Buletin Sumber Daya Geologi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi,
Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral
Website: https://buletinsdg.geologi.esdm.go.id
ISSN 1907-5367, e-ISSN 2580-1023

KONTROL STRUKTUR TERHADAP ALTERASI DAN MINERALISASI PADA CEBAKAN EPITERMAL PROSPEK SECANG, KECAMATAN CAMPUR DARAT, KABUPATEN TULUNG AGUNG, PROVINSI JAWA TIMUR

STRUCTURAL CONTROL ON ALTERATION AND MINERALIZATION OF EPITHERMAL DEPOSIT SECANG PROSPECT, CAMPUR DARAT SUB DISTRICT, TULUNG AGUNG DISTRICT, EAST JAVA PROVINCE

Rizqi Muhammad Fadilah[1], Agata Vanesa[2], Aton Patonah[1], dan Iyan Haryanto[1]
[1]Universitas Padjadjaran, Bandung, Indonesia
[2]Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Indonesia

Email korespondensi: rizqimuhammad.fadhilah@gmail.com
Diterima: 11 November 2024; Direvisi: 17 Februari 2025; Disetujui: 24 Juli 2025
DOI: https://doi.org/10.47599/bsdg.v20i2.519

ABSTRAK

Daerah penelitian termasuk ke dalam wilayah administratif Kecamatan Campurdarat, Kabupaten Tulungagung, Provinsi Jawa Timur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh struktur geologi terhadap proses alterasi dan mineralisasi dengan pendekatan metode pemetaan geologi dan alterasi, pengukuran data kekar, analisis petrografi dan mineragrafi, serta interpretasi data spektral. Hasil pemetaan geologi menunjukkan litostratigrafi dari muda ke tua, yaitu Endapan Aluvial (Sa), Satuan Batugamping (Sbg), Satuan Breksi Vulkanik (Sbv), dan Satuan Lava Andesit (Sla). Struktur geologi berupa sesar dan kekar dimana struktur sesar terbentuk dengan mekanisme *wrench fault* yang menunjukkan lateral kiri dengan terbentuknya struktur *transpresional pop up*. Alterasi yang berkembang termasuk ke alam sistem cebakan epitermal sulfidasi tinggi yang membentuk empat zona alterasi, yaitu silisifikasi, argilik lanjut, argilik, dan propilitik. Mineralisasi hadir bersama urat dan kuarsa residual terlindi. Mineral bijih terdiri dari pirit, kalkopirit, sfalerit, markasit, magnetit, rutil, dan kovelit. Alterasi dan mineralisasi secara umum dikontrol oleh sesar-sesar mendatar dengan arah umum timur laut-barat daya dan barat laut-tenggara. Sesar tersebut menyebabkan adanya *overprint* alterasi dan zona hancuran.

Kata kunci: struktur geologi, alterasi, mineralisasi, epitermal sulfidasi tinggi

ABSTRACT

The study area is located within the administrative district of Campurdarat Subdistrict, Tulungagung Regency, East Java Province. This research aims to analyze the role of geological structures on alteration and mineralization processes using geological and alteration mapping method, joint measurement, petrographic and mineragraphic analysis, and spectral data interpretation. The geological mapping results indicate that the lithostratigraphy of the study area, from youngest to oldest, consists of Alluvial Unit (Sa), Limestone Unit (Sbg), Volcanic Breccia Unit (Sbv), and Andesite Lava Unit (Sla). The geological structures include

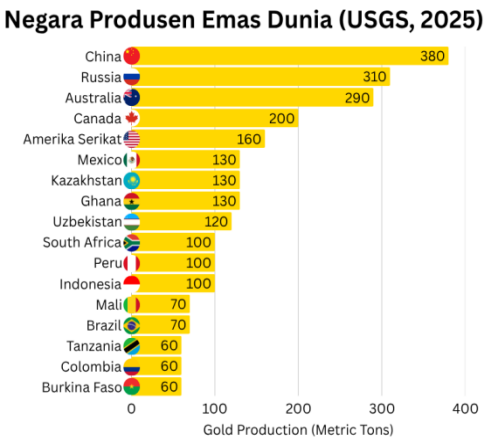
faults and joints, formed through a wrench fault mechanism, indicating left-lateral movement with the formation of a transpressional pop-up structure. Alteration zones belong to the high-sulfidation epithermal deposit system, consisting of four alteration types, comprising silicifaction, advanced argillic, argillic, and propylitic. Mineralization in the study area is associated with veins and vuggy quartz. Ore minerals present include pyrite, chalcopyrite, sphalerite, marcasite, magnetite, rutile, and covellite. Alteration and mineralization in the study area are controlled by northeast-southwest and northwest-southeast strike-slip faults. Faults in the study area have caused alteration overprinting and fault zones.

***Keywords**: Geological structure, alteration, mineralization, high sulphidation epithermal*

PENDAHULUAN

Indonesia menempati peringkat ke-8 sebagai produsen emas terbesar di dunia, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 (United States Geological Survey, 2025), diyakini akan terus mengalami pertumbuhan produksi seiring berjalannya waktu. Faktor ini disebabkan oleh letak geografis Indonesia yang merupakan pertemuan tiga lempeng utama, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Eurasia. Pertemuan lempeng ini menempatkan Indonesia dalam jalur Gunung Api Asia-Pasifik atau dikenal sebagai *Ring of Fire*. Aktivitas lempeng inipun menciptakan busur magmatik di sepanjang selatan Pulau Jawa, yang dikenal sebagai busur magmatik Sunda. Busur magmatik memicu terbentuknya cebakan mineral logam yang berasosiasi dengan proses magmatik seperti sistem epitermal dan porfiri. Contoh cebakan yang terjadi pada busur magmatik Sunda adalah cebakan porfiri Cu-Au yang ditemukan di Tumpangpitu, Banyuwangi (855 t Au dan 8,65 Mt Cu), Elang, Sumbawa (789 t Au dan 7,4 Mt Cu), dan lokasi lainnya (Maryono *et al*, 2018). Oleh karena itu, eksplorasi sumber daya mineral banyak dilakukan di seluruh penjuru Indonesia.

Dalam eksplorasi, untuk mengetahui genesa sebuah cebakan mineral, perlu mempertimbangkan aspek geologi dari cebakan tersebut. Selain aspek stratigrafi dan litologi, aspek struktur geologi dari suatu cebakan mineral harus diteliti lebih lanjut. Hal ini penting pada cebakan epitermal, karena proses alterasi dan mineralisasi pada tipe ini sebagian besar dipengaruhi oleh struktur geologi. Selain itu, struktur geologi juga berperan sebagai jalur dalam pergerakan fluida hidrotermal.



Gambar 1. Negara produsen emas terbesar di dunia (USGS, 2025)

Emas dapat ditemukan dalam batuan yang mengandung mineral-mineral ekonomis dalam bentuk bijih, yaitu kumpulan dari batuan maupun mineral yang bersifat logam dan mineral pembawa logam (*metal-bearing mineral*) dengan konsentrasi yang tinggi, menjadikannya berpotensi untuk dieksploitasi (Bateman, 1981).

Penelitian ini dilaksanakan di daerah Secangi Kecamatan Campurdarat, Kabupaten Tulungagung, Provinsi Jawa Timur. Cebakan epitermal di Prospek Secang ditemukan dengan indikasi epitermal sulfidasi tinggi yaitu berupa *vuggy quartz* (Pratomo *et al*, 2020). Indikasi mineralisasi di Prospek Secang ditemukan berada di Desa Pojok, Kecamatan Campurdarat dengan kandungan Au hingga mencapai 2,45 ppm (Pratomo *et al*, 2020). Prospek

Secang terbentuk pada Kala Oligosen – Miosen dan dipengaruhi oleh sesar mendatar serta sesar-sesar penyertanya (Maryono *et al*, 2018).

Berdasarkan hasil penelitian terdahulu (Pratomo *et al*, 2020), daerah penelitian menunjukkan keberadaan tiga zona alterasi, yaitu zona argilik lanjut, argilik, dan propilitik. Alterasi dengan tingkat terubah secara kuat ditemukan pada litologi andesit yang memiliki permeabilitas rendah, mengindikasikan bahwa aliran fluida hidrotermal memerlukan faktor lainnya seperti rekahan atau patahan agar dapat mengubah batuan andesit tersebut.

Sehubungan dengan hal tersebut, penelitian ini difokuskan untuk mengkaji pengaruh struktur geologi terhadap distribusi alterasi dan mineralisasi dalam pembentukan cebakan mineralisasi epitermal di daerah Prospek Secang. Penelitian dilakukan dengan metode observasi lapangan dan pemetaan geologi permukaan pada skala 1: 10.000. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis struktur geologi secara lebih rinci guna memahami keterkaitannya dengan pembentukan zona alterasi dan mineralisasi Hasil kegiatan ini diharapkan dapat memberikan dasar yang kuat untuk penentuan zona prospek yang layak menjadi fokus utama dalam tahap eksplorasi lanjutan di daerah tersebut.

KONDISI GEOLOGI

Geologi regional daerah penelitian termasuk dalam peta geologi lembar Tulungagung (Samodra *et al*, 1992) (Gambar 2). Stratigrafi Prospek Secang disusun oleh beberapa formasi batuan dari tua ke muda, yaitu Formasi Mandalika (Tomm), Formasi Campurdarat (Tmcl), dan Aluvium (Qa). Formasi Mandalika disusun oleh batuan vulkanik berumur Oligosen Akhir–Miosen Awal yang terdiri atas breksi gunungapi, lava, tuf, serta sisipan batupasir dan batulanau. Formasi Campurdarat (Tmcl) disusun oleh batugamping kristalin dan batulempung karbonatan berumur Miosen Awal, dengan keterdapatan fosil foraminifera yaitu *Lepidocyclina sp., Miogypsina sp., Heterostegina sp., Cycloclypeus annulatus., Flosculinella sp., Borelis sp., Operculina sp., Europetlia sp., Austrotrillina sp.,* dan *Spiroloclypeus sp* (Praptisih, 2011). Endapan aluvium (Qa) merupakan material lepas berukuran bongkah hingga lempung yang terakumulasi oleh endapan sungai berumur Holosen. Prospek Secang dibentuk oleh struktur geologi regional berupa sesar berarah timur laut-barat daya (Samodra *et al*, 1992).

