuan dengan proses mineralisasi hidrotermal dan perubahan mineral akibat oksidasi. Namun, pengamatan makroskopik belum dapat memastikan identitas mineral, tipe endapan, maupun kadar emas pada sampel batuan. Oleh karena itu, diperlukan analisis mineralogi dan geokimia instrumental untuk memperkuat interpretasi yang diperoleh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada masyarakat penambang di Desa Bulagidun dan Labuton, Kabupaten Buol, Sulawesi Tengah, serta kepada semua pihak yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ai Zamruddin, N. N. S., Zainal Abidin, N. S., Endut, Z., Makoundi, C., Lok, L. K., & Ismail, M. S. (2023). Trace Element Analysis of Pyrite and Arsenopyrite Using the LA-ICPMS Technique in Pulai, Central Belt of Peninsular Malaysia. *Minerals*, *13*(8), 1026. Https://doi.org/10.3390/min13081026

Azzaman, M. A., Takahashi, R., Manalo, P., Agangi, A., Nopeia, M., Sato, H., Idrus, A., Simbolon, D. R., & Suhendra, R. (2026). Trace Elements and Sulfur Isotopes of Sulfides at the Leon Sediment-Hosted Gold Deposit, Ratatotok District, North Sulawesi, Indonesia: Constraints on the Genesis of Ore Formation. *Resource Geology*, *76*(1), e70028. Https://doi.org/10.1111/rge.70028

Carlile, J. C., & Mitchell, A. H. G. (1994). Magmatic arcs and associated gold and copper mineralization in Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, *50*(1–3), 91–142. Https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90022-1

Chen, B., Zuo, Y., Zheng, L., Liu, J., Sun, W., Lin, J., Chen, Q., Rong, P., & Cao, S. (2025). Relationship between silicification and gold mineralization and evolution of hydrothermal systems in Nibao Carlin-type gold deposits, SW China: Insights from rock geochemistry and trace elements of quartz and pyrite. *Ore Geology Reviews*, *176*, 106394. Https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106394

Ernowo, E., Idrus, A., & Meyer, F. M. (2022). Elemental Gains and Losses during Hydrothermal Alteration in Awak Mas Gold Deposit, Sulawesi Island, Indonesia: Constraints from Balanced Mineral Reactions. *Minerals*, *12*(12), 1630. Https://doi.org/10.3390/min12121630

Ge, Z., Gu, X., Zhang, Y., Ma, C., Hao, D., Zheng, Y., Zhang, X., Wang, L., Liu, M., & Chen, W. (2023). Ore Mineralogy, Fluid Inclusion Geochemistry, and Zircon U-Pb Geochronology of the Nanmingshui Gold Deposit in East Junggar, Xinjiang, Northwest China: Implications for Ore Genesis. *Minerals*, *13*(10), 1296. Https://doi.org/10.3390/min13101296

Huang, X., Sun, D., Yu, S., Wang, Y., Shen, L., Shao, Y., Lu, C., Song, Q., & Xiao, T. (2024). The Sources of Ore-Forming Materials and Fluids for the Jinqingding Gold Deposit in the Mouping–Rushan Metallogenic Belt, Jiaodong Peninsula: Evidence from S-H-O Isotopes and Trace Elements in Pyrite. *Minerals*, *14*(11), 1064. Https://doi.org/10.3390/min14111064

Kiray, D., & Cengiz, O. (2024). Petrography and Geochemistry of Hydrothermal Alteration in the Low-Sulfidation Epithermal Kestanelik Au Deposit, Biga Peninsula, NW Turkey. *Minerals*, *14*(4), 379. Https://doi.org/10.3390/min14040379

Kovalchuk, E. V., Tagirov, B. R., Borisovsky, S. E., Nickolsky, M. S., Tyukova, E. E., Sidorova, N. V., Komarov, V. B., Mezhueva, A. A., Prokofiev, V. Yu., & Vikentyev, I. V. (2024). Gold and Arsenic in Pyrite and Marcasite: Hydrothermal Experiment and Implications to Natural

Ore-Stage Sulfides. *Minerals*, *14*(2), 170. Https://doi.org/10.3390/min14020170

Liao, J., Wang, X., Chen, B., Wang, B., Zhu, Z., Wang, W., Peng, D., Zhang, Q., Liu, Z., & Xu, Q. (2025). Pyrite Textures, Trace Element Geochemistry and Galena Pb Isotopes of the Yanzhupo Gold Deposit in the Jiangnan Orogen, South China: Implications for Gold Mineralization Genesis. *Minerals*, *15*(1), 94. Https://doi.org/10.3390/min15010094

