



Karakteristik Mineralogi dan Geokimia serta Distribusi Spasial Cu-Au pada Lava Basal Berasosiasi Urat Kuarsa di Lembah Segar, Sawahlunto, Sumatra Barat

Pramudia Simanjuntak¹, Muhammad Ferdinan Hasmiansyah Marzha¹, Hari Wiki Utama^{1*}, Hasan Riyadi¹

¹ Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3252>

Article Info:

Received : 27 Agustus 2026
Revised : 15 September 2026
Accepted : 25 September 2026
Published : 05 Oktober 2026

Correspondence:

Hari Wiki Utama

Phone:

Abstract: Evidence of Cu-Au mineralization in basaltic lava from the Segar Valley, Sawahlunto, West Sumatra, indicates heterogeneous elemental enrichment that may not be resolved by geochemical analysis alone. This study characterizes the mineralogy and geochemical composition of basaltic lava and evaluates microscale analysis for identifying localized Cu-Au enrichment. The study integrates petrographic analysis, X-ray fluorescence (XRF), micro-XRF, elemental mapping, and combined elemental mapping of three basaltic lava samples. Petrographic analysis identified quartz, plagioclase, chlorite, epidote, and opaque minerals, with quartz veins indicating hydrothermal fluid interaction. XRF detected Cu at 500–800 ppm in all samples, whereas Au was not detected. Micro-XRF detected Au in all samples and identified the strongest Cu-Au enrichment in V3, reaching 62.778 wt.% Cu and 9.219 wt.% Au. Combined elemental mapping showed spatial proximity between Cu and Au within quartz vein zones in V3. V1 displayed localized linear enrichment, whereas V4 contained up to 69,900 ppm S but relatively low microscale Cu enrichment. These results demonstrate that microscale analysis enhances the identification of localized Cu-Au enrichment. The Cu-Au is interpreted as hydrothermal in origin and spatially associated with quartz veins and fractures, while mineral hosts and deposit classification require further verification.

Keywords: Cu-Au Mineralization; Basaltic Lava; Quartz Veins; Micro-XRF

Citation: Simanjuntak, P., Marzha, M. F. H., Utama, H. W., & Riyadi, H. (2026). Karakteristik Mineralogi dan Geokimia serta Distribusi Spasial Cu-Au pada Lava Basal Berasosiasi Urat Kuarsa di Lembah Segar, Sawahlunto, Sumatra Barat. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(4), 6006–6015. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3252>

Pendahuluan

Mineralisasi Cu-Au merupakan produk sistem hidrotermal yang melibatkan interaksi fluida pembawa logam, batuan induk, struktur geologi, dan proses pengendapan mineral. Pada sistem porfiri Cu-Au, mineralisasi dapat berkembang sebagai urat kuarsa-sulfida dan diseminasi sulfida yang berasosiasi dengan intrusi dan alterasi hidrotermal. Pada sistem epitermal, mineralisasi dapat berkembang pada zona permeabel berupa rekahan dan urat kuarsa dalam batuan vulkanik. Studi pada prospek Humpa Leu East, Sumbawa, menunjukkan bahwa mineralisasi porfiri Cu-Au berasosiasi dengan intrusi diorit dan kuarsa diorit yang menerobos tuf kristal, breksi vulkanik, dan lava andesit. Mineralisasi berkembang sebagai urat kuarsa-sulfida

dan diseminasi sulfida dengan beberapa tahap alterasi hidrotermal (Fadlin et al., 2023). Pada prospek Brambang, Lombok, mineralisasi porfiri Cu-Au juga berkembang pada lingkungan yang didominasi batuan vulkanik dan intrusi, dengan karakter alterasi dan mineral bijih yang menjadi parameter utama dalam interpretasi sistem mineralisasi (Faesal et al., 2022).

Kontrol struktur dan perkembangan urat menjadi aspek penting karena rekahan dapat menyediakan jalur permeabilitas bagi fluida hidrotermal dan memfokuskan pengendapan mineralisasi. Pada daerah Cibeber, Jawa Barat, mineralisasi Au-Ag-Cu berkembang terutama pada urat kuarsa dalam lava andesit dan breksi tuf. Sistem tersebut dikontrol oleh beberapa struktur berupa kekar dan sesar, sedangkan

Email: h.wikiutama@unja.ac.id

mineralisasi berasosiasi dengan kuarsa, sulfida, dan alterasi hidrotermal (Dana et al., 2021). Kondisi serupa ditunjukkan di Mangunharjo, Pacitan, tempat urat kuarsa pada batuan vulkanik berasosiasi dengan sulfida dan berkembang mengikuti struktur berupa sesar dan shear joints (Baba et al., 2022). Pada sistem Batu Hijau, hubungan tekstural antara urat kuarsa dan sulfida juga menunjukkan bahwa pengendapan sulfida dapat berlangsung setelah pembentukan utama urat kuarsa, dengan kalkopirit dan bornit menempati beberapa posisi tekstural dalam jaringan urat (Schirra et al., 2022). Bukti tersebut menunjukkan bahwa keberadaan Cu-Au perlu dievaluasi dalam konteks hubungan spasial dan tekstural antara urat, alterasi, struktur, dan mineral sulfida.

Karakterisasi mineralogi dan tekstur memberikan dasar untuk mengenali alterasi hidrotermal dan hubungan antara batuan inang dengan mineralisasi, tetapi informasi tersebut perlu dilengkapi dengan data geokimia. Analisis X-Ray Fluorescence (XRF) dapat memberikan komposisi kimia pada XRF sehingga efektif untuk mengevaluasi variasi geokimia antarsampel. Namun, analisis XRF tidak menunjukkan distribusi unsur secara spasial dan dapat kurang merepresentasikan pengayaan yang hanya berkembang pada bagian tertentu sampel. Hal ini menjadi penting pada batuan dengan mineralisasi heterogen yang terkonsentrasi pada urat, rekahan, atau fase mineral tertentu. Micro-XRF (μ XRF) memberikan pendekatan komplementer karena mampu menghasilkan informasi unsur pada resolusi spasial yang lebih tinggi. Heidarian et al. (2021) menunjukkan bahwa μ XRF dapat mengonfirmasi keberadaan mineralisasi sulfida dan emas serta menghubungkan distribusi unsur dengan alterasi pada urat pembawa emas. Penggunaan μ XRF juga telah diterapkan untuk mengevaluasi distribusi unsur dan karakter mineralisasi pada sistem hidrotermal lainnya (Xiao et al., 2023). Dengan demikian, μ XRF dapat digunakan untuk mengidentifikasi pengayaan unsur yang bersifat lokal dan melengkapi informasi geokimia yang diperoleh dari XRF.