BAHAN DAN METODE ANALISIS

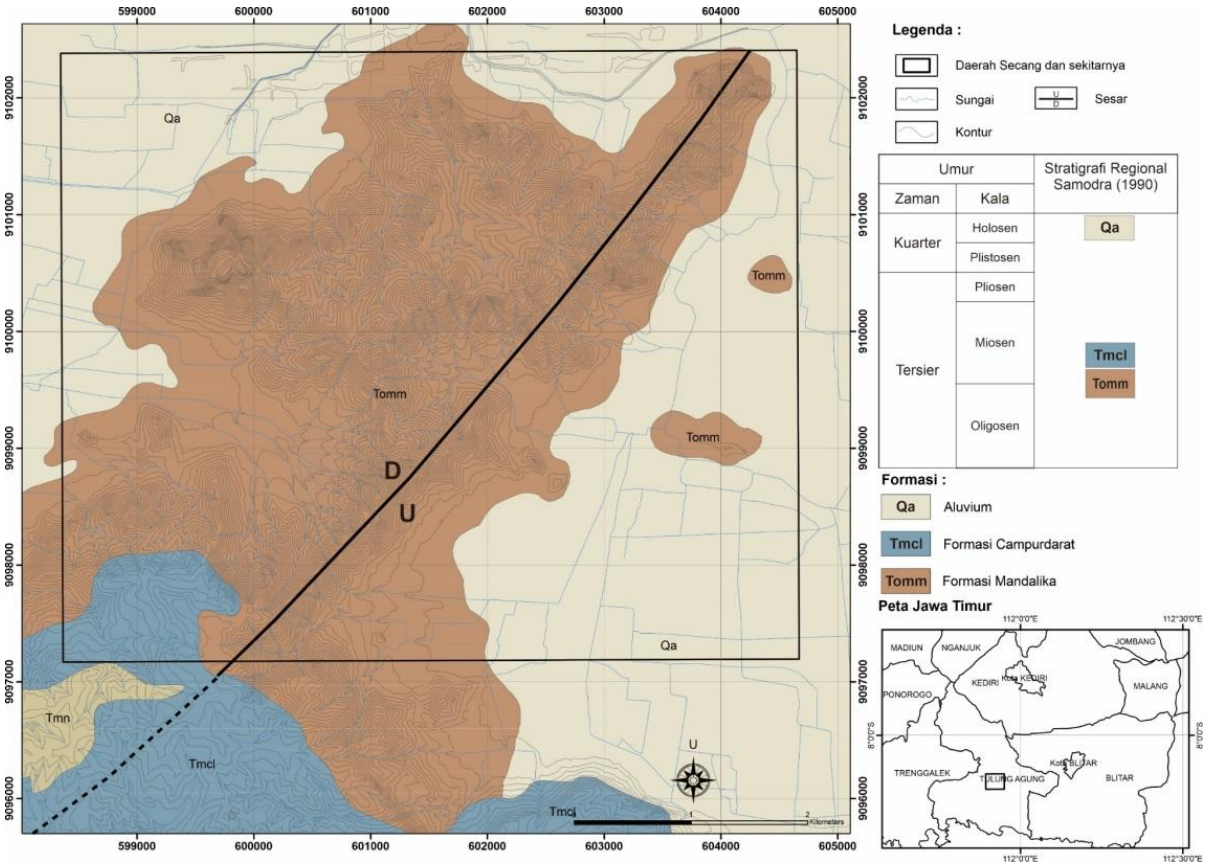
Pengambilan data primer dilakukan melalui pemetaan geologi dengan skala 1: 10.000, yang mencakup observasi litologi, struktur geologi, alterasi, dan mineralisasi. Setelah observasi lapangan dan pemetaan geologi, dilakukan pemilihan sampel yang mewakili setiap batuan untuk dianalisis di laboratorium, meliputi analisis petrografi, mineragrafi, geokimia; dan di studio.

Jenis analisis, jenis sampel dan jumlah sampel yang dianalisis ditampilkan dalam Tabel 1. Analisis petrografi dilakukan untuk identifikasi karakteristik tekstur, struktur, komposisi mineral primer dan mineral sekunder, dan nama batuan. Analisis petrografi dilakukan terhadap sampel sayatan tipis menggunakan mikroskop polarisasi dengan merek Zeiss Axioscope, tujuannya untuk mengidentifikasi mineral primer dan alterasi, berdasarkan tekstur, komposisi mineral, dan struktur batuan dalam sayatan tipis. Analisis petrografi dilakukan di laboratorium PSDMBP.

Analisis mineragrafi dilakukan untuk mengidentifikasi jenis mineral bijih dan paragenesanya. Sampel mineragrafi dipilih berdasarkan karakteristik batuan yang menunjukkan potensi mineralisasi yang tinggi, seperti batuan dengan tekstur *vuggy quartz*, *vein*, dan batuan dari zona

alterasi argilik lanjut. Analisis dilakukan dengan pengamatan sayatan poles menggunakan mikroskop polarisasi reflektif dengan merek Zeiss Axioscope, yang dilakukan di laboratorium Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panasbumi.

Analisis ASD dilakukan untuk mengidentifikasi jenis mineral alterasi, terutama mineral lempung yang tidak teridentifikasi secara jelas melalui petrografi. Pengukuran ASD bekerja dengan menganalisis spektrum inframerah pada panjang gelombang 350 nm s.d. 2500 nm, sehingga dapat membedakan mineral alterasi berdasarkan pola difraksi tertentu. Interpretasi hasil pengukuran ASD mengacu pada Atlas of Alteration (Thompson, 1996), dengan melihat kehadiran mineral karbonat, clay minerals, sulfat, klorit, dan silikat.



Gambar 2. Peta Geologi Regional Daerah Penelitian (Samodra *et al*, 1992)

Tabel 1. Sampel yang digunakan dalam analisis laboratorium di daerah penelitian

Jenis Batuan	Jenis Analisis			
	Petrografi	Mineragrafi	ASD	XRD
Andesit	9	2	35	3
Breksi Andesit	6		13	2
Batugamping	2		2	
Urat Kuarsa	1	1	1	
Batuan Tersilisifikasi	1	5	9	

Analisis XRD (X-Ray Difraction) untuk meningkatkan ketelitian identifikasi mineral alterasi dengan memanfaatkan sinar-X dalam menentukan struktur kristal suatu mineral. Analisis ini berguna untuk mendeteksi mineral-mineral yang tidak teridentifikasi melalui ASD, termasuk mineral *anhydrous* yang sering kali tidak muncul dalam pengukuran ASD. Dengan demikian, XRD berperan penting dalam konfirmasi hasil dan penentuan zonasi alterasi secara lebih akurat.

Analisis studio dilakukan terhadap data struktur geologi (data sesar dan data kekar) hasil pengukuran di lapangan melalui pendekatan analisis stereografi. Analisis sesar bertujuan untuk menentukan arah utama tegasan, menganalisis pergerakan relatif, dan penamaan sesar. Data sesar diperoleh melalui pengamatan cermin sesar (*slickenside*) serta pengukuran pada *shear fracture* dan *gash fracture*. Sementara itu, data kekar dianalisis untuk menginterpretasikan pola tegasan di daerah penelitian.

Analisis struktur geologi juga diperkuat oleh data sekunder berupa peta geologi regional Lembar Tulungagung, interpretasi pola kelurusan, dan data *Digital Elevation Model (*DEM*)*. Integrasi data tersebut dapat memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh terhadap mekanisme pembentukan struktur geologi daerah penelitian.

Seluruh hasil analisis studio dan analisis laboratorium diintegrasikan melalui aplikasi GIS untuk menghasilkan peta-peta tematik, seperti peta geologi dan peta alterasi, guna mendapatkan informasi terkait hubungan struktur terhadap pembentukan alterasi dan mineralisasi di daerah penelitian.

HASIL PENELITIAN

Geologi

Hasil kegiatan pemetaan geologi dan rekonstruksi penampang geologi menunjukkan bahwa stratigrafi daerah penelitian terdiri dari empat satuan batuan, dari tua ke muda yaitu satuan lava andesit, satuan breksi vulkanik, satuan batugamping, dan endapan aluvium (Gambar 7). Satuan lava andesit tersusun atas andesit. Lava andesit menunjukkan warna segar abu-abu, warna lapuk abu gelap kecoklatan, memiliki tekstur porfiritik, masif, dan terdapat struktur *sheeting joint* di beberapa stasiun pengamatan (Gambar 4A). Secara pengamatan mikroskopis, batuan memiliki karakteristik porfiritik, inequigranular, hipokristalin, hipidiomorf-allotriomorf. Selain itu, batuan memiliki berbagai tekstur khas, yaitu tekstur hyalopilitik, pilotaksitik, dan glomeroporfiritik (Gambar 5A). Fenokris yang ditemukan pada sayatan adalah plagioklas (An=64, labradorit), piroksen, K-feldspar, kuarsa, dan hornblende. Penentuan umur satuan disebandingkan dengan Formasi Mandalika yang terbentuk pada kala Oligosen Akhir-Miosen Awal (Samodra *et al*, 1992).

Satuan breksi vulkanik tersusun atas breksi andesit dengan fragmen andesit dan matriks tuf (Gambar 4B). Breksi vulkanik memiliki warna segar abu kehijauan-coklat kekuningan, warna lapuk abu kehitaman, menyudut tanggung-membundar tanggung, fragmen berupa andesit terubahkan, matriks berupa tuf terubahkan, sortasi buruk, *grain supported*. Secara mikroskopis, fragmen batuan memiliki kesamaan dengan satuan lava andesit. Sedangkan, matriks batuan memiliki karakteristik sortasi buruk, *matrix supported*, menunjukkan komponen terdiri dari litik dan kristal (Gambar 5B). Penentuan umur satuan disebandingkan dengan Formasi Mandalika yang terbentuk pada kala Oligosen Akhir-Miosen Awal (Samodra *et al*, 1992).

