



Eksplorasi Endapan Hidrotermal di Daerah Kasihan, Pacitan, Jawa Timur

Hydrothermal Deposit Exploration in Kasihan Area, Pacitan, East Java

Asrafil*, Arifudin Idrus**, dan Djoko Wintolo**

* Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik Universitas Tadulako

Kampus Bumi Tadulako Tondo, Jl. Soekarno Hatta Km.09, Palu Sulawesi Tengah, Indonesia

** Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika 2, Yogyakarta - 55281, Indonesia

Naskah diterima : 28 April 2017, Revisi terakhir : 8 November 2017, Disetujui : 10 November 2017, Online : 12 November 2017

Abstrak - Daerah penelitian merupakan salah satu daerah yang memiliki potensi mineralisasi hidrotermal berupa batuan ubahan maupun urat-urat kuarsa di Kabupaten Pacitan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi keberadaan endapan hidrotermal menggunakan metode geomagnet di daerah penelitian. Metode geomagnet digunakan untuk memperoleh anomali berupa kontras intensitas medan magnet. Selain itu, dilakukan pula pengambilan dan analisis terhadap sampel batuan dengan menggunakan petrografi, mikroskopis bijih, dan XRD. Hal ini dilakukan untuk memperoleh karakteristik mineralogi endapan mineral hidrotermal yang jadi target eksplorasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa endapan mineral hidrotermal di daerah penelitian dicirikan oleh alterasi hidrotermal berupa argilik (kaolin-illit), propilitik (kalsit-klorit) dan skarn (kuarsa-kalsit-piroksin/klinopiroksin). Mineral-mineral bijih yang hadir berupa mineral sulfida seperti pirit, kalkopirit, sfalerit, dan kovelit serta mineral oksida berupa hematit yang melimpah. Keberadaan endapan mineral hidrotermal terkait dengan tipe endapan skarn. Zona endapan mineral bijih logam dicirikan oleh kontras anomali magnetik yang signifikan dengan intensitas medan magnet yang tinggi bernilai >110,31 nT pada anomali medan magnet total dan bernilai >11,09 nT pada anomali medan magnet lokal, sebagai respon dari adanya pengkayaan mineral bijih logam pada material batuan.

Kata Kunci : mineral hidrotermal, anomali medan magnet, petrografi, mikroskopis bijih, XRD, skarn, Kasihan

Abstract - This research aims to identify hydrothermal mineral deposits using geomagnetic methods. The geomagnetic method used to obtain anomaly of magnetic field intensity contrast. Furthermore, there is also been conducted taking and analysis samples of rock using petrography, ore microscopic and XRD. It is done to obtain mineralogical characteristics of hydrothermal mineral deposits that becoming the exploration target. The results showed that hydrothermal mineral deposits in research daerah was characterized by hydrothermal alteration of argillic (kaoline-illite), propylitic (calcite-chlorite) and skarn (quartz-calcite-pyroxene/clinopyroxene). Ore minerals are present of sulphide minerals such as pyrite, chalcopyrite, sphalerite, covellit and oxide minerals such as hematite abundance. The existence of hydrothermal mineral deposits are associated with skarn type deposit. Zones of mineral deposits of metallic ores are characterized by a significant contrast magnetic anomalies with high magnetic field intensity higher than 110,31 nT on the total magnetic intensity anomaly and higher than 11,09 nT on the residual magnetic intensity anomaly, as the response from the presence of metal in the ore mineral enrichment of rock material.

keywords : hydrothermal minerals, magnetic field anomaly, petrography, ore microscopic, XRD skarn, Kasihan

PENDAHULUAN

Latar belakang

Inventarisasi dan eksplorasi mineral logam yang dilakukan di Pegunungan Selatan Jawa Timur, diperlukan untuk menemukan daerah yang memiliki potensi indikasi (prospek) mineralisasi bijih. Dari hasil kegiatan inventarisasi dan eksplorasi mineral logam di daerah Pacitan oleh Badan Geologi, salah satu daerah prospek mineralisasi logam berupa singkapan mineral bijih sulfida (galena, kalkopirit, sfalerit dan pirit) berada di daerah Kasihan Kecamatan Tegalombo (Widodo, dr., 2002; Widodo dan Simanjuntak, 2002).

Daerah Kasihan memiliki prospek mineralisasi hidrotermal, sangat menarik untuk dilakukan penelitian dalam bentuk eksplorasi. Kegiatan eksplorasi yang pernah dilakukan terkait mineralisasi endapan hidrotermal di daerah ini masih dalam bentuk penyelidikan geologi, seperti yang dilakukan oleh Tun (2007) yang cukup banyak memberikan informasi mineralisasi yang ditandai dengan kehadiran urat kuarsa dan sejumlah bijih sulfida (pirit, kalkopirit, sfalerit dan galena) di permukaan yang terjadi di daerah Kasihan, oleh karena itu menjadi penting untuk mempelajari prospek endapan mineral logam hidrotermal di bawah permukaan melalui penelitian eksplorasi lanjutan dengan menerapkan teknik eskplorasi geofisika.

Dalam penerapan eksplorasi endapan mineral di lapangan, metode geofisika yang digunakan dalam eksplorasi geofisika adalah metode geomagnet. Metode geomagnet ini sangat baik digunakan untuk melokalisir daerah-daerah yang mengandung mineral-mineral bersifat magnetik seperti halnya mineral logam. Selain survei geofisika, dilakukan pula analisis karakterisasi terkait endapan mineral guna memahami model endapan dan mengungkap lebih jauh prospek mineralisasi di daerah tersebut.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik endapan mineral hidrotermal melalui analisis mineralogi bijih, mengidentifikasi kontras anomali magnetik dari penyebaran zona endapan mineral, dan mengkorelasikan hubungan anomali geomagnet dengan penyebaran zona endapan mineral.

Lokasi Daerah

Daerah penelitian secara administratif terletak di Dusun Jurang Gandul, Desa Kasihan, Kecamatan Tegalombo, Kabupaten Pacitan, Provinsi Jawa Timur. Secara

geografis, lokasi penelitian berada pada koordinat UTM 522916-530697 mE dan 9103185-9105011 mS dengan luas daerah $\pm 2,8 \text{ km}^2$. Lokasi penelitian dapat ditempuh dengan perjalanan darat dari Pacitan yang berjarak $\pm 30 \text{ km}$ dan berada di daerah pegunungan dengan ketinggian berkisar 500-900 mdpl (Gambar 1).