Pendekatan geokimia multiskala juga penting karena hubungan antara unsur dan mineral tidak selalu dapat ditentukan berdasarkan konsentrasi XRF. Pada sistem emas Tamilouw-Haya, mineralisasi sulfida berkembang sebagai urat, stockwork, breksi, dan diseminasi serta dikontrol oleh struktur geologi, dengan assemblage yang mencakup kalkopirit, pirit, sfalerit, galena, dan mineral sulfida lainnya (Samalehu et al., 2021). Pada sistem Randu Kuning, penelitian geokimia menunjukkan hubungan antara karakter magma, intrusi, dan kondisi pembentukan mineralisasi porfiri Cu-Au (Idrus et al., 2023). Sementara itu, pada Humpa Leu East, variasi urat kuarsa-sulfida dan tipe alterasi

menunjukkan bahwa mineralisasi Cu-Au berkembang melalui beberapa tahap hidrotermal (Fadlin et al., 2023). Hasil-hasil tersebut memperlihatkan bahwa interpretasi mineralisasi memerlukan integrasi antara konteks batuan, alterasi, struktur, urat, dan distribusi unsur, bukan hanya nilai konsentrasi unsur secara tunggal.

Daerah Lembah Segar, Kota Sawahlunto, Sumatra Barat, memiliki kondisi geologi yang relevan untuk mengevaluasi hubungan antara lava basal, urat kuarsa, alterasi hidrotermal, dan indikasi mineralisasi Cu-Au. Lava basal di daerah penelitian berasosiasi secara spasial dengan batuan intrusi dan struktur rekahan, sedangkan urat kuarsa berkembang pada bagian tertentu batuan. Hasil pengamatan petrografi menunjukkan keberadaan kuarsa, plagioklas, klorit, epidot, dan mineral opak dengan variasi mineralogi antarsampel. Klorit dan epidot hadir sebagai mineral sekunder, sedangkan sebagian plagioklas menunjukkan karakter alterasi. Kehadiran urat kuarsa dan mineral sekunder tersebut memberikan dasar untuk mengevaluasi interaksi fluida dengan batuan. Namun, karakter tersebut belum cukup untuk menetapkan tipe endapan sebagai porfiri atau epitermal. Studi pada sistem Cu-Au Indonesia menunjukkan bahwa klasifikasi tipe mineralisasi memerlukan kombinasi bukti alterasi, tekstur urat, mineralogi bijih, geokimia, dan hubungan dengan intrusi (Fadlin et al., 2023; Idrus et al., 2023).

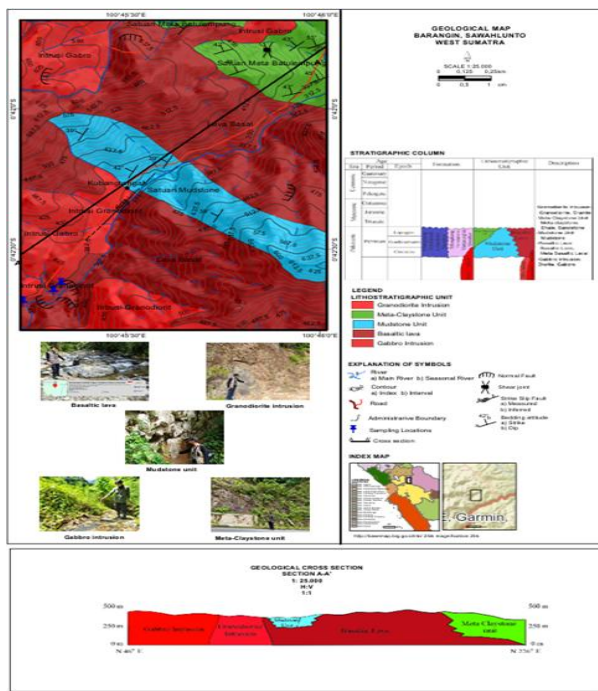
Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat kebutuhan untuk mengintegrasikan karakter mineralogi, geokimia, dan distribusi spasial unsur pada lava basal yang berasosiasi dengan urat kuarsa di Lembah Segar. XRF dapat menggambarkan komposisi kimia keseluruhan sampel, tetapi tidak dapat menunjukkan lokasi pengayaan unsur pada skala mikro. Sebaliknya, μ XRF mampu mengidentifikasi pengayaan lokal dan hubungan spasial antarunsur, tetapi hasilnya terbatas pada area analisis dan tidak dapat diperlakukan sebagai kadar keseluruhan sampel. Perbedaan skala tersebut menjadi penting dalam penelitian ini karena mineralisasi yang bersifat lokal dapat menghasilkan respons geokimia yang berbeda antara analisis XRF dan mikro XRF. Pendekatan integratif antara petrografi, XRF, dan μ XRF karena itu digunakan untuk menghubungkan mineralogi, alterasi, komposisi geokimia, dan distribusi spasial unsur. Pendekatan ini memberikan kontribusi dengan mengevaluasi pengayaan Cu-Au pada skala mikro dalam konteks karakter batuan dan urat, tanpa menganggap konsentrasi lokal sebagai representasi kadar pada XRF.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi karakteristik mineralogi, komposisi geokimia, serta distribusi dan asosiasi spasial unsur pada lava basal yang berasosiasi dengan urat kuarsa di Daerah Lembah Segar, Kota Sawahlunto, Sumatra Barat, melalui integrasi analisis petrografi, XRF, dan Micro-XRF. Pendekatan tersebut

digunakan untuk membandingkan karakter geokimia XRF dan mikro XRF, mengidentifikasi zona pengayaan Cu-Au pada area analisis, serta mengevaluasi keterkaitannya dengan karakter mineralogi. Hasil penelitian diharapkan memberikan dasar yang lebih kuat untuk mengevaluasi indikasi mineralisasi Cu-Au pada lava basal serta menentukan kebutuhan analisis lanjutan untuk mengidentifikasi mineral pembawa dan mekanisme pengendapannya.

Metode

Metode Penelitian dilakukan di Daerah Lembah Segar, Kota Sawahlunto, Sumatra Barat. Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur mengenai kondisi geologi regional dan geologi daerah penelitian. Selanjutnya, dilakukan pemetaan geologi lapangan yang meliputi observasi singkapan, identifikasi litologi dan struktur geologi, pengukuran orientasi struktur serta pengambilan sampel batuan. Lokasi pengambilan sampel berada pada lava basal yang berkembang diantara intrusi granodiorit dan gabro. Rekahan pada lava basal menjadi jalur sirkulasi fluida hidrotermal, ditandai oleh kehadiran urat kuarsa yang mengandung sulfida. Sebanyak tiga sampel batuan diambil dan diberi kode V1, V3, dan V4 untuk pengujian laboratorium. Sampel V1 berada pada koordinat 0°42'41,2" S, 100°45'14,3" E, sampel V3 berada pada koordinat 0°42'39,6" S, 100°45'19,3" E, sedangkan sampel V4 berada pada koordinat 0°42'38,2" S, 100°45'20,5" E.