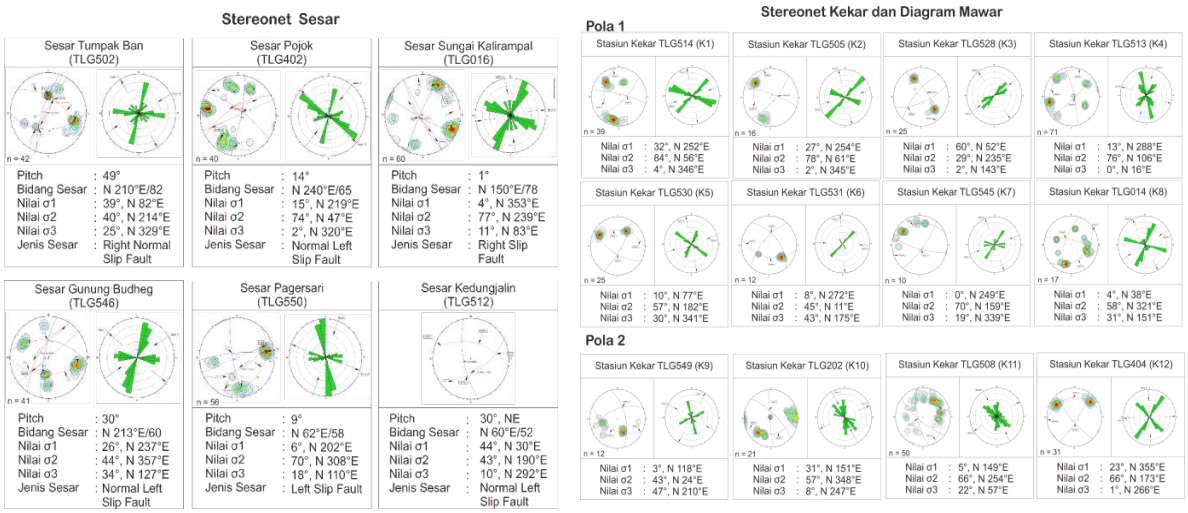
Satuan batugamping tersusun atas batugamping klastik dan kristalin. Batugamping menunjukkan warna segar coklat kekuningan, warna lapuk kuning krem, berukuran kalkarenit hingga kalsirudit, terdapat kenampakan tekstur fosil sisa dari koral dan foraminifera sekitar

20% hingga 30%, pemilahan buruk, dan kemas terbuka (Gambar 4C). Secara pengamatan mikroskopis, batuan memiliki karakteristik komponen asal tidak saling berikatan, pemilahan buruk, derajat pembundaran *subangular - subrounded*, *grain supported*, dan hubungan antar butir menunjukkan *floating contact*. Komposisi batuan terdiri dari porositas 20%, fragmen skeletal 22%, fragmen non skeletal 5%, mikrit 12%, sparit 26%, dan mineral karbonat 15% (Gambar 5C). Penentuan umur satuan disebandingkan dengan Formasi Campurdarat yang terbentuk pada Kala Miosen Awal (Samodra *et al*, 1992). Berdasarkan keterdapatan fosil, satuan batugamping terendapkan di lingkungan *back reef* (Praptisih, 2011).

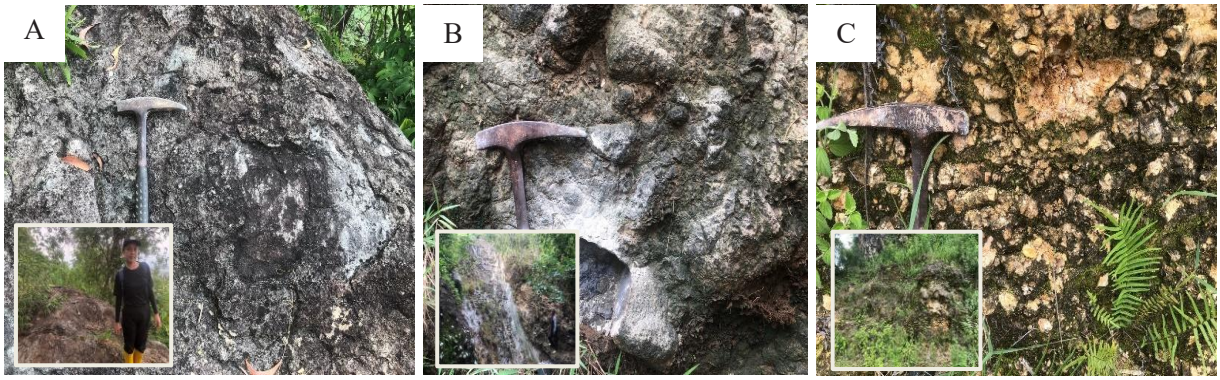
Hasil observasi di daerah penelitian terdapat indikasi sesar berupa bidang sesar, breksi sesar, bidang bukaan, dan kekar gerus. Struktur geologi di daerah penelitian dikontrol oleh sesar utama (orde 1) berarah timur laut-barat daya dengan gerak sesar mengiri turun. Selain itu, terdapat sesar penyerta (orde 2) dengan yang berarah barat laut-tenggara dengan gerak sesar menganan dan berarah timur laut-barat daya dengan gerak sesar menganan turun (Gambar 7). Sesar orde 1 di daerah penelitian berfungsi sebagai jalur utama migrasi fluida hidrotermal asam, yang mengontrol pembentukan zona alterasi argilik lanjut dan mineralisasi primer berupa kuarsa *vuggy* dan pirit. Di sisi lain, sesar orde 2 berperan sebagai rekahan lokal yang memfasilitasi reaktivasi dan pencampuran fluida sisa. Struktur orde 2 ini berasosiasi dengan mineralisasi logam dasar, seperti kovelit, sfalerit, dan kalkopirit.

Berdasarkan korelasi antara tren kekar gerus di daerah penelitian dengan tegasan tektonik regional di daerah sekitarnya, daerah penelitian dikontrol oleh dua kejadian tektonik yang berbeda di kala Miosen Awal (Abdullah *et al*, 2003). Kekar gerus pola 1 menunjukkan kejadian tektonik dengan gaya tegasan utama berarah timur laut-barat daya. Sedangkan, kekar gerus pola 2 menunjukkan kejadian tektonik dengan gaya tegasan utama barat laut-tenggara (Gambar 3).

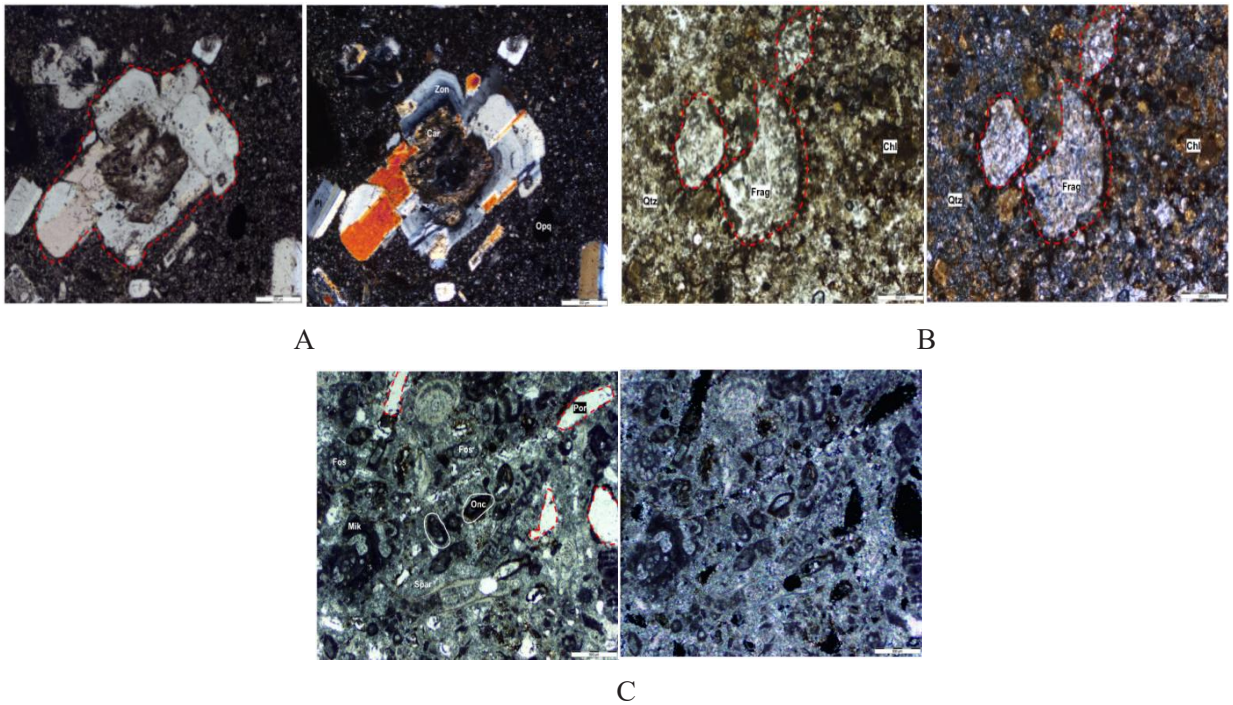
Daerah penelitian terbentuk dengan mekanisme *wrench fault* yang menunjukkan pergerakan lateral kiri, dengan terbentuknya struktur *transpresional pop-up* (Gambar 6) yang dihasilkan melalui dominasi rezim kompresional dibandingkan rezim ekstensional. Perkembangan sesar *transpresional* di daerah penelitian membentuk *positive flower structure* (Huang, 2017), yang ditandai dengan diapitnya satuan andesit dan satuan breksi vulkanik oleh endapan aluvium dengan umur Holosen. Hal ini membentuk tinggian-tinggian di sekitar zona sesar utama.



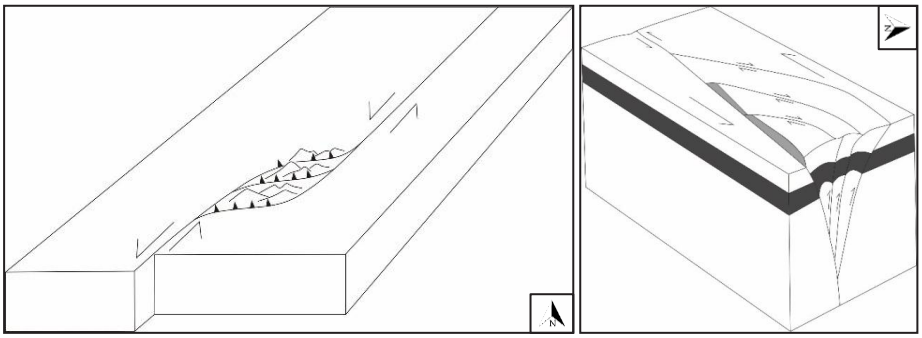
Gambar 3. Analisis stereografi sesar dan kekar daerah penelitian