METODOLOGI

Metode penelitian secara umum dibagi dua yaitu penelitian lapangan dan laboratorium. Penelitian lapangan meliputi pemetaan geologi dan pemetaan zona anomali magnetik. Pengambilan data singkapan batuan dengan deskripsi dan pengambilan contoh terpilih, dengan fokus pada batuan pembawa mineralisasi. Contoh terpilih kemudian dianalisis secara petrografi, mikroskopis bijih, dan analisis XRD. Petrografi menggunakan mikroskop polarisasi, sebagai sayatan tipis (untuk mengidentifikasi struktur, tekstur dan komposisi mineral khususnya mineral non logam), analisis mikroskopis bijih menggunakan mikroskop polarisasi bijih untuk identifikasi mineral logam, dan Analisis XRD untuk analisis mineral lempung sebagai petunjuk alterasi.

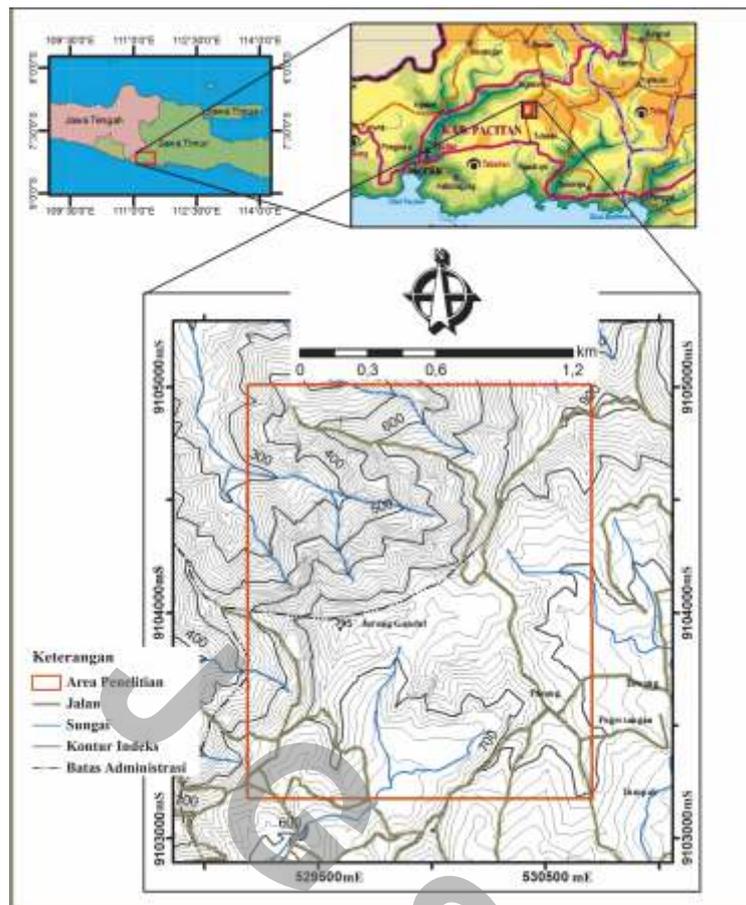
Dalam mengidentifikasi zona keberadaan mineral hidrotermal, pada penelitian ini dilakukan pula pengolahan data survei geomagnet untuk memperoleh sebaran data sumber anomali magnetik dari mineral logam. Pengidentifikasian sumber anomali magnetik dilakukan dengan penerapan teknik dekonvolusi Euler 3D (Reid, dr., 1990; Yaghoobian, dr., 1992). Bentuk dari dekonvolusi Euler (Thompson, 1982 dalam Reid, dr., 1990) untuk data magnetik dituliskan sebagai berikut:

$$(x - x_0) \frac{\delta T}{\delta x} + (y - y_0) \frac{\delta T}{\delta y} + (z - z_0) \frac{\delta T}{\delta z} = N (B-T)$$

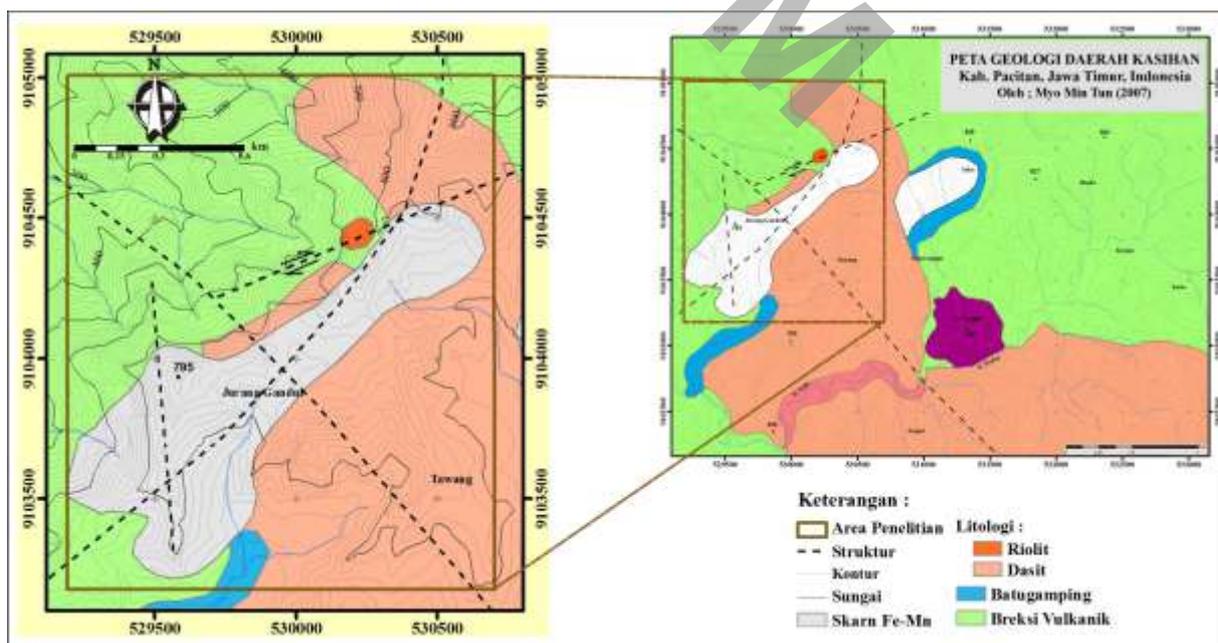
Dimana (x_0, y_0, z_0) adalah posisi sumber anomali magnetik dari anomali medan magnet total (T) yang terukur pada posisi (x, y, z) B adalah medan magnet regional, dan N didefinisikan sebagai indeks struktur benda anomali.

GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

Daerah penelitian merupakan bagian dari Lajur Pegunungan Selatan Jawa Timur (van Bemmelen, 1949). Menurut Samodra dr., (1992), tataan stratigrafi daerah penelitian tersusun atas endapan sungai, batuan sedimen, batuan gunung api, dan batuan terobosan. Sementara itu Tun (2007) menyatakan daerah Kasihan tersusun atas satuan litologi batuan dasit porfiri, breksi vulkanik, andesit, marmer, batugamping, dan riolit. Satuan litologi batuan di daerah penelitian yang ditunjukkan pada peta geologi daerah Kasihan (Gambar 2).



Gambar 1. Lokasi daerah penelitian



Sumber : Modifikasi Tun (2007)

Gambar 2. Geologi daerah penelitian

Satuan Batuan Dasit

Keberadaan satuan batuan dasit menempati $\pm 40\%$ pada daerah penelitian. Sebaran satuan ini berada di bagian utara, timur dan selatan pada daerah penelitian. Batuan ini telah mengalami alterasi hidrotermal dan pelapukan fisik. Alterasi yang terjadi cukup intensif dan menghancurkan mineral mafik aslinya. Secara umum, mineral pirit tersebar meluas dalam batuan baik yang segar maupun teralterasi (Tun, 2007).

Satuan Batuan Breksi Vulkanik

Keberadaan satuan batuan breksi vulkanik menempati $\pm 50\%$ dari daerah penelitian. Sebaran satuan ini berada di bagian utara, barat dan selatan pada daerah penelitian. Batuan ini umumnya material asal vulkanik, dengan fragmen lepas satu sama lain dengan ukuran sangat beragam. Satuan ini umumnya bentuknya resisten, bongkah, berwarna coklat kehijauan hingga coklat karat. Fragmen umumnya berukuran mencapai 10 sentimeter dan setempat berkisar hingga beberapa puluh sentimeter. Tufa vulkanik hadir di antara lapisan dalam breksi vulkanik.

Satuan Batuan Batugamping

Keberadaan satuan batuan batugamping terbatas, hanya menempati $\pm 5\%$ dari daerah penelitian. Sebaran satuan ini berada di bagian selatan daerah penelitian, sebagian besar singkapan di sepanjang sungai. Pada daerah Kasihan, batugamping mengalami kontak dengan satuan batuan dasit, sebagian batugamping ini mengalami metamorfosis menjadi marmer terfoliasi.

Satuan Batuan Riolit

Keberadaan satuan batuan riolit hanya menempati $\pm 5\%$ dari daerah penelitian. Sebaran satuan ini berada di bagian utara pada daerah penelitian. Di lapangan batuan ini nampak sebagai retas pada satuan batuan breksi vulkanik. Riolit menunjukkan kekar kolom, dengan efek pembakaran (*baking effect*) terlihat di sepanjang kontak intrusi dengan batuan induk (breksi vulkanik). Intrusi retas riolit terkait dengan rekahan lokal yang dikontrol oleh sesar (Tun, 2007).

Struktur

Pola struktur yang berkembang di daerah ini umumnya berarah baratdaya-timurlaut dan baratlaut-tenggara. Pola struktur tersebut menunjukkan bahwa gaya utama berarah relatif utara-selatan mengontrol struktur tersebut. Ini terkait dengan penunjaman lempeng Samudra Hindia-Australia terhadap lempeng benua Eurasia (Hamilton, 1979; Hall, 2008).

Tun (2007) menginterpretasikan struktur geologi di daerah Kasihan terdiri atas empat sesar utama dan kekar minor. Dua sesar utama merupakan sesar geser dan dua lainnya merupakan jenis sesar normal. Sesar geser pertama berarah baratdaya-timurlaut, yang menjadi jalan intrusi dari retas riolit. Sesar geser kedua berarah baratlaut-tenggara, memotong secara diagonal pada daerah penelitian. Sesar normal pertama cenderung berarah baratdaya-timurlaut dan tampak menjurus ke arah utara pada bagian utara, sepanjang kontak antara satuan batuan dasit dan satuan batuan breksi vulkanik. Adapun sesar normal lainnya terjadi pada bagian baratlaut daerah penelitian, cenderung berarah utara-selatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis

Hasil analisis kegiatan eksplorasi melalui penyelidikan lapangan dan analisis laboratorium diperoleh karakteristik mineralogi dan hasil survei geomagnet. Karakteristik mineralogi yang diperoleh meliputi alterasi hidrotermal, mineralisasi bijih, dan tipe endapan hidrotermal di daerah penelitian.

Alterasi Hidrotermal

Mineral alterasi hidrotermal di daerah penelitian yang diperoleh dari analisis XRD pada 5 sampel batuan menunjukkan kehadiran mineral silika, illit, klorit, kalsit, smektit, kaolin, sedikit anortit dan zeolit (Tabel 1).

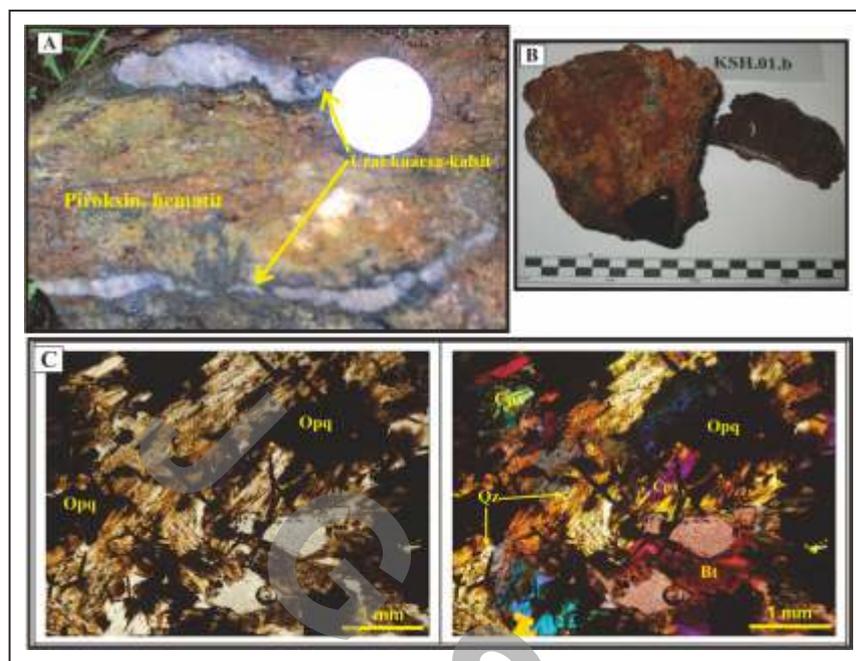
Secara umum, alterasi hidrotermal di daerah penelitian mencakup 3 jenis alterasi yakni alterasi propilitik, alterasi argilik dan alterasi skarn. Alterasi propilitik di daerah penelitian ditandai dengan kehadiran kumpulan mineral kalsit dan klorit. Hasil analisis XRD menunjukkan kehadiran mineral kuarsa, kaolin, smektit, anortit dan zeolit (KSH.05a dan KSH.05b). Mineral bijih logam berupa pirit dijumpai pada zona ini.