Gambar 1. Peta lokasi dan geologi daerah penelitian

Sampel V1, V3 dan V4 selanjutnya dianalisis menggunakan tiga metode, yaitu analisis petrografi, X-

Ray Fluorescence (XRF) dan Micro-XRF. Analisis petrografi dilakukan pada sayatan tipis menggunakan mikroskop polarisasi untuk mengidentifikasi komposisi mineral, tekstur, struktur, dan mineral alterasi. Selanjutnya, sampel dipreparasi sesuai dengan persyaratan analisis XRF untuk menentukan komposisi dan kadar unsur atau oksida secara kuantitatif sebagai dasar interpretasi karakteristik geokimia batuan. Kemudian, dilakukan analisis Micro-XRF untuk mengidentifikasi distribusi spasial dan konsentrasi relatif unsur pada bagian tertentu dari sampel yang berkaitan dengan mineralisasi, khususnya Cu, Au, serta unsur lainnya yang terdeteksi. Seluruh data yang diperoleh dari hasil pemetaan geologi, analisis petrografi, XRF, dan Micro-XRF kemudian diintegrasikan untuk menginterpretasikan hubungan antara karakteristik mineralogi, alterasi hidrotermal, dan distribusi unsur yang berkaitan dengan mineralisasi Cu-Au di daerah penelitian.

Hasil dan Diskusi

Hasil penelitian meliputi karakteristik petrografi, komposisi kimia, dan distribusi spasial unsur pada sampel lava basal di daerah penelitian. Analisis petrografi digunakan untuk mengidentifikasi mineral penyusun, tekstur, hubungan antarmineral, serta karakteristik mikroskopis batuan sebagai dasar dalam menentukan jenis dan proses pembentukan batuan. Analisis XRF dan mikro XRF selanjutnya digunakan untuk menentukan komposisi kimia serta mengidentifikasi distribusi unsur pada sampel. Hasil dari ketiga metode tersebut kemudian diintegrasikan untuk menginterpretasikan hubungan antara karakteristik mineralogi dan pengayaan unsur Cu-Au.

Karakteristik mineralogi

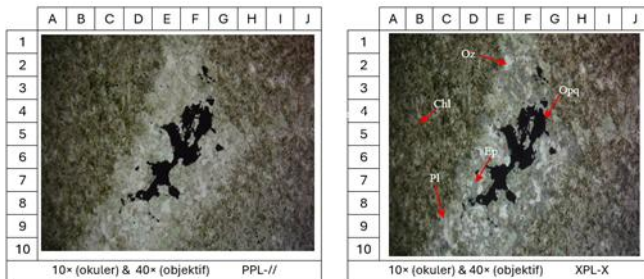
Hasil petrografi menunjukkan bahwa V1, V3, dan V4 merupakan lava basal, tetapi ketiganya memiliki karakter mineralogi yang berbeda pada area pengamatan.

Tabel 1. Asosiasi mineral pada lava basal

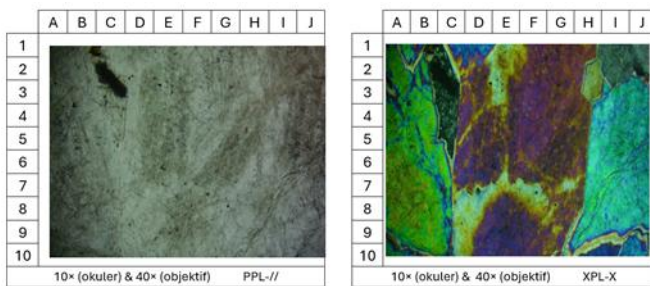
Sampel	Petrografi	Asosiasi mineral	
		Felsik	Mafik dan Aksesor
V1	Lava basal	Qz + Pl	Chl + Ep + Opq
V3	Urat Kuarsa	Qz	-
V4	Lava basal	Qz + Pl	Chl + Ep + Opq

V1 dan V4 memiliki asosiasi kuarsa, plagioklas, klorit, epidot, dan mineral opak, sedangkan V3 didominasi oleh kuarsa karena bagian yang dianalisis

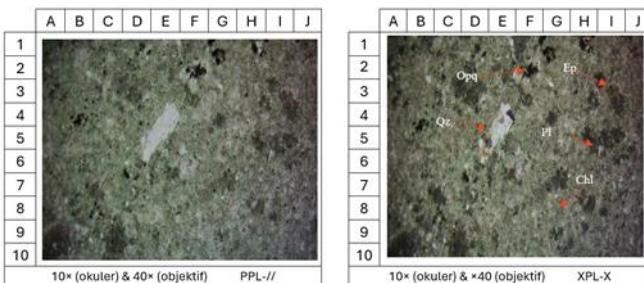
merupakan zona urat kuarsa. Klorit dan epidot hadir sebagai mineral sekunder, sementara sebagian plagioklas pada V1 menunjukkan tekstur alterasi. Mineral opak ditemukan pada V1 dan V4, tetapi karakter optiknya belum memungkinkan identifikasi jenis mineral yang spesifik (Gambar 2).



Gambar 2. Analisis Petrografi sampel V1



Gambar 3. Analisis Petrografi sampel V3



Gambar 4. Analisis Petrografi sampel V4

Kehadiran klorit dan epidot sebagai mineral sekunder menunjukkan bahwa batuan telah mengalami perubahan mineralogi setelah pembentukannya. Pada V1 dan V4, keberadaan mineral sekunder bersama urat kuarsa menunjukkan adanya interaksi fluida dengan batuan basal. Hal ini sejalan dengan penelitian (Corbett dan Leach, 1998; Sillitoe, 2010 yang mengatakan asosiasi kuarsa, klorit, dan epidot dapat berkembang sebagai asosiasi alterasi hidrotermal pada batuan vulkanik dan umum dijumpai pada zona alterasi propilitik yang berkaitan dengan sistem hidrotermal.

Keberadaan urat kuarsa penting dalam interpretasi geokimia karena rekahan dapat memberi ruang dan jalur bagi sirkulasi fluida. Hubungan antara rekahan, urat kuarsa, alterasi hidrotermal, dan mineralisasi merupakan karakter penting dalam sistem

hidrotermal karena struktur dapat mengontrol jalur pergerakan fluida dan lokasi pengendapan mineral. Pada V3, dominasi kuarsa mencerminkan karakter lokal zona urat yang dianalisis dan tidak dapat digunakan untuk merepresentasikan keseluruhan asosiasi mineral lava basal.