Liu, H., Yu, X., Duan, S., Sun, Y., Wang, Y., & Mao, J. (2025). Genesis of the Zhilingtou gold deposit, Zhejiang Province, China: Constraints from fluid inclusions and H–O–S–Pb isotope systematics. *Frontiers in Earth Science*, *13*, 1564600. Https://doi.org/10.3389/feart.2025.1564600

Lubis, H., Prihatmoko, S., & James, L. P. (1994). Bulagidun prospect: A copper, gold and tourmaline bearing porphyry and breccia system in northern Sulawesi, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, *50*(1–3), 257–278. Https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90027-2

Mahanta, A., Attry, B., & Saikia, B. K. (2024). Aqueous oxidation of coal-associated pyrite and standard pyrite mineral towards understanding the depyritization kinetics and acid formations. *International Journal of Coal Science & Technology*, *11*(1), 85. Https://doi.org/10.1007/s40789-024-00735-4

Mulja, T., & Nur Heriawan, M. (2022). The Miwah high sulphidation epithermal Au–Ag deposit, Aceh, Indonesia: Dynamics of hydrothermal alteration and mineralisation interpreted from principal component analysis of lithogeochemical data. *Ore Geology Reviews*, *147*, 104988. Https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104988

Nzulu, G. K., Högberg, H., Eklund, P., Hultman, L., Nude, P. M., Yaya, A., & Magnuson, M. (2024). Chemical Reactivity and Alteration of Pyrite Mineral in the Kubi Gold Concession in Ghana. *Mining, Metallurgy & Exploration*, *41*(2), 1013–1023. Https://doi.org/10.1007/s42461-024-00932-4

Peng, N., Shen, H., & Liao, J. (2025). Quartz textural and trace-element geochemical constraints on the origin of lode gold deposits: A case study of the Yanzhupo deposit in Jiangnan Orogen (South China). *Frontiers in Earth Science*, *13*, 1566088. Https://doi.org/10.3389/feart.2025.1566088

Prokofiev, V., Brovchenko, V., Zorina, L., Krasnov, A., Abramova, V., & Bortnikov, N. (2023). Trace Elements in Pyrite and Its Crystallization Temperature: An Example of Gold Deposits in the Darasun Goldfield, Eastern Transbaikalia, Russia. *Minerals*, *13*(2), 288. Https://doi.org/10.3390/min13020288

Ren, F., Ding, Z.-J., Bao, Z.-Y., Wang, J.-W., Ma, S.-X., Niu, T., Geng, K.-Q., Wang, B., Li, C., Li, G.-J., & Li, S.-S. (2025). Source and Precipitation Process of Gold in the Linglong Gold Deposit, Jiaodong Peninsula: Constraints from Trace Elements of Pyrite and S-Pb Isotopes. *Minerals*, *15*(11), 1220. Https://doi.org/10.3390/min15111220

Taivalkoski, A., Ranta, J.-P., Sarala, P., Moilanen, M., Nikkola, P., & Soukka, T. (2024). Pyrite-Goethite Alteration in Supergene Oxidation Processes in Till: Elemental Distribution and Evaluation of Goethite Usability as a Fingerprinting Tool for Vectoring Mineral Deposits. *Minerals*, *14*(7), 668. Https://doi.org/10.3390/min14070668

Wakila, M. H., Harwan, Thamsi, A. B., Aulia, R. N., & Aulia, R. D. (2025). Alteration and Mineralisation of Sulphide Deposits in The Lipukasi Area, Barru Regency, South Sulawesi Province. *Cognitia : International Engineering Journal*, *1*(3), 129–137. Https://doi.org/10.63288/ciej.v1i3.15

Yang, L., Wang, Q., Fougerouse, D., Xian, H., Li, H., Wang, R., Rickard, W. D. A., Groves, D. I., & Deng, J. (2024). Release and re-enrichment of invisible gold in arsenian pyrite promoted by coupled dissolution-reprecipitation reactions.

Communications Earth & Environment, *5*(1), 241. Https://doi.org/10.1038/s43247-024-01408-5

Zhang, J., Ding, Z., Bo, J., Ji, P., Li, T., & Xin, W. (2024). In Situ Trace Element and S-Pb Isotope Study of Pyrite from the Denggezhuang Gold Deposit in the Jiaodong Peninsula—Insights into the Occurrence of Gold and the Source of Ore-Forming Materials. *Minerals*, *14*(2), 158. Https://doi.org/10.3390/min14020158