Alterasi argilik di daerah penelitian ditandai dengan kehadiran kumpulan mineral dengan pH menengah (4-5) dan temperatur rendah ($>200-250^{\circ}\text{C}$) berupa kaolin dan illit. Hasil analisis XRD menunjukkan adanya mineral kuarsa dan klorit (KSH.02 dan KSH.03a).

Alterasi skarn ditandai oleh hadirnya kumpulan mineral dengan temperatur ($300-700^{\circ}\text{C}$) dan pH yang tinggi berupa mineral kuarsa, kalsit dan piroksin (Gambar 3A). Pada pengamatan megaskopis sampel batuan pada zona alterasi ini, diperoleh batuan berwarna gelap coklat kehitaman dan mengandung mineral magnetik sehingga dapat menarik benda magnet (Gambar 3B). Pengamatan mikroskopis sayatan tipis menunjukkan kehadiran mineral dominan klinopiroksin sebagai

Tabel 1. Hasil Analisis XRD Sampel Batuan Terubah Hidrotermal di Daerah Penelitian

Sampel	Mineral Ubahan
KSH.01	kuarsa, illit, smektit, kalsit, klorit, piroksin, hematit, pirit
KSH.02	kuarsa, illit, klorit, kaolin, hematit
KSH.03a	kuarsa, illit, kaolin
KSH.05a	kuarsa, illit, kalsit, klorit, kaolin
KSH.05b	kuarsa, illit, smektit, kalsit, klorit, kaolin, anortit, zeolit, hematit



Gambar 3. Kenampakan zona alterasi skarn; A. Zonasi mineral skarn, B. Sampel bijih skarn besi, dan C. Sayatan petrografi sampel bijih skarn dengan komposisi berupa klinopiroksin, biotit, kuarsa dan mineral opak.

mineral sekunder berbentuk subhedral-anhedral, ukuran <2 mm dan mineral opak dengan ukuran bervariasi halus-sedang, serta mineral primer berupa kuarsa dan biotit berukuran <1 mm (Gambar 3C). Identifikasi mineral dengan analisis XRD pada sampel batumannya menunjukkan kehadiran mineral bijih besi berupa mineral hematit dan pirit (KSH.01).

Mineral Bijih

Hasil analisis mikroskopis bijih pada 3 sampel yang dianalisis dari daerah penelitian diperoleh berupa mineral logam sulfida dan mineral logam oksida. Mineral bijih logam tersebut meliputi pirit, kalkopirit, sfalerit, kovelit dan hematit (Gambar 4).

Mineral bijih yang paling umum dijumpai adalah mineral pirit (Fe_2S), yang tersebar pada tubuh batuan induk baik yang masih segar maupun batuan induk yang teralterasi. Pengamatan mikroskopik pada sampel biji dari batuan terubah hidrotermal, menunjukkan bahwa pirit berasosiasi dengan mineral seperti kalkopirit, sfalerit, kovelit dan hematit. Mineral bijih sulfida kalkopirit (CuFeS_2) juga hadir pada

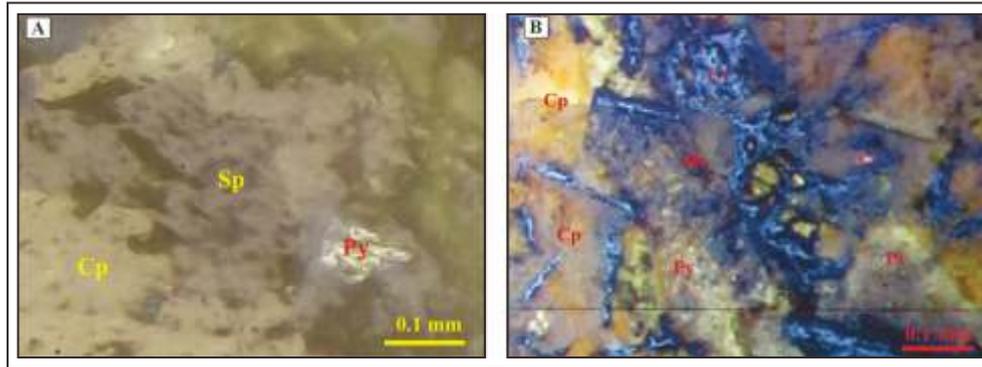
pengamatan batuan secara mikroskopis dari sampel batuan pada zona alterasi skarn. Kalkopirit dapat ditemukan berasosiasi dengan sfalerit yang kemungkinan terbentuk bersamaan.

Sfalerit (ZnS) merupakan mineral logam sulfida yang juga ditemui pada sampel batuan zona alterasi skarn. Sfalerit dan kalkopirit diduga terbentuk bersamaan pada fase pertengahan mineralisasi. Kovelit (CuS) intergrowths dengan mineral kalkopirit, kemungkinan terbentuk setelah pirit dan sfalerit.

Secara mikroskopis hematit (Fe_2O_3) dijumpai pada sampel batuan dalam zona alterasi skarn. Hematit terbentuk terakhir dari proses penggantian (*replacements*) yang mengalami pengayaan. Keberadaan mineral oksida besi berupa hematit ditemukan sangat melimpah pada batuan setempat yang berada pada zonasi skarn (Tun, 2007).