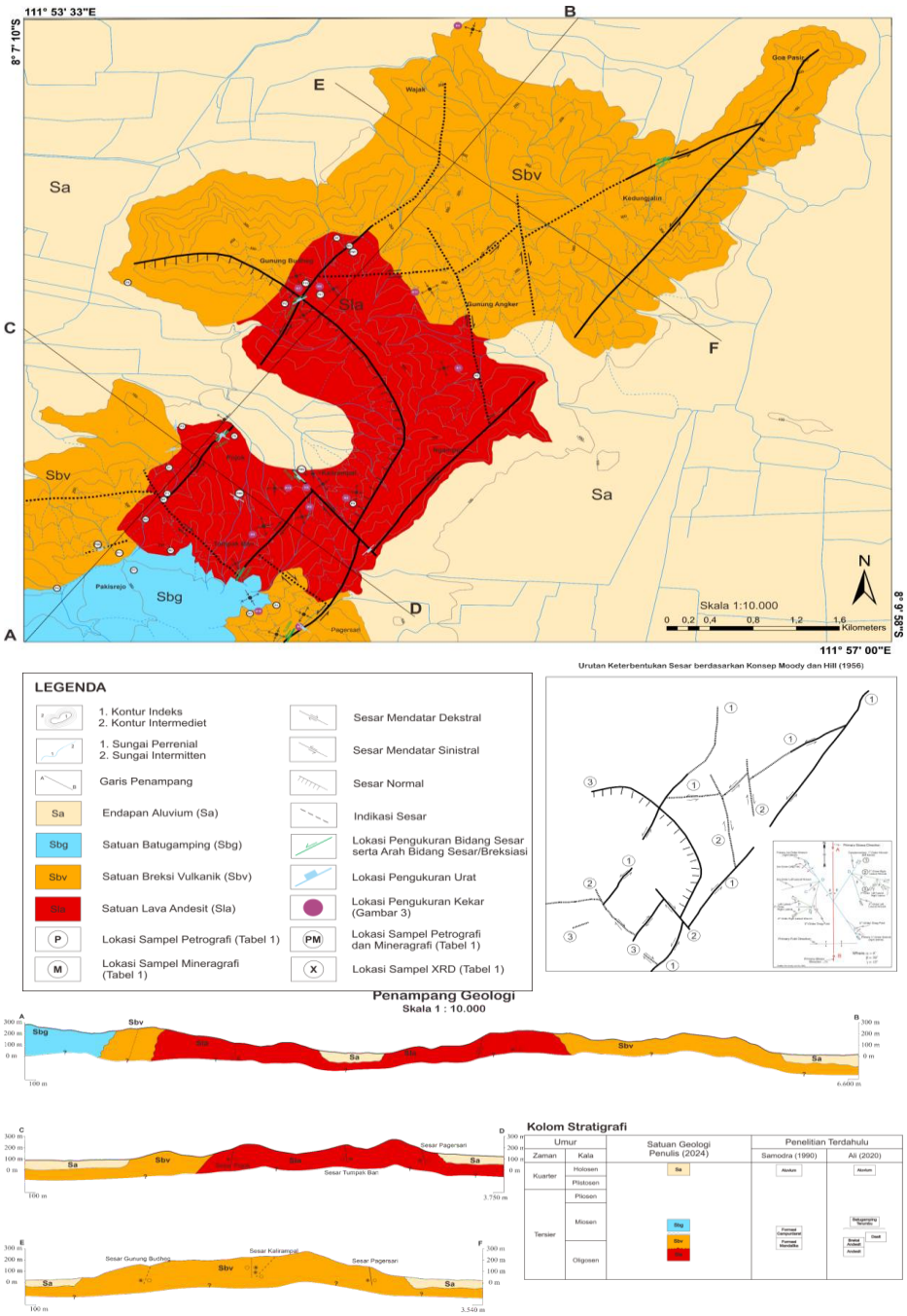
Gambar 4. Kenampakan satuan batuan di daerah penelitian: (A) Singkapan lava andesit, terendapkan sebagai aliran. (B) Singkapan breksi vulkanik, terdiri dari matriks tuf dan fragmen andesit. (C) Singkapan batugamping, tidak mengalami alterasi



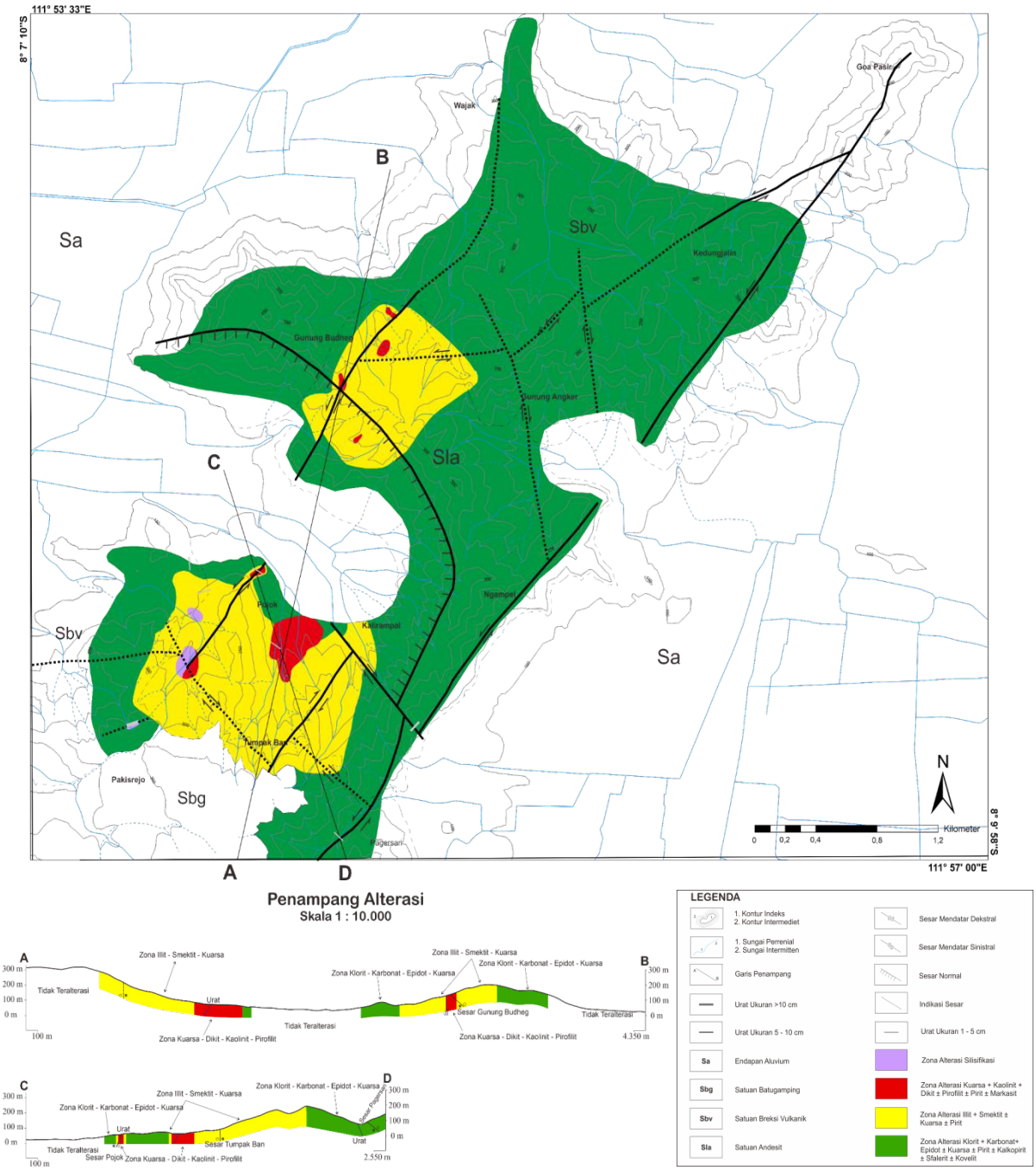
Gambar 5. Fotomikrograf satuan batuan di daerah penelitian: (A) Lava andesit, dengan tekstur porfiritik, plagioklas terubahkan oleh karbonat (TLG 003). (B) Breksi vulkanik, matriks tuf menunjukkan fragmen litik dan massa dasar yang terubahkan oleh klorit (TLG 101B) (C) Batugamping, fosil sudah mengalami rekristalisasi dan dilapisi mikrit disekitarnya (TLG 524) (Keterangan: Pl: plagioklas, Zon: zoning, Car: karbonat, Opq: mineral opak, garis putus merah A: tekstur glomeroporfiritik, Frag: fragmen litik, Chl: klorit, Qtz: kuarsa, Fos: fosil, Onc: oncoid, Spar: sparit, Mik: mikrit, Por: porositas)



Gambar 6. Mekanisme pembentukan struktur geologi daerah penelitian



Gambar 7. Peta geologi daerah penelitian



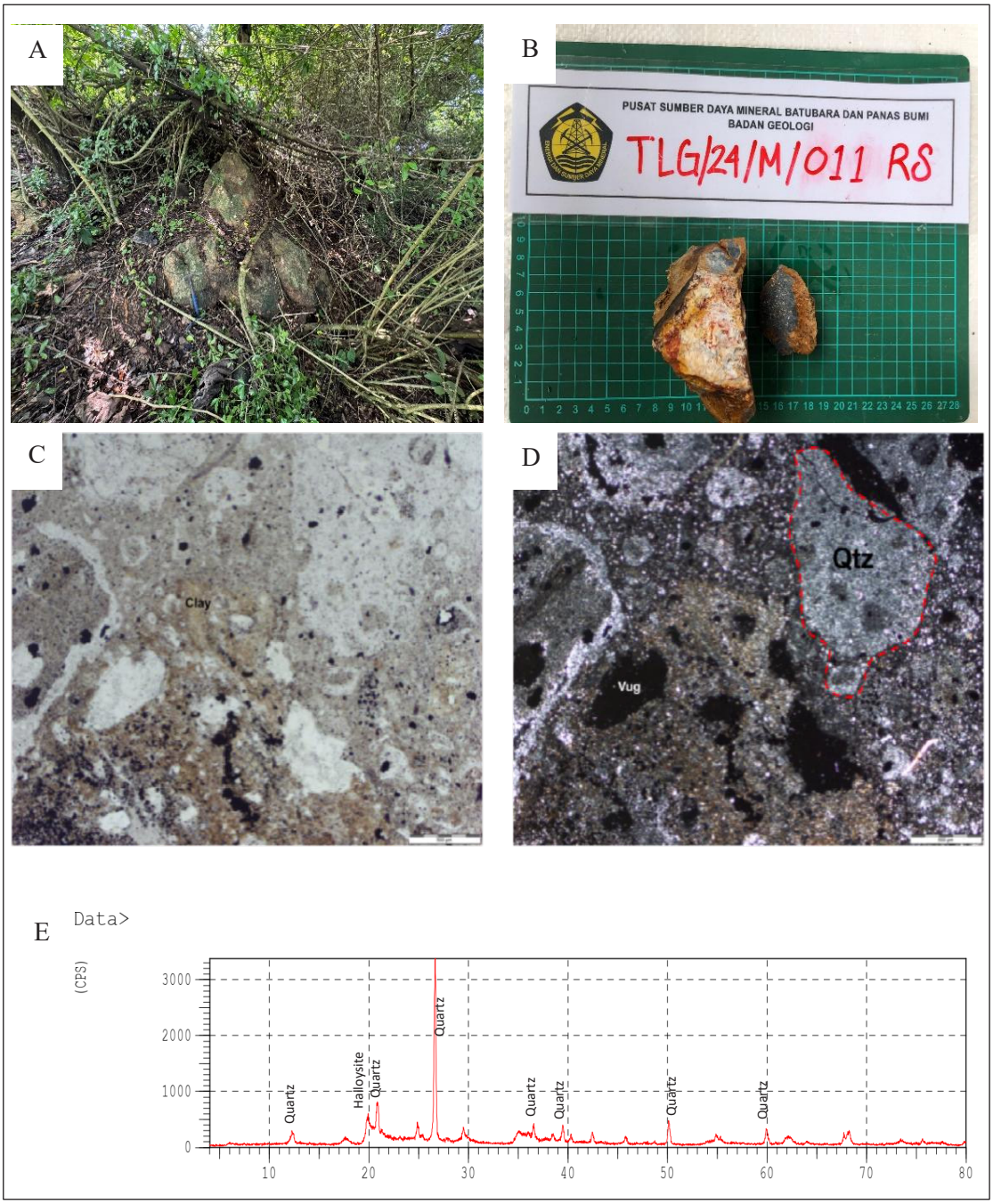
Gambar 8. Peta zona alterasi dan mineralisasi daerah penelitian

