

PENGINDERAAN JAUH UNTUK PENDETEKSIAN AWAL POTENSI TEMBAGA DI SUMBAWA

REMOTE SENSING FOR PRELIMINARY DETECTION OF COPPER PROSPECTING IN SUMBAWA

Atriyon Julzarika

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, LAPAN
Jl. Kalisari No. 8 Pekayon, Jakarta Timur 13710 Indonesia

ABSTRAK Tembaga merupakan salah satu jenis mineral penting yang memiliki banyak fungsi dalam berbagai aplikasi. Penelitian ini bertujuan untuk pendeteksian awal tembaga menggunakan data penginderaan jauh. Data penginderaan jauh yang digunakan berupa Landsat, ALOS Palsar, X SAR, SRTM C, dan Satelit Geodesi. Landsat digunakan untuk ekstraksi parameter geologi berupa penutup lahan dan perubahannya, bentuk lahan, dan alterasi hidrotermal. ALOS PALSAR, X SAR, dan SRTM C digunakan untuk pembuatan DTM (Digital Terrain Model). Integrasi DTM berguna untuk ekstraksi parameter geologi lainnya berupa struktur dan formasi geologi. DTM yang digunakan memiliki akurasi vertikal + 1,5 m. Data Satelit Geodesi bisa digunakan untuk ekstraksi gaya berat, medan magnet, geodinamika, serta densitas batuan. Berbagai parameter geologi ini diekstraksi dengan metode VIDN, integrasi, dip and strike, interferometri, backscattering, alterasi

hidrotermal, geodesi fisis, dan klasifikasi digital berbasis objek. Semua parameter geologi yang telah diekstrak dikorelasikan antar data, sehingga bisa digunakan untuk deteksi potensi tembaga. Informasi geospasial deteksi awal tembaga dan ekstraksi parameter geologinya merupakan produk yang dihasilkan dari penelitian ini. Informasi geospasial ini menggunakan referensi ketelitian ASPRS Accuracy Data for Digital Geospatial Data.

Kata kunci: penginderaan jauh, Sumbawa, tembaga, parameter geologi.

ABSTRACT Copper is one of the essential mineral that has many functions in variety of applications. This research aimed to detect copper potential using remote sensing data. Remote sensing data used were Landsat, ALOS PALSAR, X SAR, SRTM C, and Satellite Geodesy. Landsat was used for geological parameters extraction such as land cover and its changes, geomorphology, landforms, and hydrothermal alteration. ALOS PALSAR, X SAR and SRTM C were used for height model integration (DTM). This DTM was useful for the other geological parameters extraction, such as geological structures and formations. DTM used has vertical accuracy + 1,5 m. Geodesy Satellite data can be used for the extraction of gravity, magnetic field, geodynamics, and rock densities. These various geological parameters were extracted by VIDN, integration, dip and strike, interferometry, backscattering, hydrothermal alteration, physical geodesy, and classification based digital objects. All of those parameters were then correlated for copper potential detection. The results obtained were geospatial information of copper potential and geological parameters at a scale of 1: 50.000

Naskah masuk : 27 Januari 2017
Naskah direvisi : 27 Oktober 2017
Naskah diterima : 30 April 2018

Atriyon Julzarika
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, LAPAN
Jl. Kalisari No. 8 Pekayon, Jakarta Timur 13710
Indonesia
Email : verbhakov@yahoo.com

with reference ASPRS Accuracy Data for Digital Geospatial Data.

Keywords: *remote sensing, Sumbawa, copper, geological parameters.*

PENDAHULUAN

Saat ini perkembangan penginderaan jauh sudah meningkat dengan ditandai perkembangan berbagai teknologi penginderaan jauh menggunakan lima jenis data utama, yaitu data optik, *Synthetic Aperture Radar* (SAR), microwave, LIDAR, dan sonar. Citra optik memiliki kelebihan, karena citranya sesuai dengan kondisi sebenarnya tetapi tidak bebas efek awan. Sedangkan data SAR, *microwave*, dan sonar memiliki kelebihan bebas efek awan tetapi butuh keahlian khusus untuk pengolahan datanya. Data ini bisa digunakan untuk pemanfaatan bidang geologi dan tambang (Liu et al., 2011). Aplikasi penginderaan jauh di Indonesia untuk geologi dan pertambangan telah memiliki regulasi yaitu UU No.4 tahun 2009 tentang minerba (KESDM, 2009) dan Kepmentamben No.1519.K/20/MPE/1999 (KESDM, 2009). Pada regulasi tersebut dijelaskan bahwa survei dan pemetaan geologi dilakukan dengan teknologi penginderaan jauh dengan standar dan toleransi tertentu.