Tipe Endapan Hidrotermal

Himpunan mineral dan asosiasi mineral alterasi di daerah penelitian yang diperoleh secara umum berada pada batuan kontak antara intrusi batuan beku vulkanik



Gambar 4. Mineral bijih pada sayatan poles ; A. Sampel KSH.04 menunjukkan mineral bijih berupa kalkopirit dan sfalerit hadir berdampingan bersama pirit, dan B. Sampel KSH.01.b menunjukkan kehadiran mineral bijih berupa hematit dan kovelit mengalami pengayaan dan tumbuh diantara mineral pirit dan kalkopirit sebagai mineral pengganti. (Py: pirit, Cp: kalkopirit, Sp: sfalerit, Cv: kovelit, Ht: hematit)

(dasit) dengan batuan karbonat (batugamping) dari Formasi Arjosari yang mengindikasikan tipe endapan hidrotermal ke dalam tipe endapan skarn. Identifikasi dari endapan skarn didasarkan pada mineraloginya, yaitu jenis mineral kalk-silikat dan mineral-mineral asesorisnya, tapi biasanya di dominasi oleh garnet dan piroksin (Meinert, 1992).

Berdasarkan hasil analisis mineralisasi alterasi, dapat diketahui bahwa mineralisasi hidrotermal skarn terbentuk dalam tahap *prograde* dan *retrograde*. Mineral *prograde* terbentuk sebagai hasil tahap metamorfisme pada suhu 400-800°C (Evans, 1993) yang dicirikan oleh kehadiran piroksin/klinopiroksin yang teramati pada sayatan petrografi dari sampel skarn. Mineral *retrograde* terbentuk pada tahapan penurunan suhu yang dicirikan oleh keberadaan mineral klorit yang teramati dari hasil analisis XRD. Ketiadaan garnet mengindikasikan bahwa mineral terendapkan dalam lingkungan suhu rendah, hal ini dikuatkan oleh hasil pengukuran temperatur inklusi fluida pada urat kuarsa yang rata-rata berkisar 270-290°C (Warmada, drr., 2008).

Pengkayaan mineral bijih besi hadir dominan pada endapan skarn di daerah penelitian, sehingga endapan skarn dikelompokkan sebagai skarn besi. Mineral bijih logam yang utama pada endapan skarn besi ini adalah mineral oksida besi hematit. Hematit terkonsentrasi pada tubuh batuan pembawa mineral membentuk badan besar. Di lapangan dijumpai singkapan mineralisasi bijih besi pada dinding batuan, dimana sebagian terlapukkan nampak berwarna coklat kehitaman (Gambar 5).

Hasil Survei Geomagnet

Pengukuran geomagnet pada 9 lintasan dan 130 titik ukur dengan spasi antar titik ± 100 m memberikan data medan magnet yang bervariasi di tiap titik ukurnya. Perhitungan anomali medan magnet total (ΔT) diperoleh nilai intensitas medan magnet minimum sebesar -62,97 nT dan maksimum sebesar 177,04 nT. Nilai anomali medan magnet total yang diperoleh pada setiap titik ukur di lapangan selanjutnya divisualisasikan dalam bentuk peta anomali medan magnet total (Gambar 6.A). Banyaknya pasangan klosur positif dan klosur negatif



Gambar 5. Singkapan endapan bijih besi hidrotermal pada zona alterasi skarn di daerah penelitian (kamera menghadap ke arah Baratdaya)

menunjukkan bahwa anomali medan magnet total masih sangat dipengaruhi oleh medan magnet lokal.

Untuk memperoleh anomali medan magnet lokal ini, dilakukan filtering dengan memberlakukan proses kontinuitas ke atas pada data anomali medan magnet total untuk memisahkan pengaruh dari medan magnet regional yang bersifat dalam. Kontinuitas ke atas menghasilkan perubahan pola anomali yang signifikan hingga 300 meter. Hasil kontinuitas ini dijadikan sebagai acuan pola anomali medan magnet regional yang ditimbulkan oleh pengaruh regional material batuan di bawah permukaan (Gambar 6.B). Nilai intensitas medan magnet regional yang diperoleh dari kontinuitas ke atas bernilai positif dengan kisaran nilai 7,06 nT – 133,71 nT. Pengurangan antara anomali medan magnet regional terhadap anomali medan magnet total menghasilkan anomali medan magnet lokal atau residual (Gambar 6.C). Anomali medan magnet lokal yang diperoleh memiliki nilai intensitas medan magnet negatif sebesar -62,49 nT hingga positif sebesar 42,45 nT. Medan magnet lokal yang bersifat dangkal ini kemudian menjadi target analisis keberadaan endapan mineral logam.

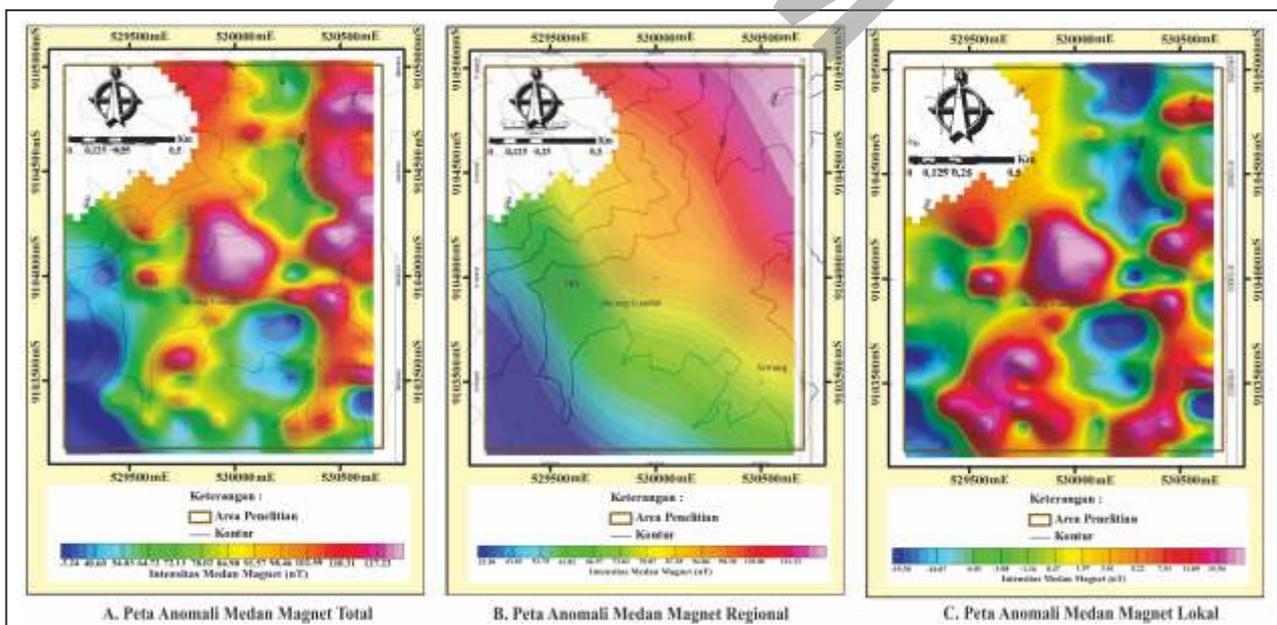
Guna memperoleh estimasi lokasi sumber anomali dilakukan pemodelan inversi melalui penerapan dekonvolusi Euler 3D terhadap data anomali magnetik lokal, dengan memberlakukan indeks struktur (Reid, dr., 1990) model sumber medan magnet. Indeks struktur dipilih dengan mempertimbangkan homogenitas sumber anomali yang timbul oleh adanya konsentrasi mineral magnetik mengandung logam dari