Alterasi dan Mineralisasi

Alterasi di daerah penelitian umumnya berkembang dengan baik pada satuan lava andesit. Alterasi hidrotermal ini terdiri dari inti silisifikasi yang menyebar ke arah luar menjadi alterasi argilik lanjut, argilik, dan propilitik (Gambar 8, Tabel 3). Alterasi silisifikasi dan argilik lanjut berkembang baik pada satuan lava andesit, sedangkan alterasi argilik dan propilitik berkembang di satuan lava andesit serta breksi vulkanik. Satuan batugamping di daerah penelitian tidak mengalami alterasi.

Zona silisifikasi terletak di selatan daerah penelitian dan dicirikan oleh dominasi mineral kuarsa yang mengubah batuan. Tekstur batuan pada zona ini dicirikan oleh kuarsa *vuggy* (Gambar 9B) yang terbentuk ketika proses silisifikasi diikuti oleh pelindian akibat reaksi antara fluida

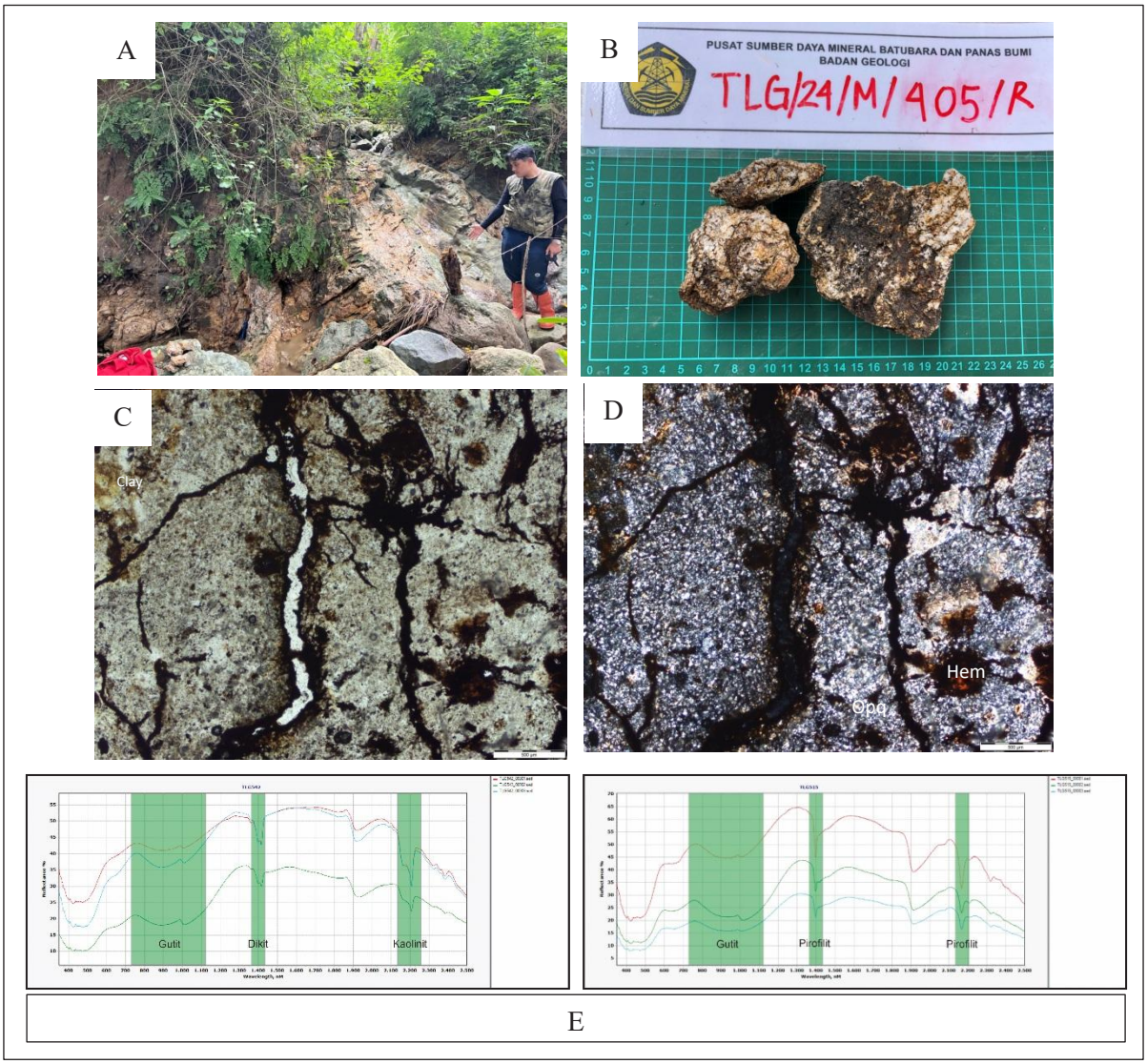
magma yang asam dengan batuan samping (Hedenquist dkk., 1994; dalam Arribas, 1995). Alterasi silisifikasi di daerah penelitian menunjukkan tekstur *vuggy* dan masif, dengan tingkat oksidasi yang kuat. Analisis XRD menunjukkan kehadiran kuarsa dan halloysit (Gambar 9E).



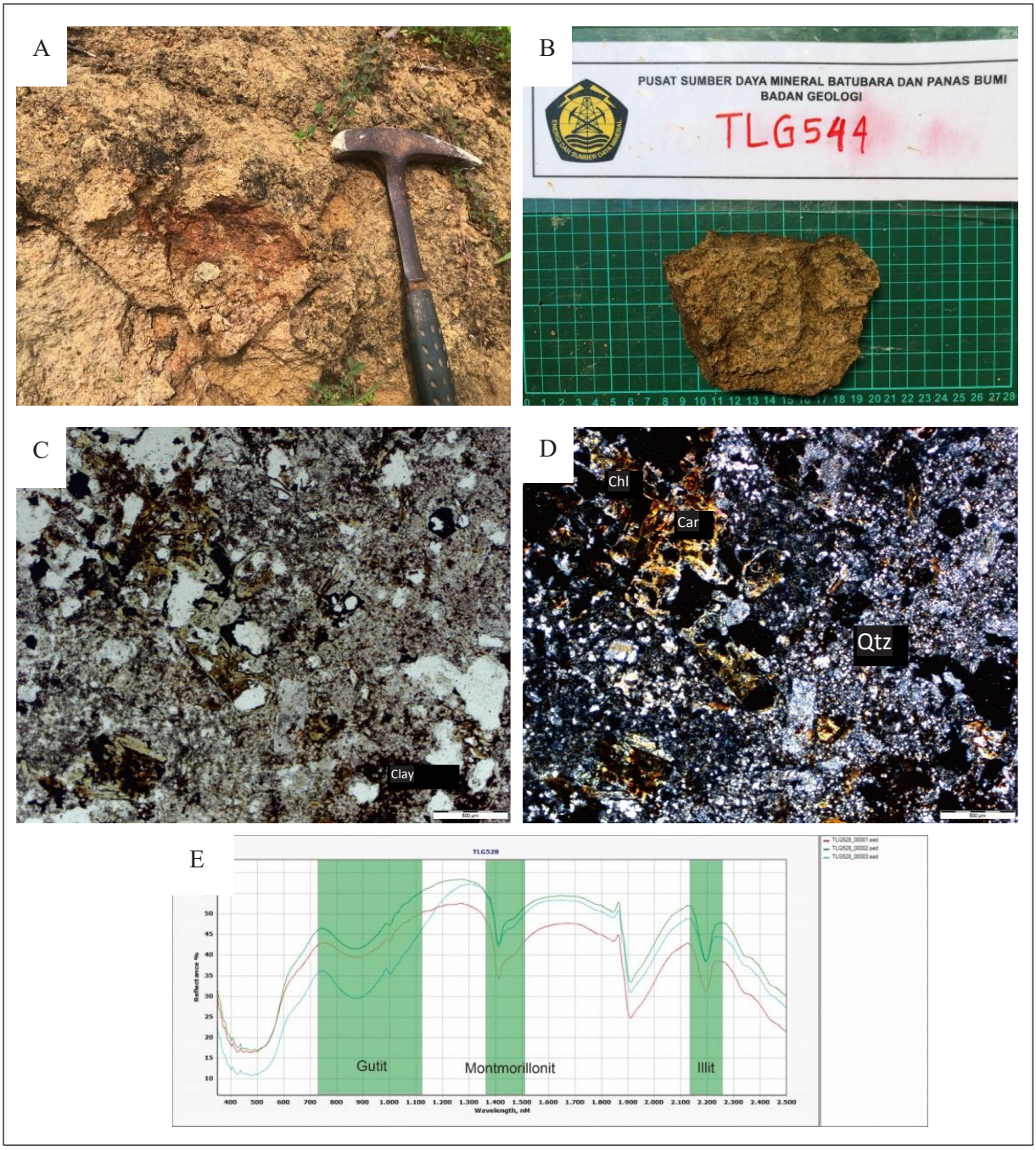
Gambar 9. Kenampakan alterasi silisifikasi di daerah penelitian nomor sampel TLG011: (A) Singkapan silisifikasi di lapangan berbentuk subcrop. (B) *Hand specimen* silisifikasi no sampel TLG011. Fotomikrograf no sampel TLG011 (C) Nikol sejajar (D) Nikol silang (E) Hasil analisis XRD no sampel TLG 002R menunjukkan kehadiran kuarsa dan halloysit (Keterangan: Vug: *vuggy*, Qtz: kuarsa, Garis putus merah: fragmen batuan yang tergantikan oleh kuarsa, Clay: mineral lempung)

Alterasi argilik lanjut dicirikan oleh hadirnya mineral lempung berwarna putih keabuan, dengan rona kuning jingga hingga kemerahan (Gambar 10A). Tekstur batuan utama sulit diamati karena proses alterasi yang sangat intesif menggantikan keseluruhan mineral primer. Hasil analisis ASD menunjukkan adanya mineral penciri pH rendah (asam), seperti kaolinit, pirofilit, dan dikit (Gambar 10E). Selain itu, terdapat juga mineral lempung lainnya seperti illit.