Pemanfaatan data penginderaan jauh untuk identifikasi sumberdaya energi dan mineral telah dilakukan di berbagai negara, terutama di Rusia, Amerika Serikat, China, dan Kanada. Identifikasi sumberdaya energi dan mineral dilakukan dengan mengekstraksi berbagai parameter geologi (Sabins, 1999). Pembentukan dan identifikasi mineral berkaitan dengan berbagai proses dan parameter geologi (Schimmer, 2008). Beberapa penelitian hanya menggunakan satu parameter geologi, sementara itu banyak pula penelitian mengkorelasikan berbagai parameter geologi. Parameter geologi ini meliputi struktur geologi, litologi, bentuk lahan, alterasi hidrotermal, gaya berat, medan magnet, densitas, geodinamika, seismik, geolistrik, model tinggi, penutup lahan, penggunaan lahan, dan lain-lain (Peters et al., 2011).

Mineral logam memiliki arti penting dalam perekonomian dunia (Gabr et al., 2010). Dengan mengetahui parameter geologi tertentu, sebaran mineral tersebut dapat diperkirakan. Pemetaan geologi dengan penginderaan jauh yang disertai hasil survei lapangan telah menghasilkan peta

geologi yang mencakup seluruh wilayah Indonesia. Jalur magmatik yang membawa cebakan mineral di kepulauan Indonesia dapat diamati pada peta geologi, dan diterangkan dengan teori tektonik lempeng. Berdasarkan pada penampakan tersebut dapat diketahui bahwa di Indonesia terdapat 15 jalur mineralisasi logam dasar sebagai standar karakteristik sumber daya mineral di Indonesia (Ernowo dan Pardianto, 2011).

Pembentukan mineral logam berkaitan erat dengan proses magmatik. Lingkungan pembentukan mineral logam umumnya dijumpai di dalam batuan vulkanik. Hal ini dapat dipahami bahwa proses magmatik berlangsung secara simultan yang dimanifestasikan dalam kegiatan gunungapi. Mineral logam pada umumnya berkaitan dengan batuan gunungapi tua (Tersier), namun batuan tersebut telah mengalami erosi sangat intensif. Jika proses erosi tersebut mengakibatkan zona mineralisasi tersingkap di permukaan, maka mineral logam sangat mudah untuk diperoleh (Wu, 2011).

Mineral yang dipakai dalam kehidupan umat manusia tidak semuanya terdapat di Indonesia. Mineral utama yang terdapat di Indonesia diperkirakan hanya sekitar 30%. Mineral tersebut adalah emas, perak, tembaga, tanah jarang, nikel, timah putih, timah hitam, alumunium, besi, mangan, chromit, yodium, berbagai garam, berbagai mineral industri (asbes, bentonit, zeolit, belerang, fosfat, batugamping), batu mulia, termasuk intan, dan bahan bangunan. Mineral langka masih sedikit diketahui, demikian juga uranium, hingga saat ini belum tersedia data yang rinci mengenai (Freeden et al., 2010); (Maryono et al., 2014).

Beberapa mineral telah menjadi andalan sektor pertambangan di Indonesia. Produksi dan cadangannya juga cukup besar. Survei awal dalam kegiatan eksplorasi sumber daya energi dan mineral menggunakan teknologi penginderaan jauh. Identifikasi tersebut menggunakan kunci interpretasi adalah warna, tekstur, dan asosiasi.

Pada penelitian ini, lebih difokuskan pada identifikasi mineral tembaga dengan korelasi 10 parameter geologi. Pemilihan jenis mineral tembaga disebabkan karena tembaga memiliki peran vital dalam sumberdaya mineral di Indonesia. Mineral ini dibutuhkan untuk berbagai jenis industri dan berbagai keperluan rumah

tangga sehari-hari (Shen et al., 2010). Tembaga juga memiliki kedekatan atau berasosiasi khusus terhadap jenis mineral di sekitarnya, yaitu perak, emas, timah, uranium, dan elemen tanah jarang (*rare earth element*). (Freeden et al., 2010); (Seigel et al., 1995).