endapan hidrotermal sebagai target eksplorasi. Estimasi lokasi sumber anomali pada penelitian ini menggunakan indeks struktur model sumber medan magnet 3 (berupa bidang berbentuk bulatan (sphere) ataupun berbentuk sill tak beraturan) dan 0,5 (model geometri berupa kontak tebal dalam batuan).

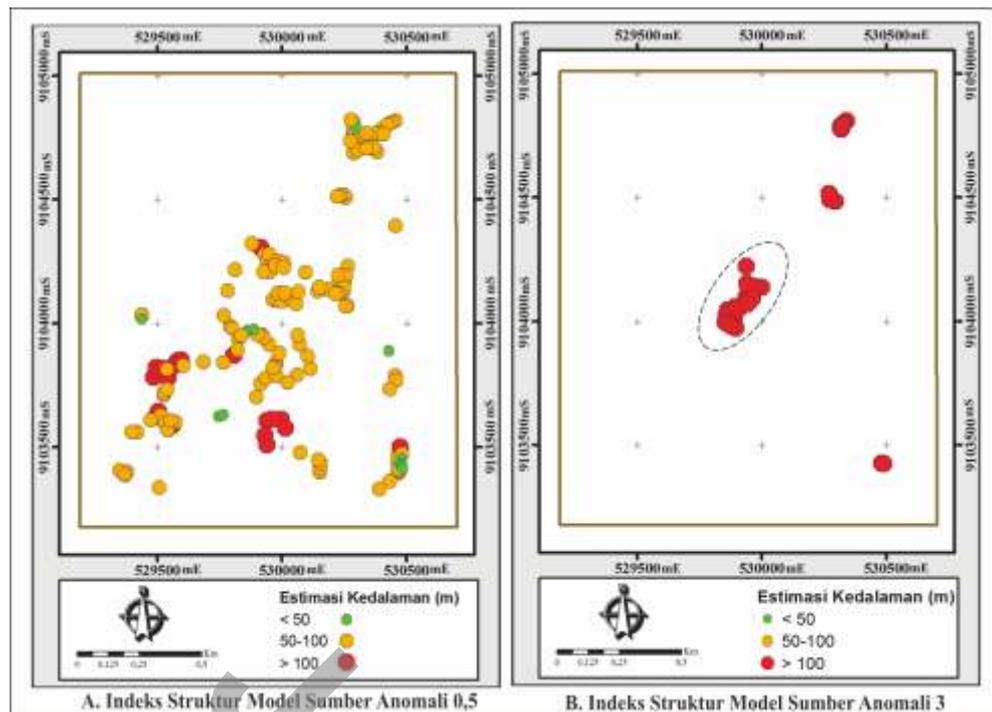
Pemodelan menghasilkan harga estimasi sumber anomali medan magnet berupa titik lokasi koordinat sumber anomali, kedalaman sumber anomali dan intensitas medan magnet sumber anomali (Reid, dr., 1990; Yaghobian, dr., 1992). Hasil estimasi sumber anomali dapat menjadi interpretasi bagi keberadaan zona mineralisasi tubuh bijih (Amigun, dr., 2012; Ndlovu, dr., 2015). Dari visualisasi sebaran keberadaan titik sumber anomali di daerah penelitian diperoleh informasi bahwa keberadaan sumber anomali dari dua indeks struktur yang diterapkan memiliki kedalaman yang bervariasi (Gambar 7). Dari sebaran titik sumber anomali pada beberapa tempat menunjukkan pengelompokan yang dapat dilokalisasi sebagai zona endapan mineral logam hidrotermal.

Estimasi sebaran titik sumber anomali magnetik dengan struktur indeks 3 seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 7.B, memiliki estimasi kedalaman yang cukup dalam berkisar dari 164 sampai 245 m. Daerah yang diberi tanda lingkaran memberikan nilai intensitas medan magnet sumber anomali yang tinggi (positif) di daerah penelitian.

Pola anomali ini berorientasi dengan keberadaan singkapan bijih besi di daerah tersebut, sehingga dapat ditafsirkan sebagai zona mineralisasi bijih besi dari endapan hidrotermal skarn. Estimasi kedalaman sumber



Gambar 6. Peta anomali medan magnet



Gambar 7. Plot hasil dekonvolusi Euler pada daerah penelitian.

anomali yang dalam dengan intensitas besar menunjukkan zona endapan mineral logam yang cukup besar.

Hasil plotting sebaran titik estimasi sumber anomali magnetik untuk indeks struktur 0,5 menunjukkan kedalaman berkisar 36 sampai 150 m (Gambar 7A), lebih dangkal dari hasil estimasi kedalaman sumber anomali untuk indeks struktur 3. Sebaran titik estimasi sumber anomali nampak sangat kompleks tersebar di daerah penelitian. Pada bagian tengah dari daerah penelitian (Gambar 7) terdapat kelompok-kelompok fokus sumber yang berdekatan, hal ini diduga muncul berkaitan dengan kontak dari alterasi mineral hidrotermal yang ada. Pola pengelompokan ini berkaitan dengan pola perubahan anomali yang signifikan pada anomali medan magnet lokal.

PEMBAHASAN

Investigasi geologi dan mineralisasi di daerah penelitian yang dilakukan Tun (2007), cukup memberikan informasi terkait zona mineralisasi endapan hidrotermal di daerah penelitian. Menarik untuk diketahui bahwa dalam investigasi mineral bijih pada zona mineralisasi di penelitian ini tidak ditemukan keberadaan unsur logam mangan (Mn) yang diindikasikan oleh kemunculan mineral johansenit, sebagaimana hasil investigasi Tun (2007). Hal ini dimungkinkan oleh adanya konsentrasi Fe-Mn yang tidak sama pada beberapa lokasi di daerah Kasihan

(Warmada, drr., 2008), dimana lokasi yang kaya akan Fe akan sangat rendah unsur Mn.