Alterasi argilik dicirikan oleh hadirnya mineral lempung berwarna abu-abu terang dengan sedikit kuning jingga-kuning kehijauan (Gambar 11A). Fotomikrograf pada alterasi ini menunjukkan tekstur penggantian mineral primer, ditandai oleh plagioklas yang mengalami proses *pseudomorf* dan digantikan oleh mineral lempung (Gambar 11C). Hasil analisis ASD dan XRD menunjukkan keterdapatan mineral lempung, seperti montmorilonit, illit, dan smektit (Gambar 11E).

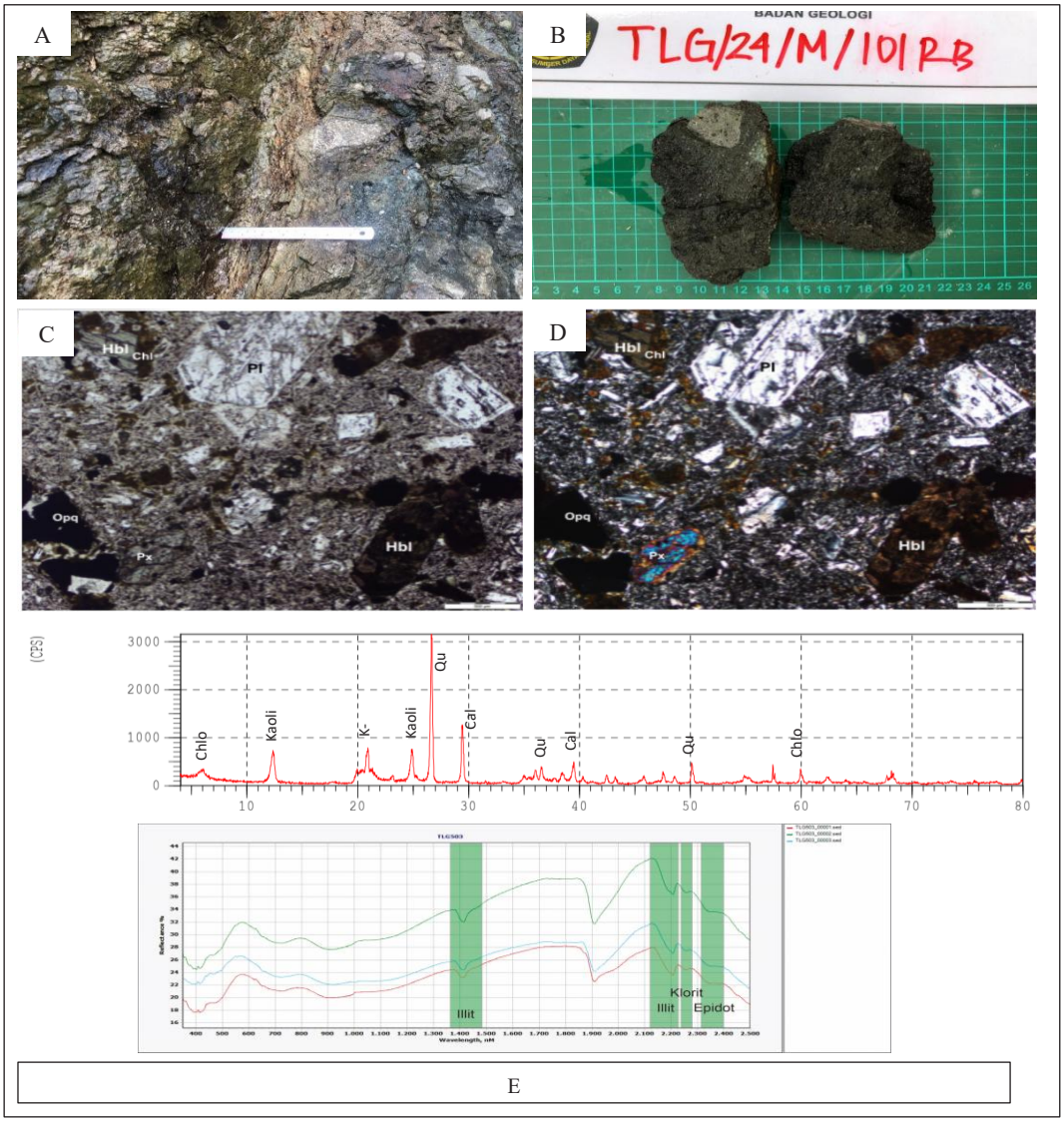


Gambar 10. Kenampakan alterasi argilik lanjut di daerah penelitian nomor sampel TLG405 (A) Singkapan argilik di lapangan berbentuk subcrop. (B) *Hand specimen* kuarsa *vuggy* no sampel TLG405. Fotomikrograf no sampel TLG405 (C) Nikol sejajar (D) Nikol silang (E) Hasil analisis ASD no sampel TLG 542 dan 515 menunjukkan kehadiran dikit, kaolinit, dan pirofilit (Keterangan: Qtz: kuarsa, Hem: hematit, Opq: mineral opak)



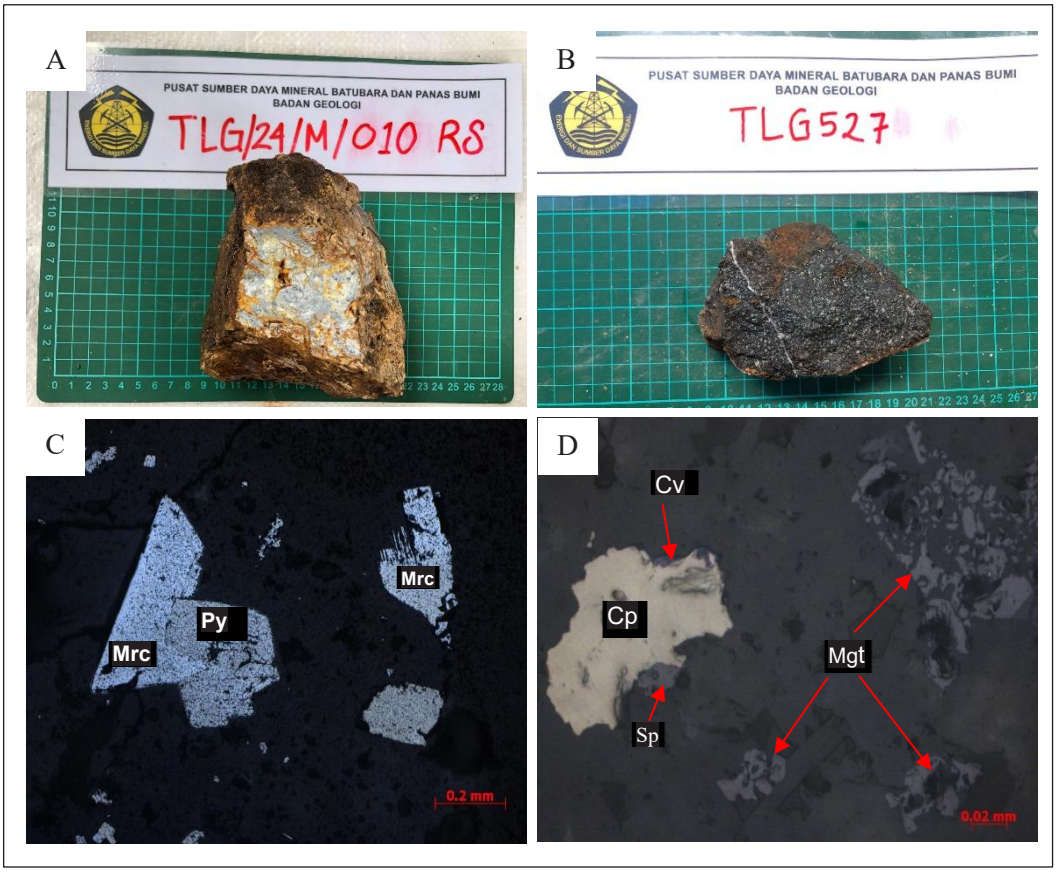
Gambar 11. Kenampakan alterasi argilik di daerah penelitian TLG544 (A) Singkapan argilik di lapangan berbentuk subcrop. (B) *Hand specimen* argilik teroksidasi dan dominan lempung. Fotomikrograf no sampel TLG 544 (C) Nikol sejajar (D) Nikol silang (E). Hasil analisis ASD no sampel TLG 528 menunjukkan kehadiran illit, smektit, kuarsa, montmorilonit (Keterangan: Qtz: kuarsa, Chl: klorit, Car: karbonat, Clay: mineral lempung)

Alterasi propilitik dicirikan oleh kehadiran mineral klorit dan karbonat berwarna abu-abu kehijauan (Gambar 12A) Fotomikrograf pada alterasi ini menunjukkan tekstur rongga, pengisian, dan penggantian mineral primer oleh mineral lempung, klorit, epidot, dan karbonat (Gambar 12D). Kuarsa sekunder juga membentuk tekstur pengisian yang mengisi rongga dalam batuan. Hasil analisis ASD dan XRD menunjukkan adanya mineral seperti klorit, epidot, karbonat, illit, dan smektit (Gambar 12E)



Gambar 12. Kenampakan alterasi propilitik di daerah penelitian no sampel TLG101 (A) Singkapan propilitik di lapangan berbentuk subcrop. (B) *Hand specimen* propilitik teralterasi sedang. Fotomikrograf no sampel TLG101 (C) Nikol sejajar (D) Nikol silang (E) Hasil analisis ASD no sampel TLG 503 dan XRD no sampel TLG 202R menunjukkan kehadiran illit, kalsit, klorit, epidot (Keterangan: Qtz: kuarsa, Chl: klorit, Opq: mineral opak, Pl: plagioklas, Hbl: hornblende)

Indikasi mineralisasi yang ditemukan di daerah penelitian terdapat dalam kuarsa *vuggy*, urat breksiasi, dan urat masif (Gambar 13A). Mineralisasi pada urat kuarsa *vuggy* yang diduga berhubungan dengan sesar orde 1 terdiri dari pirit dan markasit. Sementara itu, pada urat breksiasi yang diduga berhubungan dengan sesar orde 2 dijumpai pirit, rutil, magnetit, kovelit, sfalerit, dan kalkopirit. Hasil analisis mineragrafi menunjukkan mineralisasi pada sesar orde 1 (sesar utama) terdapat pirit dan markasit yang terbentuk secara *intergrowth*, mengindikasikan lingkungan dangkal dengan temperatur sekitar <200°C (Hedenquist, 2000) (Gambar 13C). Kemudian, mineralisasi tahap selanjutnya diakibatkan oleh sesar orde 2 yang memotong sesar utama, hal ini diperkirakan menyebabkan munculnya fluida kaya akan logam dasar sehingga terendapkan mineral seperti kovelit, sfalerit, dan kalkopirit (Gambar 13D).