Keberadaan tembaga ini mengindikasikan adanya potensi perak, emas, timah, elemen tanah jarang, dan uranium. (USGS, 2010).

Tembaga atau Cuprum dalam tabel periodik memiliki lambang Cu, dengan nomor atom 29. Tembaga di alam tidak begitu melimpah dan ditemukan tidak dalam bentuk bebas maupun dalam bentuk senyawa. Bijih tembaga terkandung di dalam pirit atau *chalcopyrite* (CuFeS_2), *copper glance* atau *chalcocite* (Cu_2S), *cuprite* (Cu_2O), *malaconite* (CuO) dan *malachite* ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$) sedangkan dalam unsur bebas ditemukan di Northern Michigan Amerika Serikat (Leverington et al., 2012). Jika tembaga tidak murni, mudah ditempa (liat) dan bersifat mulur sehingga mudah dibentuk menjadi pipa, lembaran tipis dan kawat. Tembaga juga merupakan konduktor panas dan listrik yang terbaik kedua setelah perak.

Tulisan ini akan membahas metode identifikasi awal keberadaan tembaga menggunakan data penginderaan jauh, pemanfaatan data penginderaan jauh untuk deteksi keberadaan tembaga masih sedikit dilakukan sehingga akan mempunyai nilai penting bagi keperluan pengguna dan masyarakat.

Pemanfaatan teknologi penginderaan jauh dalam eksplorasi sumberdaya mineral dapat meminimalisir waktu survei geologi, efisiensi biaya survei dan survei geologi bisa langsung fokus pada wilayah tertentu yang memiliki potensi. Pendeteksian ini menggunakan model yang dibangun di wilayah yang sudah produksi atau eksploitasi sehingga diperoleh model yang tepat. Setelah itu model ini diterapkan pada wilayah yang belum diketahui potensi tembaganya. Pendeteksian potensi ini dapat didekati dengan pendekatan asosiasi, struktur geologi, gaya berat, medan magnet, dan densitas serta parameter geologi lainnya.

METODE

Penginderaan jauh optik yang digunakan adalah citra Landsat (tahun 1988, 1997, 1998, 2000, dan 2010), data SAR dan microwave yang digunakan adalah ALOS PALSAR (2010), SRTM C dan X

SAR (sudah diberi nilai tambah pada tahun 2007-2010), dan Satelit Geodesi (Grace, Champ, GOCE, dan SWARM) tahun 2000-2013.

Data *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) merupakan bentuk data yang menyediakan informasi ketinggian yang disebut *digital elevation model* (DEM). Data ini diperoleh dari sistem radar yang dipasang pada Pesawat Ruang Angkasa selama 11 hari misinya pada Februari 2000. Data ini mempunyai resolusi spasial yang tinggi yaitu 3 *arc second* ($\approx 90\text{m}$) dan memiliki akurasi vertikal lebih kurang 7.748 sampai 3.926 m. X SAR mempunyai resolusi spasial 1 *arc second* ($\approx 25\text{m}$). X SAR merupakan generasi pertama dari TerraSAR X. Data ini diperoleh dari DLR.

Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE) merupakan sistem satelit gravimetri hasil kerjasama antara *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) dengan *Deutsches Zentrum fur Luft-und Raumfahrt* (DLR). Tujuan utama dari GRACE ini yaitu untuk menyediakan informasi yang cukup akurat berupa gaya berat bumi untuk jangka waktu proyek selama lima tahun. Estimasi secara temporal dari bidang gaya berat bumi dapat diperoleh beserta variasi yang terjadi. Satelit *Champ* merupakan satelit gaya berat bumi buatan Jerman. Satelit ini memiliki kesamaan fungsi dengan satelit *Grace*. Misi GOCE yaitu untuk menentukan medan gravitasi statis berupa geoid dan anomali gaya berat dengan akurasi 1 cm untuk tinggi geoid dan 1 miligal untuk anomali gaya berat bumi, pada spasial grid kurang dari 100 km di permukaan bumi (Freeden et al., 2010). *SWARM* merupakan satelit milik *European Space Agency* (ESA) yang berguna untuk pemodelan medan magnet bumi (Freeden et al., 2010), dan (Seigel et al., 1995).