Geokimia berdasarkan XRF

Hasil XRF menunjukkan adanya variasi komposisi kimia antar sampel kandungan SiO_2 sebesar 45,17 wt% pada V1, 44,71 wt% pada V3, dan 43,33 wt% pada V4. V3 memiliki kandungan MgO dan Al_2O_3 tertinggi sedangkan V4 memiliki CaO tertinggi. Variasi tersebut menunjukkan bahwa ketiga sampel memiliki perbedaan komposisi kimia meskipun secara petrografi diinterpretasikan sebagai lava basal (Tabel 2)

Pada unsur minor, Cu terdeteksi pada seluruh sampel dengan konsentrasi 500 ppm pada V1, 500 ppm pada V3, dan 800 ppm pada V4. Au tidak terdeteksi pada ketiga sampel. Unsur S menunjukkan variasi yang lebih besar, yaitu 5.600 ppm pada V1, 4.100 ppm pada V3, dan 69.900 ppm pada V4. Kandungan S yang tinggi pada V4 menunjukkan adanya perbedaan geokimia yang signifikan dibandingkan V1 dan V3. Namun, keberadaan S dan Cu pada data XRF belum dapat digunakan untuk menentukan mineral pembawa maupun hubungan langsungnya dengan mineralisasi Cu-Au.

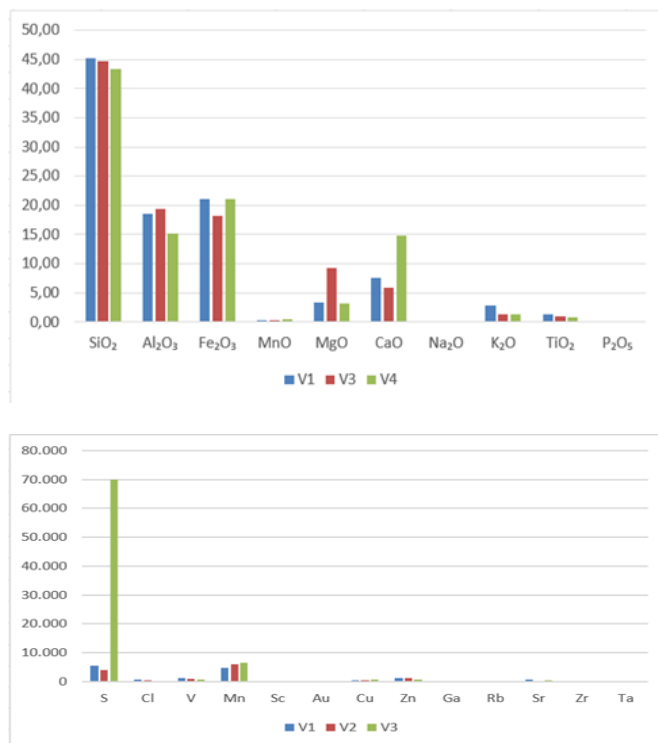
Data XRF memberikan gambaran komposisi kimia pada skala keseluruhan material yang di analisis. Interpretasi hasil tersebut tetap dipengaruhi oleh karakter sampel, preparasi, matriks, kondisi pengukuran, serta batas deteksi instrumen (Oyedotun, 2018). Oleh karena itu tidak terdeteksinya Au pada XRF tidak secara langsung menunjukkan bahwa Au tidak terdapat pada bagian tertentu sampel. Kondisi tersebut menjadi dasar untuk menggunakan micro-XRF guna mengetahui variasi unsur pada area yang lebih terlokalisasi.

Tabel 2. Konsentrasi Unsur Mayor dan Minor Terpilih pada Lava Basal di Daerah Lembah Segar

Sample	V1	V3	V4
Major element (wt%)			
SiO_2	45,17	44,71	43,33
Al_2O_3	18,51	19,29	15,17
Fe_2O_3	21,02	18,26	20,98
MnO	0,28	0,35	0,45
MgO	3,36	9,16	3,11
CaO	7,61	5,86	14,81
Na_2O	0,00	0,00	0,00
K_2O	2,78	1,37	1,29
TiO_2	1,26	1,00	0,85
P_2O_5	0,00	0,00	0,00
Total	100	100	100
Minor			

element (ppm)			
S	5.600	4.100	69.900
Cl	700	400	100
V	1.200	1.000	600
Mn	4.700	6.000	6.500
Sc	0	0	100
Au	0	0	0
Cu	500	500	800
Zn	1.200	1.100	700
Ga	0	100	0
Rb	200	100	100
Sr	800	300	400
Zr	100	100	0
Ta	200	100	100

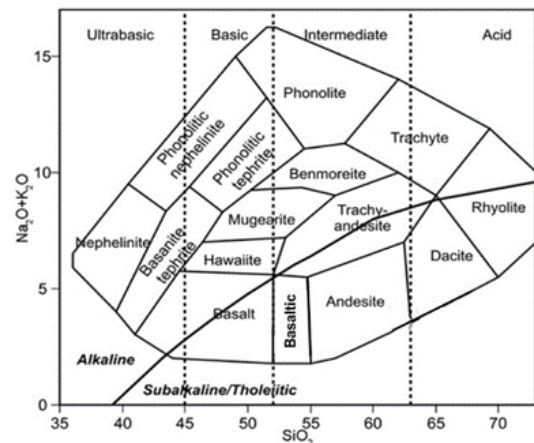
Data XRF memberikan gambaran komposisi kimia pada skala keseluruhan material yang di analisis. Interpretasi hasil tersebut tetap dipengaruhi oleh karakter sampel, preparasi, matriks, kondisi pengukuran, serta batas deteksi instrumen (Oyedotun, 2018). Oleh karena itu tidak terdeteksinya Au pada XRF tidak secara langsung menunjukkan bahwa Au tidak terdapat pada bagian tertentu sampel. Kondisi tersebut menjadi dasar untuk menggunakan micro-XRF guna mengetahui variasi unsur pada area yang lebih terlokalisasi.



Gambar 5. Histogram perbandingan unsur analisis XRF (a) unsur mayor, (b) unsur minor

Berdasarkan klasifikasi *Total Alkali-Silica* (TAS), sampel V1, V3, dan V4 masuk dalam kategori basalt dan

termasuk dalam seri subalkaline/tholeiitic. Sampel V1 memiliki kandungan SiO_2 sebesar 45,17 wt%, V3 sebesar 44,71 wt%, dan V4 sebesar 43,33 wt%. Posisi ketiga sampel pada basalt menunjukkan karakter komposisi basaltik yang konsisten dengan hasil analisis petrografi yang mengidentifikasi V1, V3, dan V4 sebagai lava basalt. Ketiga sampel juga berada pada bidang subalkaline/tholeiitic, yang menunjukkan karakter subalkalin berdasarkan hubungan SiO_2 dan total alkali.