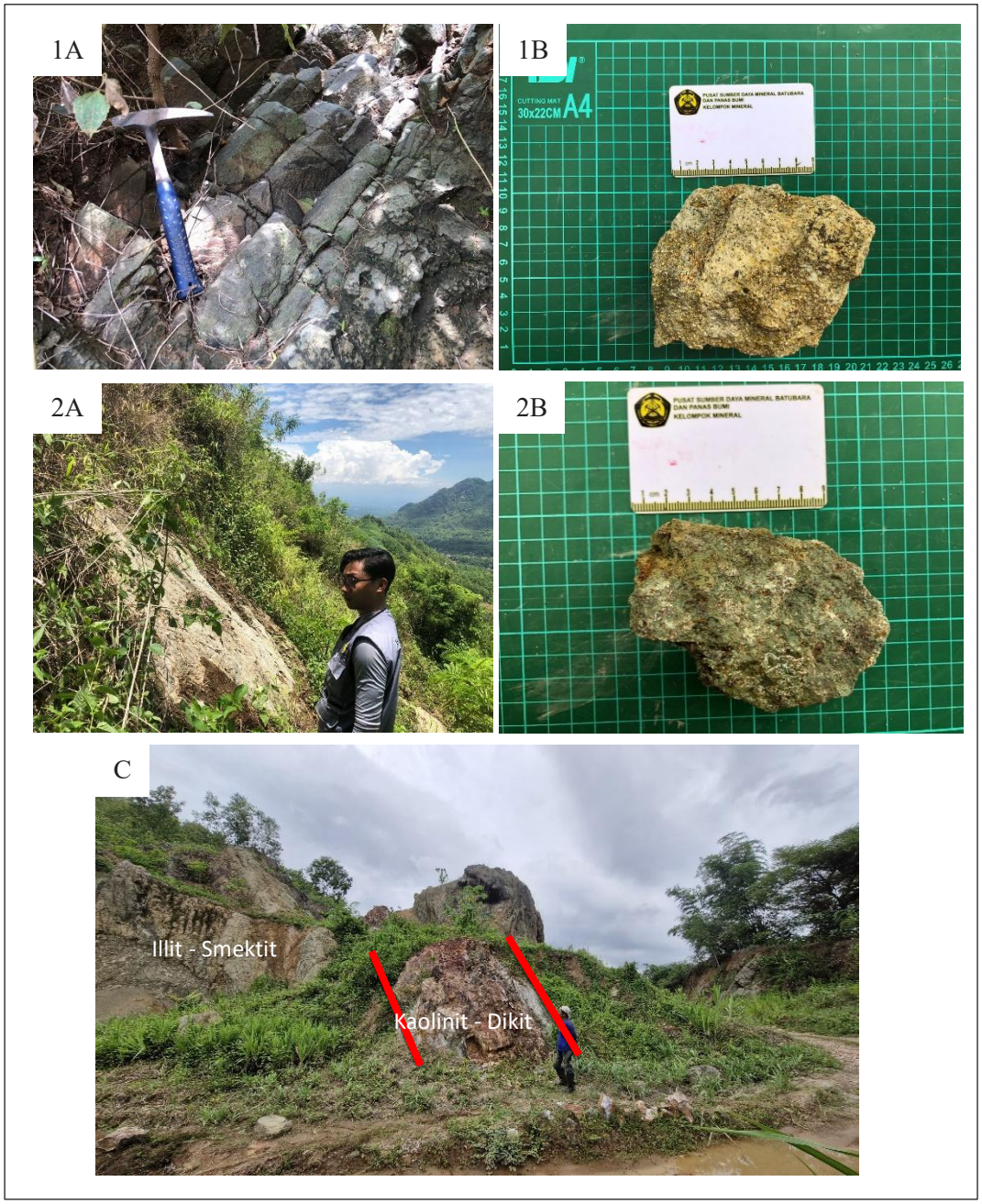


Gambar 13. Kenampakan mineralisasi di daerah penelitian: (A) *Hand specimen* kuarsa *vuggy* pada sesar orde 1. (B) *Hand specimen* batuan dengan urat halus kuarsa (?) pada sesar orde 2. (C) Fotomikrograf sayatan poles (TLG 010 RS) menunjukkan kehadiran mineral pirit dan markasit. (D) Fotomikrograf sayatan poles (TLG 527 RS) menunjukkan kehadiran mineral dengan logam dasar, seperti kalkopirit, kovelit, dan sfalerit (Keterangan: Py: pirit, Mrc: markasit, Sp: sfalerit, Cv: kovelit, Cp: kalkopirit, Mg: magnetit)

Tabel 2. Paragenesa Mineral Bijih Daerah Penelitian

Mineralisasi \ Tahapan		Sesar orde I	Sesar orde II	Oksidasi
Mineral Bijih	Markasit	▬		
	Pirit	▬	▬	
	Kalkopirit		▬	
	Magnetit		▬	
	Kovelit		▬	
	Sfalerit		▬	
	Gutit			▬
	Hematit			▬

Paragenesa mineral bijih yang berhubungan dengan sesar orde 1 maupun sesar orde 2 dapat digambarkan pada Tabel 2. Indikasi alterasi dan mineralisasi daerah penelitian dikontrol oleh struktur geologi. Hal ini terlihat pada lokasi pengamatan batuan berdekatan yang mengalami alterasi argilik dan argilik lanjut, singkapan batuannya lebih terkekarkan secara intensif (Gambar 14A) dibandingkan dengan batuan yang mengalami alterasi propilitik (Gambar 14B). Kandungan mineral alterasi pada zona sesar terdiri dari kaolinit-dikit sedangkan pada batuan samping berupa illit-smektit (Gambar 14C).



Gambar 14. Indikasi alterasi dan mineralisasi dikontrol oleh struktur geologi: (1A) Kenampakan singkapan andesit terkekarkan kuat dan (2A) *hand specimen* menunjukkan intensitas kekar lebih tinggi terdapat dominasi mineral lempung. (1B) Kenampakan singkapan andesit terkekarkan sedang dan *hand specimen* menunjukkan intensitas kekar lebih rendah terdapat mineral klorit dan karbonat. (C) Perbandingan kandungan mineral alterasi dari analisis ASD pada bidang bukaan dengan batuan samping.

PEMBAHASAN

Keterdapatan kuarsa *vuggy* dan mineral dengan pH rendah menandakan daerah penelitian terdapat di cebakan epitermal sulfidasi tinggi (Arribas, 1995). Model konseptual cebakan epitermal sulfidasi tinggi disebandingkan dengan model Arribas (1995), menunjukkan cebakan sulfidasi tinggi ditemukan alterasi dari pusat ke tepi, yaitu zona silisifikasi, zona argilik lanjut, zona argilik, dan zona propilitik (Gambar 8, Tabel 3). Selain itu, karakteristik utama tipe cebakan epitermal yang diuraikan oleh Silitoe (2003) menunjukkan kesesuaian dengan kondisi cebakan di daerah penelitian, yang tergolong dalam tipe epitermal dengan sulfidasi tinggi hingga menengah (Tabel 4). Berdasarkan temperatur pembentukan mineral alterasi dalam zona alterasi argilik lanjut (kuarsa+kaolinit+dikit±pirofilit ± pirit±markasit) terbentuk pada temperatur 180-275ºC dengan pH<4 (Morrison, 1997), alterasi argilik (illit+smektit± kuarsa±pirit) terbentuk pada temperatur 150-200ºC dengan pH 4-5 (Morrison, 1997), dan alterasi propilitik (klorit+karbonat+epidot±kuarsa±pirit±kalkopirit±sfalerit±kovelit) terbentuk pada temperatur 100-300ºC dengan pH netral (Morrison, 1997). Sementera itu, pembentukan kuarsa *vuggy* terbentuk pada temperatur <250ºC dengan pH<2. Hal ini disebabkan pelindian dengan intensitas tinggi oleh fluida hidrotermal asam (Corbett dan Leach, 1997).

Fluida hidrotermal asam di daerah penelitian dikontrol oleh struktur geologi. Keberadaan struktur geologi dapat membentuk porositas sekunder pada batuan yang memiliki porositas rendah. Porositas dan permeabilitas yang tinggi dapat menjadi jalan untuk fluida hidrotermal mengalterasi batuan sampingnya. Hal ini sejalan dengan Prospek Secang, dimana daerah penelitian mengalami alterasi yang intens pada litologi andesit. Andesit memiliki porositas rendah karena antar butir mineralnya saling mengunci batuan tersebut.