Landsat merupakan satelit milik *United States of Geological Survey* (USGS) yang memiliki fungsi utama untuk pendeteksian potensi sumber daya alam, terutama untuk geologi dan tambang. Satelit ini memiliki sensor optik (multispektral dan pankromatik) dengan jumlah 11 band dan juga memiliki sensor optik *hyperspektral* (EO-1 dan ALI) dengan jumlah 269 band (Canty dan Nielsen, 2008). Pada awalnya, pihak USGS menggunakan satelit Landsat untuk mengidentifikasi potensi geologi dan tambang di seluruh dunia, termasuk di Indonesia. Saat ini pengguna citra Landsat sudah jarang yang memanfaatkan untuk aplikasi geologi

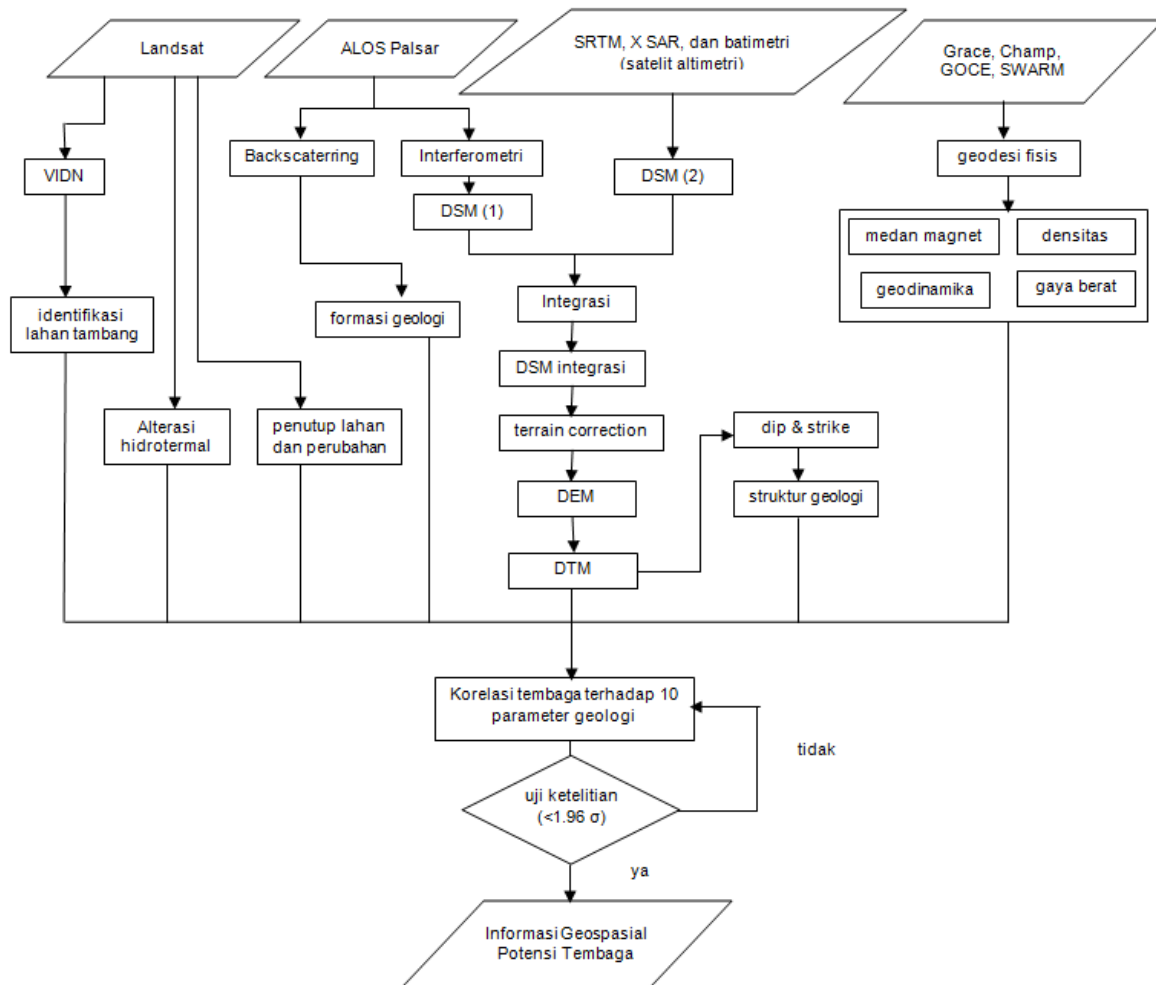
pertambangan. Citra Landsat di Indonesia sering digunakan untuk aplikasi penutup lahan, sumber daya hayati, lingkungan, mitigasi bencana, atmosfer, dan kelautan (Schroeder et al., 2006).