Kegiatan pengamatan geologi dan analisis sampel yang dilakukan pada penelitian ini merupakan bagian dari peninjauan serta penguatan informasi dari zona mineralisasi di daerah penelitian terkait informasi karakteristik endapan mineral hidrotermal. Karakteristik endapan mineral hidrotermal yang diperoleh merupakan aspek utama yang menjadi tinjauan korelasi terhadap hasil survei geofisika yang dilakukan dalam daerah penelitian.

Berdasarkan tinjauan survei geomagnet diperoleh bahwa perubahan besar kontras anomali magnetik dengan intensitas tinggi yang teramati pada proses reduksi anomali magnetik regional terhadap anomali magnetik total merupakan indikasi respon adanya konsentrasi mineral-mineral logam pada batuan pembawa mineral bijih di bawah permukaan. Karena lonjakan nilai anomali intensitas kemagnetan yang tinggi dimungkinkan oleh adanya pengayaan mineral logam pada suatu batuan. Hal ini terkait pluton dan skarn yang dapat membentuk anomali magnetik. Oksidasi terhadap pluton biasanya mengandung cukup mineral magnetik untuk membentuk intensitas kemagnetan yang tinggi, sedangkan berkurangnya kandungan magnetik pluton dapat membentuk magnetik rendah (Ishihara, 1977 dalam Meinert, 1992). Skarn bersifat magnetik disebabkan adanya konsentrasi besar mineral magnetiknya (Chapman drr., 1986 dalam Meinert 1992).

Anomali magnetik yang rendah dapat mengindikasikan terjadi pengurangan mineral-mineral logam yang terikat pada unsur mineral semula pada material batuan. Peristiwa ini dapat saja terjadi oleh adanya pelarutan mineral baik oleh larutan hidrotermal serta air yang bertindak sebagai katalisator maupun proses erosi yang terjadi. Dengan demikian, mineral-mineral dominan yang tertinggal pada material batuan mempunyai sifat kemagnetan yang kurang menarik, yang cenderung kecil, hingga bernilai negatif, seperti halnya kuarsa.

Anomali magnetik yang tinggi dapat mengindikasikan mineral-mineral logam pada batuan asal yang belum terbebas, sehingga intensitas medan magnetnya tinggi sebagai respon terhadap adanya induksi medan magnet. Faktor lainnya adalah proses alterasi hidrotermal yang terjadi, dimana mineral-mineral logam yang ikut menyertainya terakumulasi dan terendapkan pada suatu bagian pada material batuan. Proses alterasi yang terus berlanjut, akan mengendapkan mineral logam, dimana terjadi pengkayaan unsur mineral logam, sehingga endapan tersebut menjadi bijih logam. Pada keadaan demikian, maka intensitas medan magnetnya akan menjadi semakin besar.

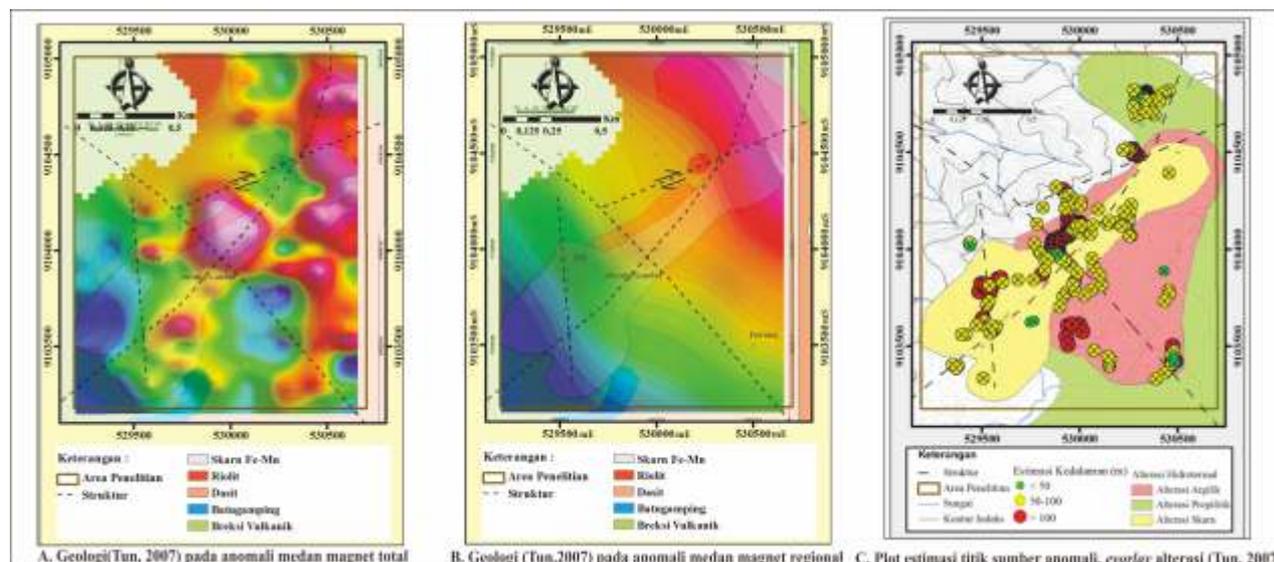
Korelasi aspek geologi terhadap kontras anomali menunjukkan struktur hasil interpretasi Tun (2007) ditampilkan di atas peta anomali medan magnet total daerah penelitian (Gambar 8A). Struktur hasil interpretasi peneliti sebelumnya letaknya nampak tegas mengikuti pola pasangan klosur anomali bernilai rendah dan tinggi. Struktur sesar geser yang dominan dilingkupi oleh pasangan klosur dari anomali magnetik dengan intensitas bernilai positif. Adapun struktur sesar yang diinterpretasikan merupakan sesar normal,

pasangan klosur anomalnya nampak lebih kontras bernilai negatif dan positif.

Berdasarkan hasil filtering kontinuasi pada data anomali magnetik total yang menghasilkan anomali magnetik regional, juga menunjukkan karakter dari batuan dasar (*bedrock*). Dapat dilihat pada Gambar 8B, bahwa pada daerah penelitian semakin ke arah utara-timurlaut nilai respon medan magnet regional makin tinggi, hal ini berkorelasi dengan satuan batuan beku berupa dasit dan riolit, juga kehadiran batuan breksi vulkanik. Respon medan magnet regional semakin rendah ke arah selatan-baratdaya, nampak berkorelasi dengan kehadiran satuan batuan sedimen berupa batugamping.