Tabel 3. Tabel karakteristik jenis alterasi daerah penelitian

Zona Alterasi	Himpunan Mineral	Temperatur	pH	Karakteristik Fluida	Referensi
Silisifikasi	Kuarsa ± Halloysit	<250^{0}C	<2	Asam, pelindian	Corbett & Leach, 1997
Argilik Lanjut	Kuarsa + Kaolinit + Dikit ± Pirofilit ± Pirit ± Markasit	180-275ºC	<4	Asam, pelindian, oksidasi	Morrison, 1997
Argilik	Illit + Smektit ± Kuarsa ± Pirit	150-200ºC	4-5	Cenderung asam	Morrison, 1997
Propilitik	Klorit + Karbonat + Epidot ± Kuarsa ± Pirit ± Kalkopirit ± Sfalerit ± Kovelit	100-300ºC	~7	Netral	Morrison, 1997

Tabel 4. Tabel perbandingan karakteristik utama tipe endapan epitermal menurut Silitoe dan Hedenquist (2003), dengan daerah penelitian

Tipe endapan	Epitermal sulfidasi tinggi		Epitermal sulfidasi menengah	Epitermal sulfidasi rendah		Daerah penelitian
	Magma oksidasi	Magma reduksi		Magma subalkalin	Magma alkalin	
Genetik batuan vulkanik	Andesit-ryodasit	Andesit	Ryolit	Basalt-ryolit	Basalt alkali-trakit	Andesit
Mineral alterasi kunci proksimal	Kuarsa-alunit/APS, kuarsa-dikit/pirofilit di kedalaman	Kuarsa-alunit/APS, kuarsa-dikit di kedalaman	Serisit, terkadang adularia	Illit/smektit-adularia	Roscoellite-illit-adularia	Dikit, pirofilit, kaolinit
Mineral *gangue* silika	Silisifikasi masif berbutir halus dan kuarsa residual vuggy		Urat kuarsa *crustiform* dan *comb*	Urat kuarsa dan kalsedon *crustiform* dan *colloform* , tekstur *replacement* oleh karbonat	Urat kuarsa dan kalsedon *crustiform* dan *colloform* , tahap awal minim kuarsa	Urat kuarsa masif dan kuarsa *vuggy*
Mineral *gangue* karbonat	Tidak ada		Umum, terutama mengandung mangan	Hadir, tetapi minor dan tahap akhir	Melimpah, tidak mengandung mangan	Ditemukan di alterasi propilitik
Mineral *gangue* lainnya	Barit pada tahap akhir		Barit dan silikat mengandung mangan hadir setempat	Barit jarang ditemukan, florit umum	Barit, selesit, dan florit umum	Tidak ada
Mineral sulfida kunci	Enargit, luzonit, famatinit, kovelit	Akantit, stibnit	Sfalerit, galena, tetrahedrit, tenantit, kalkopirit	Kehadiran jarang hingga sangat jarang mineral arsenopirit dan pirhotit; kehadiran jarang galena, sfalerit, tenantit-tetrahedrit,		Pirit, kalkopirit, sfalerit, kovelit, magnetit, markasit

Fluida tersebut diperkirakan hadir bersama sesar utama berarah timur laut-barat daya. Sementara itu, sesar orde kedua yang memotong dengan arah barat laut-tenggara menyebabkan peningkatan logam dasar di daerah penelitian ditandai oleh kehadiran mineral sulfida Cu-Zn seperti kalkopirit, sfalerit, dan kovelit. Hasil mineragrafi dari sampel kuarsa *vuggy* menunjukkan indikasi pembentukan pada temperatur yang lebih rendah dan terbentuk pada kondisi asam dicirikan dengan kehadiran markasit yang terbentuk di lingkungan dengan pH<5 (Hedenquist, 2000). Penurunan temperatur dan peningkatan pH di daerah penelitian disebabkan oleh pencampuran fluida hidrotermal dengan batuan samping dan air meteorik. Hal ini menyebabkan terbentuknya *overprint* alterasi di daerah penelitian.

Pembentukan alterasi daerah penelitian dikontrol oleh struktur geologi berupa sesar. Pada bidang sesar di daerah penelitian disusun oleh himpunan mineral dari alterasi argilik lanjut, sementara batuan samping pada bidang sesar didominasi oleh himpunan mineral alterasi argilik (Gambar 14C). Selain itu, hasil dari perpotongan sesar di daerah penelitian menyebabkan terbentuknya zona hancuran, yaitu zona di sekitar inti sesar yang meningkatkan permeabilitas daru batuan andesit (Caine *et al*, 1996). Bagian selatan daerah penelitian merupakan titik pertemuan antara Sesar Sungai Kalirampal, Sesar Pojok, Sesar Tumpak Ban, serta indikasi sesar berarah barat laut–tenggara. Pertemuan sesar-sesar ini dapat menghasilkan adanya zona hancuran di antara sesar tersebut. Zona hancuran dapat membentuk bidang lemah di sekitar pertemuan sesar sehingga meningkatkan potensi keluar fluida hidrotermal melalui rekahan.

Menurut Maryono (2018), melalui data persebaran alterasi, mineralisasi, dan geologi struktur, menunjukkan bahwa arah mineralisasi utama di segmen timur busur magmatik Sunda dikontrol oleh struktur berarah timur laut–barat daya. Arah ini konsisten pada cebakan porfiri raksasa seperti di Tumpangpitu, Elang, dan Hu'u. Perbedaan arah atau asosiasi mineralisasi yang tidak mengikuti pola ini dapat diinterpretasikan sebagai pengaruh sesar lokal. Hal ini sejalan dengan keterbentukan mineral bijih kaya emas terakumulasi di sesar orde 1 berarah timur laut-barat daya sebagai jalur utama fluida hidrotermal. Sedangkan, zona yang memiliki kelimpahan mineral logam dasar terbentuk di sesar orde 2 berarah barat laut-tenggara yang bersifat sebagai sesar lokal di daerah penelitian (Tabel 2). Berdasarkan model Arribas (1995), mineral bijih banyak terakumulasi pada zona kuarsa + dikit dan kuarsa + pirofilit. Keterdapatan tekstur *vuggy* kuarsa di daerah penelitian dapat menandakan batuan yang dekat dengan tubuh bijih. Namun, sebagian besar dari tekstur *vuggy* kuarsa ditemukan dalam bentuk *float* dan diperkirakan sumber utamanya sudah tererosi, kecuali di bagian selatan daerah penelitian di pertemuan antar sesar dimana tekstur *vuggy* kuarsa ditemukan dalam bentuk singkapan dan memiliki dimensi alterasi yang cukup luas.

Menurut model cebakan epitermal sulfidasi tinggi Arribas (1995), Maryono (2018), dan Silitoe (2000), alterasi dan mineralisasi cebakan ini selalu berhubungan dengan intrusi yang merupakan sumber fluida hidrotermal. Namun, zona alterasi argilik lanjut dengan kehadiran pirofilit di daerah penelitian hanya ditemukan di sebagian tempat. Hal ini belum dapat menyimpulkan bahwa daerah penelitian dekat dengan *feeder zone* dan dekat dengan tubuh intrusi. Oleh karena itu, perlu dilakukan eksplorasi lanjutan untuk mengetahui potensi mineralisasi yang meliputi survey geomagnet dan analisis geokimia di bagian selatan daerah penelitian untuk mendapat gambaran tubuh batuan di bawah permukaan.

KESIMPULAN

Alterasi di Prospek Secang dikontrol oleh keberadaan struktur geologi berupa sesar berarah timur laut-barat daya dan barat laut-tenggara. Fluida hidrotermal asam

diperkirakan hadir bersama sesar utama dan bersifat regional (orde 1) berarah timur laut-barat daya ditandai oleh kehadiran mineral markasit yang hadir secara *intergrowth* bersama dengan pirit (Hedenquist, 2000). Sementara itu, sesar orde 2 dan bersifat lokal yang memotong dengan arah barat laut-tenggara menyebabkan peningkatan mineralisasi logam dasar di daerah penelitian yang ditandai oleh kehadiran mineral sulfida Cu-Zn seperti kalkopirit, sfalerit, dan kovelit. Keberadaan tekstur kuarsa *vuggy* yang luas di selatan daerah penelitian menjadikan potensi untuk dilaksanakannya eksplorasi lanjutan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada seluruh pihak yang turut serta memberi waktu, ilmu, dan pikiran dalam setiap proses penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panasbumi (PDSMBP), atas izin penggunaan data dan persetujuan yang diberikan untuk penulisan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah, C.I., *et al*. (2003). Analisis Dinamik Tegasan Purba pada satuan batuan Paleogen-Neogen di daerah Pacitan dan sekitarnya, Provinsi Jawa Timur ditinjau dari studi sesar minor dan kekar tektonik. Prosiding. Fakultas Sains dan Teknologi, ITB.

Arribas, A., (1995). Characteristics of High-Sulphidation Epithermal Deposits and Their Relation to Magmatic Fluid. Mineralogical Association of Canada Short Course : vol 23.

Bateman, A.M., Jensen, M.L., 1981. Economic Mineral Deposit, 3rd. New York. John Wiley & Sons.

Caine, Jonathan Saul, *et al*. "Fault Zone Architecture and Permeability Structure." *Geology*, vol. 24, no. 11, 1996, p. 1025, https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024%3C1025:fzaaps%3E2.3.co;2.

Corbett, G., Leach, T., (1997). Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration and Mineralization.

Hedenquist, J. W., Arribas, A. (2000). Exploration for Epithermal Gold Deposits. SEG Reviews Vol. 13, 2000, p. 245-277

Hedenquist, J. W., & Lowenstern, J. B. (1994). The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. Nature, 370(6490), 519–527. https://doi.org/10.1038/370519a0

Huang, L., Chi-yang Liu. "Three Types of Flower Structures in a Divergent-Wrench Fault Zone." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 122, no. 12, Dec. 2017, pp. 10, 478–10, 497, https://doi.org/10.1002/2017jb014675.

Morrison, K., (1997). Important Hydrothermal Minerals and Their Significance, Sixth Edition, Geothermal and Mineral Services Divison, Kingston Morrison Limited.

Maryono, A., Harrison, R. L., Cooke, D. R., Rompo, I., & Hoschke, T. G. (2018). Tectonics and Geology of Porphyry Cu-Au Deposits along the Eastern Sunda Magmatic Arc, Indonesia. Economic Geology, 113(1), 7–38. https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4542

Praptisih Praptisih & Kamtono Kamtono. (2011). Turbidite Facies of the Halang Formation in Ajibarang Area, Central Java. Indonesian Journal on Geoscience, 6(1), 13–27. https://doi.org/10.17014/ijog.6.1.13-27

Pratomo, S. U., Titisari, A.D., Idrus, A. (2020) Hydrothermal Alteration of High Sulfidation Epithermal Deposits in Secang Area, Tulungagung, East Java, Indonesia. Journal of Applied Geology, vol. 5(2), 2020, pp. 73–83. http://dx.doi.org/10.22146/jag.55235

Samodra, H., Suharsono, Gafoer, S., Suwarti, T., (1992). Peta Geologi Lembar Tulungagung Skala 1:100.000. Bandung; Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi

Sillitoe, R. H. (2000). Styles of high-sulphidation gold, silver and copper mineralisation in porphyry and epithermal environments. 305(1), 19–34.

Sillitoe, R.H., and Hedenquist, J.W., 2003, *Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits*, in Simmons, S.F., and Graham, I.J., eds., Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: Rulers and witnesses of processes within the Earth: Society of Economic Geologists Special Publication 10, p. 315–343.

Thompson, A.J.B., and Thompson, J.F.H., 1996, Atlas of Alteration: A field and petrographic guide to hydrothermal alteration minerals: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, 119 p.

U.S. Geological Survey. (2025). *Mineral commodity summaries 2025* (Version 1.2). https://doi.org/10.3133/mcs2025