ALOS PALSAR merupakan satelit milik *Japan eXploration Agency* (JAXA). Satelit SAR dengan empat polarisasi ini bisa digunakan untuk pembuatan model tinggi, penutup lahan, deformasi vertikal, pendeteksian gambut, sumber daya alam hayati dan non hayati. Satelit ini memiliki kelebihan backscatter dalam identifikasi objek dan memiliki band L yang mampu melakukan penetrasi sampai mendekati permukaan tanah (Jin et al., 2014). Data ALOS PALSAR, SRTM C, X SAR digunakan untuk pembuatan parameter model tinggi (DTM) integrasi, struktur geologi. Data satelit Geodesi (grace, champ, goce, swarm) digunakan untuk pembuatan parameter gaya berat, geodinamika,

medan magnet, dan densitas. Data Landsat digunakan untuk identifikasi lahan tambang, alterasi hidrotermal, dan penutup lahan serta perubahannya. Semua parameter geologi ini digunakan untuk pendeteksian potensi tembaga.

Aplikasi penginderaan jauh untuk geologi dan tambang tidak memerlukan citra yang bersifat terbaru. Hal ini disebabkan karena perubahan geologi tambang memerlukan jangka waktu lama, sekitar 200-300 tahun.

Lokasi penelitian ini terbagi atas dua lokasi, yaitu lokasi pembuatan model terletak di Batu Hijau, pulau Sumbawa, Nusa Tenggara Barat. Lokasi ini merupakan lahan sudah produksi (eksploitasi), yang berarti sudah teruji. Sedangkan lokasi kedua yang digunakan untuk penerapan model dilakukan di seluruh pulau Sumbawa dan daerah Geumpang, Aceh. Penelitian ini hanya difokuskan pada model identifikasi awal mineral tembaga.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

Pendeteksian ini memerlukan beberapa tahapan yaitu identifikasi lahan tambang, ekstraksi parameter geologi, korelasi antar parameter geologi, dan informasi spasial tembaga (Gambar 1). Tahapan utama pada diagram alir meliputi: identifikasi lahan tambang, dan ekstraksi parameter geologi.

Identifikasi lahan tambang

Identifikasi lahan tambang dan perubahannya menggunakan metode *prost* dan *Vegetation Index Differencing* (VIDN). Metode *prost* menggunakan rasio band (3/1:5/4:5/7) (Canty, 2010); (Zhou et al., 2013); (Youssef et al., 2012); sedangkan *Vegetation Index Differencing* (VIDN) merupakan pengurangan dua indeks vegetasi NDVI (Nielsen, 2010). Nilai VIDN akan berkisar antara -2 sampai 2 (Prasad dan Prabhu 2011). Nilai yang negatif menyatakan adanya pengurangan biomassa atau vegetasi hijau dan merupakan indikasi adanya perubahan penutup lahan. Dari masing-masing citra sintesis yang terpilih selanjutnya dilakukan batasan nilai (*thresholding*) untuk menentukan areal lahan terbuka tambang. Nilai ambang batas atas (T_u) dan ambang batas bawah (T_d) dari masing-masing *threshold* ditentukan berdasarkan nilai piksel contoh pada area lahan bekas tambang (Liu et al., 2013); (Schölkopf et al., 1998).

Metode identifikasi ini dilakukan pada lokasi tambang yang sudah produksi (eksploitasi) supaya memudahkan pengambilan sampel dalam pembuatan model. Setelah model integrasi berbagai parameter geologi diperoleh maka diaplikasikan pada wilayah lain yang belum diketahui potensi tambangnya.