Hasil estimasi sumber anomali yang diperoleh dengan pemodelan dekonvolusi Euler diplot dalam peta menunjukkan korelasi positif terhadap pola arah mineralisasi endapan skarn pada hasil investigasi geologi dan mineralisasi Tun (2007). Distribusi sumber anomali masih dominan berada di sekitar daerah konsentrasi mineral dari skarn besi yang diinterpretasi sebelumnya ditunjukkan oleh lingkaran pada (Gambar 8C). Beberapa fokus kelompok hasil plot sumber anomali juga tersebar di luar zona mineralisasi skarn yang terpetakan, kemungkinan hal ini terkait alterasi hidrotermal yang intens serta faktor kontak antara pluton dan skarn di bawah permukaan yang membentuk anomali magnetik.

Pengamatan respon parameter fisik (karakteristik mineral) dengan penerapan metode geomagnet menunjukkan bahwa data geologi dan survei geofisika secara umum menunjukkan korelasi positif terkait zona mineralisasi endapan hidrotermal di daerah penelitian.



Gambar 8. Peta korelasi anomali medan magnet dengan geologi dan alterasi

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan interpretasi terhadap data eksplorasi geofisika dengan metode geomagnet dan tinjauan geologi, dapat disimpulkan beberapa hal. Karakteristik endapan mineral hidrotermal di daerah penelitian diindikasikan oleh keberadaan bijih besi yang terkait dengan tipe endapan hidrotermal skarn atau endapan skarn. Mineral bijih yang hadir berupa mineral sulfida (pirit, kalkopirit, sfalerit, dan kovelit) serta mineral oksida (hematit). Kontras anomali geofisika yang menjadi respon zona endapan mineral teridentifikasi dari perubahan kontras anomali magnetik yang signifikan ditunjukkan oleh anomali medan magnetik lokal dengan nilai berkisar -62,49 nT hingga 42,45 nT. Korelasi anomali geofisika terhadap penyebaran zona endapan mineral yang diperoleh bahwa Zona endapan mineral berupa bijih logam

dicirikan oleh kontras anomali magnetik yang signifikan dengan intensitas medan magnet yang tinggi bernilai >110,31 nT pada anomali medan magnet total dan bernilai >11,09 nT pada anomali medan magnet lokal, sebagai respon dari adanya pengkayaan mineral bijih logam pada material batuan. Hasil estimasi posisi dan kedalaman sumber anomali medan magnet menunjukkan zona endapan mineral yang cukup luas berarah timurlaut-baratdaya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Bapak Drs. Imam Suyanto, M.Si, selaku dosen program studi geofisika FMIPA UGM, atas bantuannya yang memfasilitasi penulis dalam melakukan akusisi data lapangan di lokasi penelitian

ACUAN

- Amigun, J.O., Afolabi, O., dan Ako, B.D., 2012, "Euler 3-D Deconvolution of Analytical Signal of Magnetic Anomalies over Iron Ore deposit in Okene, Nigeria", *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Science (JETAS)*, Vol. 3, No. 4, Hal 711-717.
- Evans, A.M., 1993, *Ore Geology and Industrial Mineral; An Introduction*, Blackwell Publishing, Australia, 443p.
- Hall, R., 2008, Indonesia, Geology. in Gillespie, R. and Clague, D.A. (eds) *Encyclopedia of Islands*. University of California Press, 1111p.
- Hamilton, W., 1979, *Tectonics of the Indonesian region*. Geological Survey Professional Paper 1078, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 345p
- Meinert, L. D., 1992, "Skarn and skarn deposit". *Geosciences Canada*, Vol. 19, Hal. 145-162.
- Ndlovu, T., Mashingaitze R.T., dan Mporu, P., 2015, "Analytic Signal and Euler Depth Interpretation of Magnetic Anomalies: Applicability to the Beatrice Greenstone Belt", *Journal of Geography and Geology*, Vol. 7, No. 4, Hal 108-112.
- Reid, A.B., J.M. Allsop, H. Granser, A.J. Millett dan I.W. Somerton, 1990, "Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution". *Geophysics*, Vol. 55, Hal. 80-91.
- Samodra, H., Gafour, S., dan Tjokrosapoutro, S., 1992, *Peta Geology Lembar Pacitan, Jawa, skala 1:250.000*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Tun, M.M., 2007, *An Investigation of Geology and Mineralization in the Kasihan Daerah, Pacitan Regency, East Java, Indonesia*. Tesis, Universitas Gadjah Mada.
- Van Bemmelen, R. W., 1949, *The Geology of Indonesia*, Vol.IA, The Hague, Government Printing Office.
- Warmada, I.W., Tun, M.M., Fukuda, K., Alfurqon, R., Imai, A., Harijoko, A., dan Watanabe, K., 2008. Stability Field Between Hendenbergite and Johannsenite in Kasihan Fe-Mn (Au) Skarn Deposit, Pacitan, East Java, *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan IAGI ke-37*, Bandung, Indonesia, Hal 562-568.
- Widodo, W., dan Simanjuntak, S., 2002. Hasil Kegiatan Eksplorasi Mineral Logam Kerjasama Teknik Asing Daerah Pegunungan Selatan Jawa Timur (JICA/MMAJ - Jepang) dan Cianjur (KIGAM - Korea). Kolokium Direktorat Inventarisasi Sumber Daya Mineral (DIM) TA. 2002 08:14pp, 836KB; http://psdg.bgl.esdm.go.id/kolokium%202002/08_Proseiding%20logam1.pdf.
- Widodo, W., Prapto, A.S., dan Nursahan, I., 2002. Inventarisasi dan Evaluasi Mineral Logam di Pegunungan Selatan Jawa Timur (Kabupaten Pacitan, dll), Jawa Timur. Kolokium Direktorat Inventarisasi Sumber Daya Mineral (DIM) TA. 2002 17:10pp, 955KB; http://psdg.bgl.esdm.go.id/kolokium%202002/17-Logam_Jatim.pdf.
- Yaghoobian A., Boustead G.A, dan Dobush T.M, 1992. "Object delineation using Euler's Homogeneity Equation", *Proceedings of SAGEEP '92*, San Diego, California, 01-20