Gambar 6. Klasifikasi TAS batuan beku vulkanik berdasarkan Cox et al. (1979).

Komposisi unsur berdasarkan mikro-XRF

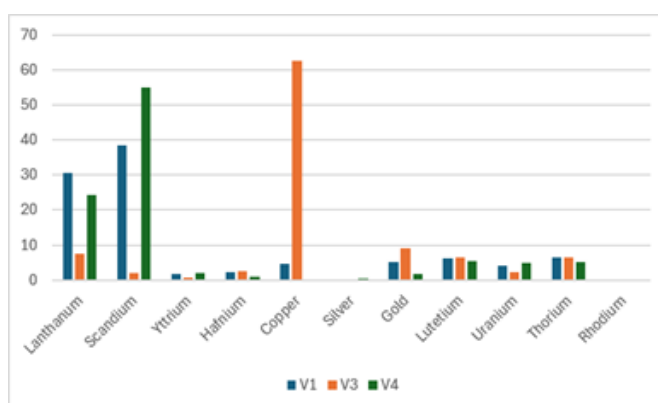
Hasil micro-XRF menunjukkan adanya perbedaan komposisi unsur pada area analisis V1, dan V4. Unsur yang terdeteksi meliputi La, Sc, Y, Hf, Cu, Ag, Au, Lu, U, Th, Rh. V3 menunjukkan konsentrasi relatif Cu dan Au tertinggi, masing-masing sebesar 62,778 wt% dan 9,219 wt%. Pada V1 Cu dan Au masing-masing sebesar 4,699 wt% dan 5,276 wt%, sedangkan V4 memiliki Cu dan Au sebesar 0,175 wt% dan 1,768 wt% (Tabel 3).

Table 3. Konsentrasi elemen pada sampel V1, V3, dan V4 di Lembah Segar

Element	A N	Seri es	V1 Norm. wt. %	V3 Norm. wt. %	V4 Norm. wt. %
Lanthanum	57	L-series	30.73006	7.476784	24.31425
			971	508	545
Scandium	21	K-series	38.56028	1.922623	54.92924
			986	159	424
Yttrium	39	K-series	1.798015	0.824227	2.013545
			415	473	396
Hafnium	72	L-series	2.176045	2.400407	1.020313
			281	24	573

Copper	29	K-series	4.699580305	62.77761609	0.175965247
Silver	47	K-series	0	0	0.372676348
Gold	79	L-series	5.275822582	9.218805511	1.767833938
Lutetium	71	L-series	6.104830526	6.536629703	5.48414275
Uranium	92	L-series	4.12957339	2.258679319	4.77165615
Thorium	90	L-series	6.527772926	6.584226992	5.15036691
Rhodium	45	K-series	0	0	0
Total			100	100	100

Variasi tersebut menunjukkan bahwa komposisi unsur pada area mikro yang di analisis bersifat heterogen. V3 memiliki karakter pengayaan Cu-Au yang paling menonjol, sedangkan V1 dan V4 memperlihatkan konsentrasi Sc yang lebih tinggi. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa karakter geokimia pada area yang di analisis tidak seragam dan dapat berkaitan dengan perbedaan bagian batuan yang menjadi target analisis.



Gambar 7. Perbandingan unsur analisis Mikro- XRF pada V1, V3, dan V4

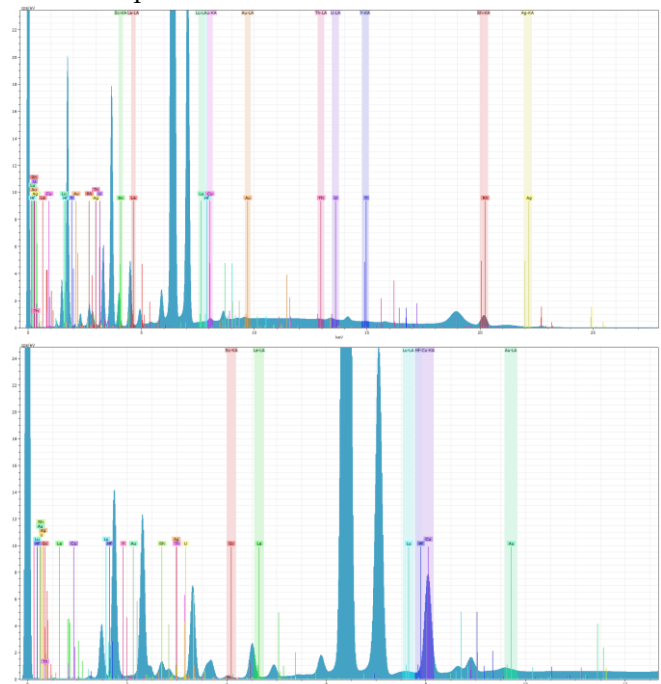
Posisi V3 pada zona urat kuarsa berdasarkan pengamatan petrografi memberikan konteks penting terhadap hasil micro-XRF. Namun, nilai micro-XRF tersebut merepresentasikan area analisis yang terbatas dan tidak dapat di perlakukan sebagai kadar Cu-Au keseluruhan sampel. Micro-XRF pada prinsipnya memberikan informasi mengenai komposisi unsur pada

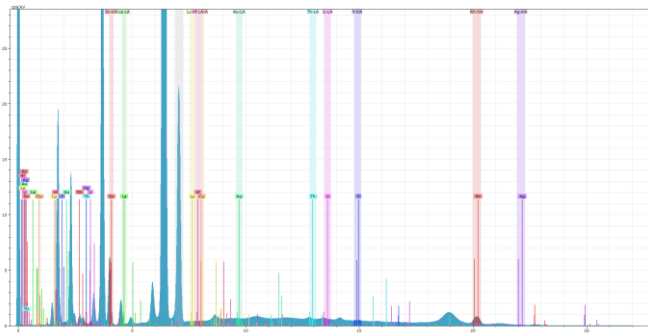
lokasi tertentu dengan resolusi spasial yang lebih tinggi sehingga variasi lokal dapat diamati secara rinci Barker et al. (2021). Perbandingan dengan XRF memperlihatkan perbedaan yang penting. XRF menunjukkan Cu tertinggi pada V4 sebesar 800 ppm, sedangkan micro-XRF menunjukkan nilai tertinggi pada V3. Selin itu, Au tidak terdeteksi melalui XRF, tetapi teridentifikasi pada ketiga sampel melalui Micro-XRF. Perbedaan ini menunjukkan pengaruh skala analisis terhadap hasil geokimia. XRF memberikan informasi pada skala keseluruhan material, sedangkan micro-XRF memberikan informasi mengenai bagian tertentu dari sampel. Oleh karena itu, kedua data digunakan secara komplementer, bukan sebagai nilai kadar yang dapat dibandingkan secara langsung.