Ekstraksi parameter geologi

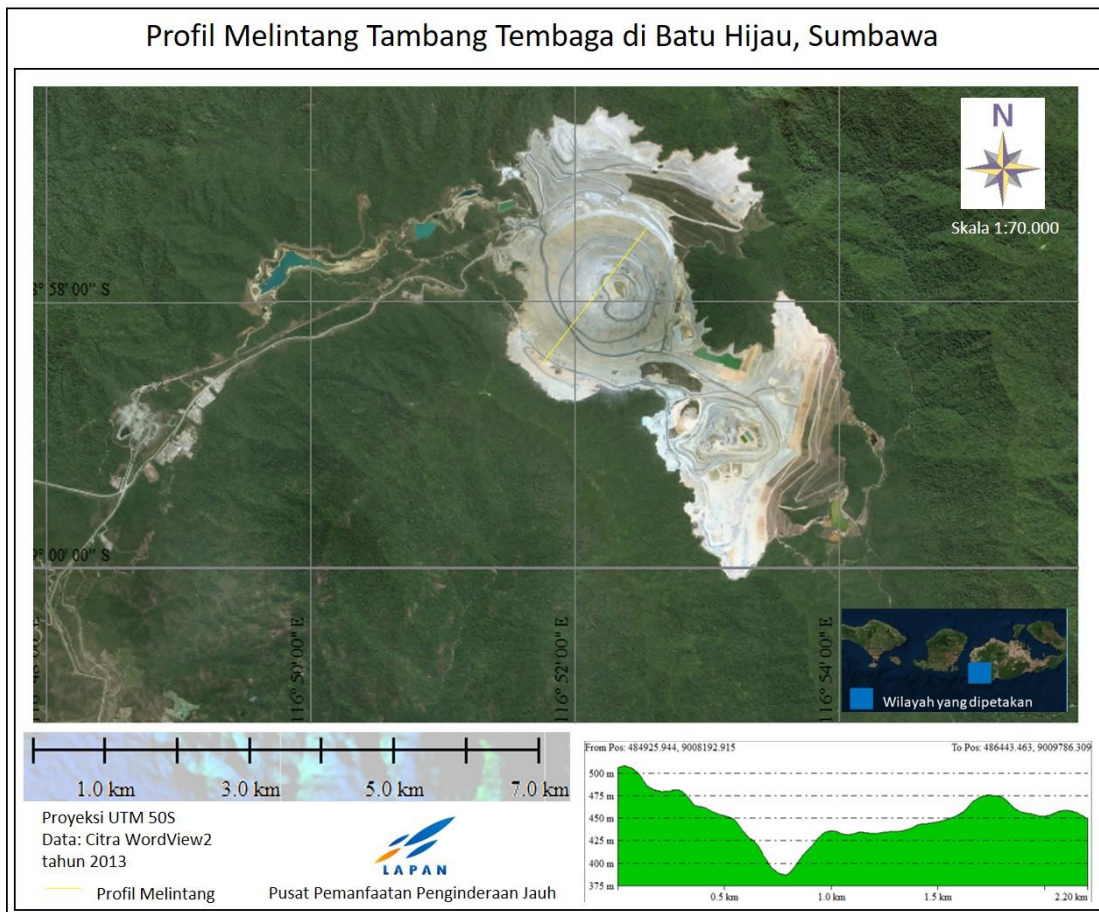
Parameter geologi yang diekstraksi adalah kelurusan (*lineament*) struktur geologi, formasi geologi, DTM, alterasi hidrotermal, geodinamika, gaya berat, densitas, medan magnet, dan tutupan lahan.

Pendeteksian struktur dan formasi geologi ini menggunakan metode *dip and strike*. Bidang planar ialah bidang yang relatif lurus, contohnya bidang perlapisan, bidang kekar, bidang sesar. Metode *dip and strike* dapat juga dilakukan secara otomatis, ada lima alternatif pilihan metode untuk melakukan *dip and strike*, yaitu *three point*, *plane contact*, *strike from map*, *retrace*, dan *parallel contact*.