Konfirmasi spektrum micro-XRF

Spektrum energi mikro-XRF pada V1, V3, dan V4 memperlihatkan puncak karakteristik unsur yang sesuai dengan unsur yang teridentifikasi pada analisis mikro-XRF kuantitatif. Perbedaan respons spektral antar sampel menunjukkan adanya variasi unsur pada area pengukuran V3 memperlihatkan respons Cu dan Au yang lebih menonjol dibandingkan V1 dan V4, sesuai dengan konsentrasi relatif kedua unsur tersebut pada analisis kuantitatif.

Pada V1, spektrum menunjukkan respons Cu dan Au yang sesuai dengan keberadaan kedua unsur pada hasil micro-XRF. Respons tersebut menunjukkan bahwa kedua unsur terdeteksi pada area yang di analisis. Tetapi tidak menunjukkan bahwa distribusinya seragam pada seluruh sampel. Pada V4, respons Cu lebih rendah dibandingkan V1 dan V3, sesuai dengan Cu sebesar 0,176 wt% pada hasil micro-XRF.



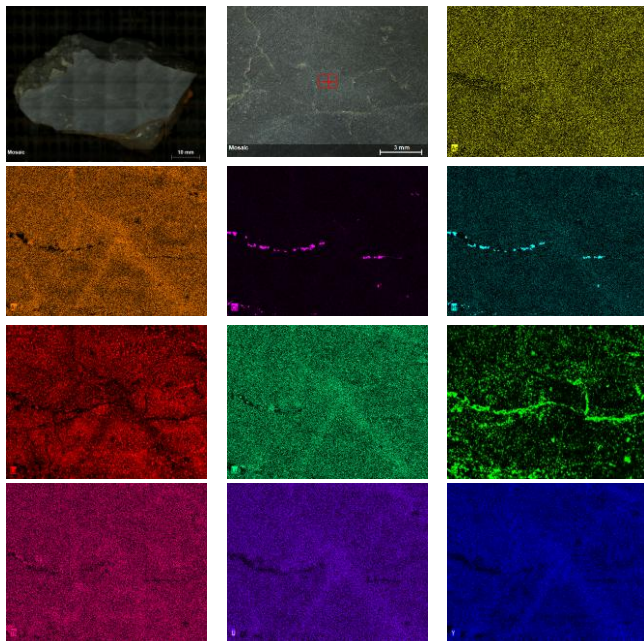


Gambar 8. Spektrum analisis mikro XRF (a) sampel v1, (b) sampel v3, (c) sampel v4

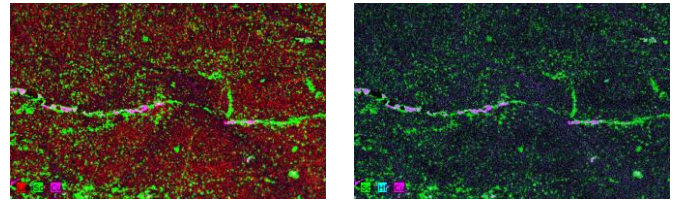
Distribusi spasial unsur pada *elemental mapping*

Elemental mapping menunjukkan bahwa distribusi unsur, pada ketiga sampel bersifat heterogen. Pada V1, Cu memperlihatkan konsentrasi yang jelas pada zona linear yang relatif menerus di bagian tengah area analisis. Hf dan Sc menunjukkan kecenderungan mengikuti Sebagian zona tersebut La, Lu, Th, U, Au, Y, dan Ag memiliki pola distribusi yang lebih luas atau terlokalisasi.

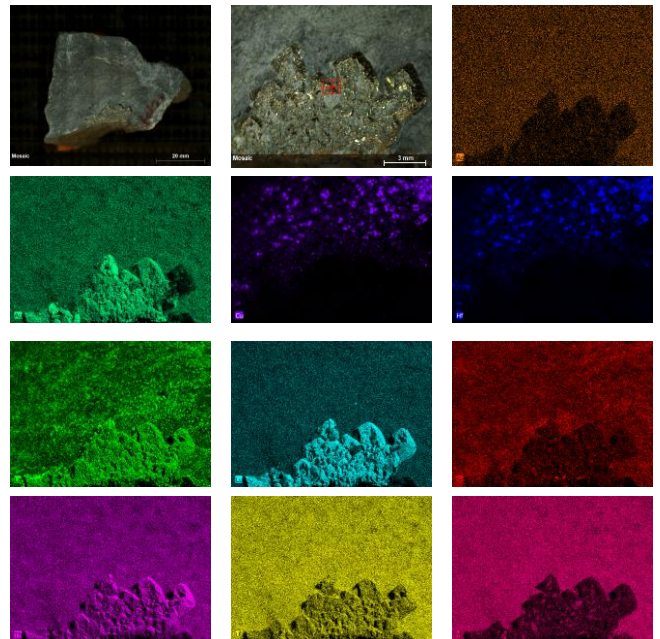
Pada zona linear Cu pada V1 memiliki kesesuaian spasial dengan bagian batuan yang berasosiasi dengan urat atau rekahan yang diamati melalui petrografi. Kesesuaian spasial tersebut menunjukkan bahwa pengayaan Cu pada area analisi berasosiasi dengan zona yang berkaitan dengan rekahan atau urat. Rekahan dapat menjadi jalur sirkulasi fluida hidrotermal sehingga hubungan spasial antara struktur, urat, alterasi dan pengayaan unsur perlu diperhatikan dalam interpretasi mineralisasi Corbett dan Leach, (1998); Sillitoe, (2010).



Gambar 9. Hasil *elemental mapping* V1



Gambar 10. Hasil kombinasi *elemental mapping* V1



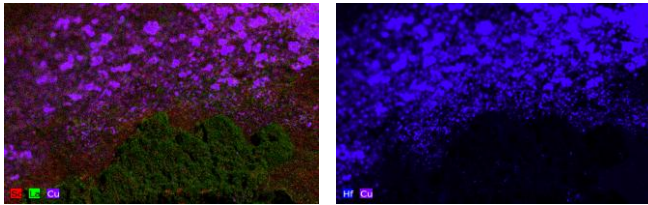
Gambar 11. Hasil *elemental mapping* V3

Pada V3, Cu dan Au menunjukkan pengayaan paling menonjol dibanding sampel lainnya. Hasil mikro XRF mencatat Cu sebesar 62,778 wt. % dan Au sebesar 9,219 wt. % yang merupakan nilai tertinggi pada ketiga sampel. Pengayaan tersebut secara spasial berada pada area yang berasosiasi dengan urat kuarsa berdasarkan hasil petrografi. Hal ini menunjukkan hubungan spasial antara urat dan pengayaan Cu-Au.

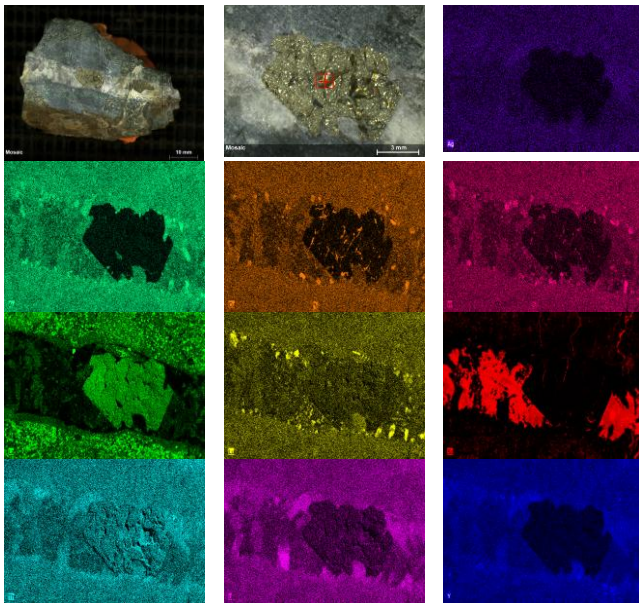
Pada V4, distribusi unsur bersifat heterogen, tetapi pengayaan Cu-Au relative lemah. Hal ini sesuai dengan hasil mikro XRF yang menunjukkan Cu sebesar 0,176 wt. % dan Au sebesar 1,768 wt. %. Meskipun XRF menunjukkan Cu 800 ppm dan s 69,900 ppm, elemental mapping tidak memperlihatkan zona pengayaan Cu-Au yang dominan. Perbedaan ini menunjukkan bahwa kandungan pada XRF tidak selalu mencerminkan distribusi unsur pada skala mikro.

Combined elemental mapping digunakan untuk memperjelas hubungan spasial antara unsur yang telah teridentifikasi melalui elemental mapping. Pada V1, kombinasi La-Sc-Cu menunjukkan bahwa Cu memiliki pola linear yang lebih jelas, sedangkan Sc terbesar lebih

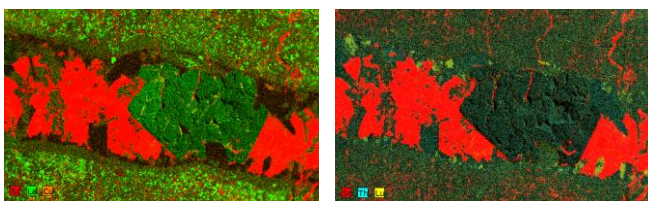
luas dan La memperlihatkan pola distribusi yang berbeda, pola yang relatif serupa terlihat pada kombinasi Sc-Hf-Cu, dengan Cu mengikuti zona tertentu sementara Sc dan Hf memiliki distribusi yang lebih luas.



Gambar 12. Hasil kombinasi *elemental mapping* V3



Gambar 13. Hasil *elemental mapping* V4



Gambar 14. Hasil kombinasi *elemental mapping* V4

Pada V3, kombinasi Sc-La-Cu menunjukkan tumpang tindih yang terbatas antara ketiga unsur. Sebaliknya, kombinasi Au-Cu memperlihatkan kedekatan spasial yang lebih jelas pada bagian bawah area analisis. Pola tersebut penting karena V3 juga menunjukkan konsentrasi Cu dan Au tertinggi pada analisis Micro-XRF. Dengan demikian, combined mapping memberikan bukti spasial tambahan bahwa pengayaan Cu-Au pada V3 terlokalisasi pada bagian tertentu dari area yang dianalisis.

Pada V4, unsur La, Sc, Y, Hf, Cu, Ag, Au, Lu, U, dan Th memperlihatkan pola distribusi yang berbeda.

Kombinasi Sc-Th-Lu menunjukkan konsentrasi Sc yang lebih kuat pada bagian tertentu, sedangkan Th dan Lu cenderung memiliki kedekatan spasial pada agregat di bagian tengah area analisis. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa setiap unsur memiliki pola distribusi yang tidak sama.

Kedekatan spasial antar unsur tidak dapat langsung diartikan sebagai bukti bahwa unsur tersebut berada dalam satu fase mineral. Interpretasi tersebut memerlukan konfirmasi menggunakan analisis mineralogi atau kimia mineral dengan resolusi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, combined mapping dalam penelitian ini digunakan untuk menentukan asosiasi spasial unsur, bukan untuk menentukan mineral pembawa secara pasti.

Integrasi data dan implikasi terhadap mineralisasi Cu-Au

Integrasi hasil petrografi XRF, Micro-XRF, spektrum energi, elemental mapping, dan combined mapping menunjukkan bahwa karakter mineralogi dan geokimia ketiga sampel memiliki variasi pada skala analisis yang berbeda. Petrografi memberikan informasi mengenai mineral penyusun, tekstur, mineral sekunder, dan perbedaan urat kuarsa. XRF memberikan gambaran komposisi kimia pada skala, sedangkan Micro-XRF memberikan informasi mengenai variasi unsur pada area yang lebih terlokalisasi. Elemental mapping dan combined mapping selanjutnya menunjukkan posisi dan hubungan spasial antar unsur

Indikasi mineralisasi Cu-Au paling kuat terdapat pada V3. Interpretasi tersebut didasarkan pada tiga bukti utama. Pertama, V3 merupakan bagian zona urat kuarsa berdasarkan pengamatan petrografi. Kedua, V3 menunjukkan konsentrasi relatif Cu dan Au tertinggi pada hasil Micro-XRF. Ketiga, combined mapping memperlihatkan kedekatan spasial Cu dan Au pada bagian tertentu area analisis.

Pada V1, indikasi pengayaan Cu ditunjukkan oleh pola linear pada elemental mapping yang secara spasial berasosiasi dengan bagian batuan yang berkaitan dengan urat atau rekahan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa Cu memiliki kecenderungan terlokalisasi pada zona tertentu. Namun, pola Au-Cu pada V1 tidak sejelas pada V3 sehingga bukti untuk menginterpretasikan V1 sebagai zona pengayaan Cu-Au lebih terbatas.