DTM dibuat dengan menggunakan metode integrasi berbagai *Digital Surface Model* (DSM). Filosofi integrasi DSM mendapatkan DSM dengan menggunakan berbagai keunggulan dari setiap DSM berdasarkan karakteristik berupa penetrasi ke obyek, resolusi spasial, dan minimal kesalahan tinggi di dataran rendah maupun dataran tinggi (Julzarika et al., 2015). Integrasi model tinggi bertujuan untuk mendapatkan model tinggi (DSM, DEM, DTM) yang memiliki akurasi vertikal lebih baik dan minimal kesalahan vertikal. Integrasi ini menggunakan keunggulan dari masing-masing karakteristik model tinggi yang digunakan dalam integrasi (Julzarika, 2015). Data ALOS Palsar terlebih dahulu dibuat DSM menggunakan metode interferometri. Interferometri atau *Interferometric synthetic aperture radar* (InSAR/IFSAR) adalah teknik radar 4D digunakan dalam geodesi-penginderaan jauh. InSAR menggunakan kombinasi nilai tiap piksel dari dua data radar. InSAR terdiri dari dua tahapan utama yaitu pembentukan citra radar *Single Look Complex* (SLC) dari data mentah SAR hasil pemotretan dan tahapan pembentukan citra interferogram untuk melihat bentuk permukaan topografi (Jin et al., 2014). DSM berikutnya adalah X SAR, SRTM, dan batimetri. Ke empat data DSM tersebut dilakukan integrasi DSM sehingga diperoleh DSM dengan akurasi vertikal lebih tinggi dan minimal kesalahan vertikal.

Alterasi hidrotermal adalah suatu proses yang sangat kompleks yang melibatkan perubahan mineralogi, kimiawi, dan tekstur yang disebabkan oleh interaksi fluida panas dengan batuan yang dilaluinya, di bawah kondisi evolusi fisio-kimia (Qin dan Liu, 2010). Proses alterasi merupakan suatu bentuk metasomatisme, yaitu pertukaran komponen kimiawi antara cairan-cairan dengan batuan dinding (Rajendran et al., 2013). Segal (zona alterasi, potensi logam besi, mineral hidroksil, biji besi), Abrams (alterasi hidrotermal oksida besi, tanah liat, tambang golongan C), Kaufmann (mineral hydroxyl), Chica-Olma (mineral logam dan non logam, tanah liat, bahan tambang golongan C, bijih besi), dan lain-lain.

Metode ARI menggunakan kombinasi band 531 dan band 742 citra landsat untuk pemisahan unit geologi dan alterasi. Alterasi besi dengan rasio band 3/1, band 5/7 alterasi tanah liat, kombinasi band 531 untuk alterasi argilik, alterasi oksida besi untuk band 531 dan band 742, alterasi konfirmasi dengan band 5-7, band 4-2, dan band



Gambar 2. Profil Melintang Tambang Tembaga di Batu Hijau, Sumbawa tahun 2013. Lokasi ini dijadikan model pendeteksian tembaga dan bisa diaplikasikan di wilayah lain yang belum diketahui potensi maupun wilayah yang sudah dieksplorasi (Julzarika et al., 2013).