V4 menunjukkan karakter yang berbeda. XRF menghasilkan Cu tertinggi sebesar 800 ppm dan S sebesar 69.900 ppm, sedangkan Micro-XRF menunjukkan Cu relatif paling rendah dibandingkan V1 dan V3. Perbedaan tersebut menunjukkan konsentrasi unsur pada XRF tidak selalu merepresentasikan kondisi pada area mikro tertentu. Tingginya Cu dan S pada XRF V4 karena itu tidak dapat secara langsung digunakan

untuk menyatakan bahwa V4 memiliki indikasi mineralisasi Cu-Au lebih kuat dari pada V3.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa lava basal yang berasosiasi dengan urat kuarsa memiliki variasi mineralogi, geokimia, dan distribusi unsur pada skala analisis yang berbeda. Integrasi data menunjukkan bahwa V3 memiliki indikasi mineralisasi Cu-Au paling kuat, yang ditunjukkan oleh keterkaitan zona urat kuarsa dengan pengayaan Cu-Au pada skala mikro serta kedekatan spasial kedua unsur. V1 menunjukkan pengayaan Cu yang terlokalisasi pada zona yang berkaitan dengan urat atau rekahan, sedangkan V4 memperlihatkan perbedaan antara komposisi unsur pada XRF dan distribusinya pada skala mikro.

Temuan ini menegaskan bahwa indikasi mineralisasi Cu-Au bersifat lokal dan heterogen, sehingga kandungan unsur pada XRF tidak dapat digunakan sebagai dasar tunggal untuk mengevaluasi pengayaan mineralisasi. Konteks mineralogi, keberadaan urat, serta distribusi dan asosiasi spasial unsur perlu dipertimbangkan secara terpadu. Pendekatan tersebut memberikan interpretasi yang lebih kuat terhadap variasi pengayaan Cu-Au pada lava basal.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada jumlah sampel dan cakupan area analisis Micro-XRF, sehingga pola pengayaan yang diperoleh belum dapat digeneralisasikan sebagai representasi distribusi mineralisasi pada seluruh daerah penelitian. Selain itu, elemental mapping dan combined mapping hanya menunjukkan asosiasi spasial unsur dan belum dapat memastikan mineral pembawa Cu-Au maupun mekanisme pengendapannya. Penelitian selanjutnya perlu memperluas jumlah dan sebaran sampel serta menggunakan analisis mineralogi dan kimia mineral beresolusi lebih tinggi untuk mengidentifikasi fase pembawa Cu-Au dan menguji kesinambungan pola pengayaan yang telah teridentifikasi.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Geologi, Universitas Jambi atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan selama pelaksanaan penelitian. Penulis juga mengucapkan penghargaan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, dan pendampingan selama pengambilan data lapangan, analisis, hingga penyusunan manuskrip. Penulis juga mengucapkan rekan satu tim yang selalu membantu selama kegiatan lapangan hingga penyusunan manuskrip. Apresiasi juga disampaikan kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan teknis dan dukungan selama pelaksanaan kegiatan.

Referensi

- Baba, A. F., Mulyaningsih, S., & Hidayah, R. A. (2022). Ore mineralization characteristics in hydrothermal alteration at Mangunharjo and surrounding area, Pacitan, Indonesia. *EKSPLORIUM*, 43(1), 13–22. <https://doi.org/10.55981/eksplorium.2022.8133>
- Barker, R. D., Barker, S. L. L., Wilson, S. A., & Stock, E. D. (2021). Quantitative mineral mapping of drill core surfaces I: A method for μ XRF mineral calculation and mapping of hydrothermally altered, fine-grained sedimentary rocks from a Carlin-type gold deposit. *Economic Geology*, 116(4), 803–819. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4803>
- Corbett, G. J., & Leach, T. M. (1998). Southwest Pacific Rim gold-copper systems: Structure, alteration, and mineralization. Littleton, CO: Society of Economic Geologists.
- Cox, K. G., Bell, J. D., & Pankhurst, R. J. (1979). The interpretation of igneous rocks. London, England: George Allen & Unwin.
- Dana, C. D. P., Idrus, A., Setiawan, I., Handayani, E., Yurniadi, F., Meak, I. A., & Lai, C.-K. (2021). Geology, vein textures, and fluid inclusions of the Cibeber low-intermediate sulfidation epithermal Au-Ag orefield, Western Java. *Indonesian Journal on Geoscience*, 8(2), 157–175. <https://doi.org/10.17014/ijog.8.2.157-175>
- Faesar, A., Aminuddin, M. I. K. A., & Ubaidillah, A. S. (2022). Host rock petrology, hydrothermal alteration characteristics & ore mineralogy of porphyry copper-gold deposit, Brambang, Lombok, West Nusa Tenggara, Indonesia. *Materials Today: Proceedings*, 66(5), 3071–3076. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.373>
- Fadlin, R., Takahashi, R., Agangi, A., Sato, H., Idrus, A., Sutopo, B., & Pratiwinda, R. (2023). Geology, mineralization and calcite-rich potassic alteration at the Humpa Leu East (HLE) porphyry Cu-Au prospect, Hu'u district, Sumbawa Island, Indonesia. *Resource Geology*, 73(1), e12309. <https://doi.org/10.1111/rge.12309>
- Heidarian, H., Lentz, D. R., Thorne, K., & Rogers, N. (2021). Application of portable X-ray and micro-X-ray fluorescence spectrometry to characterize alteration and mineralization within various gold deposits hosted in southern New Brunswick, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*, 229, 106847. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106847>
- Idrus, A., Dana, C. D. P., Setijadji, L. D., Sutarto, Ernowo, Sakellaris, G. A., & van Leeuwen, T. (2024). Nature of magma and ore-forming conditions at the Randu Kuning porphyry Cu-Au deposit,

- Indonesia: A comparative study with other Cu-Au deposits in the region. *International Geology Review*, 66(13), 2365–2383. <https://doi.org/10.1080/00206814.2023.2283739>
- Oyedotun, T. D. T. (2018). X-ray fluorescence (XRF) in the investigation of the composition of earth materials: A review and an overview. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2(2), 148–154. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452459>
- Samalehu, H., Idrus, A., Setiawan, N. I., & Sukadana, I. G. (2021). Ore genesis and minor elements of orogenic gold deposit at Tamilouw-Haya, Seram Island, Indonesia. *Bulletin of the Iraq Natural History Museum*, 16(3), 301–323. <https://doi.org/10.26842/binhm.7.2021.16.3.0301>
- Schirra, M., Laurent, O., Zwyer, T., Driesner, T., & Heinrich, C. A. (2022). Fluid evolution at the Batu Hijau porphyry Cu-Au deposit, Indonesia: Hypogene sulfide precipitation from a single-phase aqueous magmatic fluid during chlorite-white-mica alteration. *Economic Geology*, 117(5), 979–1012. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4921>
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Xiao, C.-H., Yu, P.-P., Liu, X.-H., Liu, X.-C., Tang, Y.-W., Wang, W.-L., & Zhang, Y. (2023). Cassiterite U-Pb dating and micro-XRF analysis constraint on the formation of Xinlu Sn-Zn deposit, South China. *Frontiers in Earth Science*, 10, 1031681. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1031681>