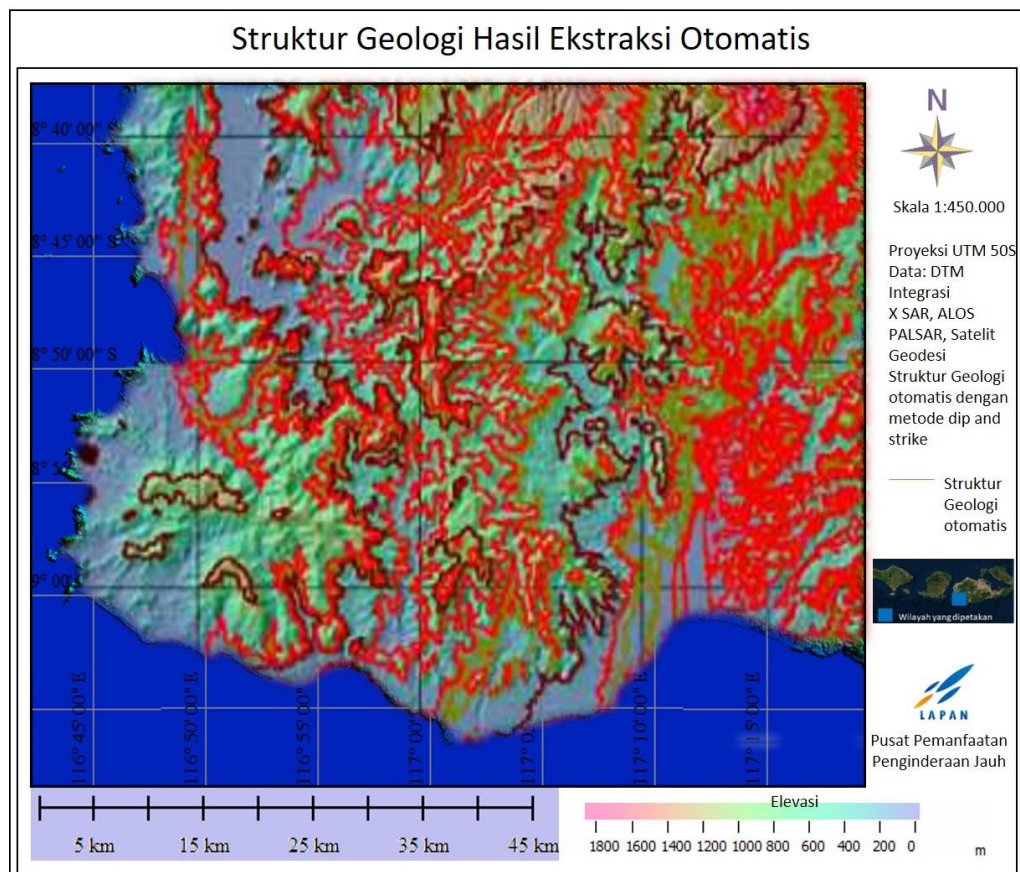
3-1. Metode Segal bertujuan untuk pemetaan zona alterasi, kombinasi 3/1, 5/7, 5/4 untuk analisis oksida besi, yang mengandung mineral hidroksil, bijih besi. Metode Abrams bertujuan untuk memetakan alterasi hidrotermal oksida besi, tanah liat, tambang golongan C dengan rasio (5/7:3/2:4/5). Metode Kaufmann bertujuan untuk identifikasi mineral hidroksil, besi dengan rasio (7/4:4/3:5/7). Metode Chica-Olma bertujuan untuk pemetaan alterasi tanah liat, ion besi, dan oksida besi serta bijih besi, fumarol, tambang golongan C. Rasio yang digunakan (5/7:5/4:3/1). Metode Jensen menggunakan Optimum Index Factor (OIF) TM741, TM541, and TM531 untuk deteksi alterasi hidrotermal, sedangkan metode crosta dan moore menggunakan kombinasi band 4:7:2 and 4:7:6 untuk alterasi hidrotermal.

Parameter geologi lain yang diperhitungkan berupa gaya berat, geodinamika, medan magnet.

Penutup lahan diekstraksi dengan metode klasifikasi berbasis objek (OBIA). Klasifikasi ini mendefinisikan suatu kelas yang sama berdasarkan objek yang sama dengan parameter skala, bentuk, kepadatan (Amer et al., 2012). Klasifikasi berbasis objek ini digunakan untuk klasifikasi citra resolusi tinggi. (Canty dan Nielsen, 2006). Informasi geospasial potensi tembaga dan parameter geologi ini menggunakan skala 1:50.000 dengan acuan ASPRS *Accuracy Data for Digital Geospatial Data*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter geologi yang digunakan dalam pendeteksian potensi tembaga adalah struktur geologi, model tinggi, DTM, alterasi hidrotermal, geodinamika, gaya berat, medan magnet, densitas, dan penutup lahan. Parameter yang dominan dalam penentuan prediksi potensi tembaga ini adalah struktur geologi, dan densitas.



Gambar 3. Struktur (garis merah) yang diekstraksi otomatis dari data integrasi DTM ALOS PALSAR.

Pada penelitian ini, parameter geologi yang digunakan adalah yang terletak pada tambang terbuka di lokasi di Batu Hijau, Sumbawa. Model pendeteksian tembaga menggunakan kondisi di Batu Hijau Sumbawa. Gambar 2 merupakan profil melintang yang dibuat pada parameter geologi DTM.

Penentuan dan Pendefinisian Parameter-Parameter Geologi

Parameter-parameter geologi meliputi:

Struktur dan formasi geologi

Pembuatan struktur geologi ini menggunakan data DTM yang dibuat dari integrasi ALOS PALSAR, SRTM C, X SAR dan data lapangan. Pada penelitian ini struktur geologi dibuat dengan metode penentuan *dip and strike* dari citra otomatis pada DTM. Ekstraksi ini bisa dilakukan secara otomatis. Formasi geologi dibuat dari pendefinisian dari hasil *backscattering* ALOS PALSAR yang dibandingkan dengan peta geologi. Formasi Geologi hanya menggunakan citra ALOS

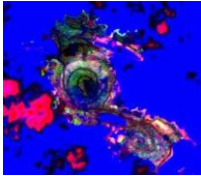
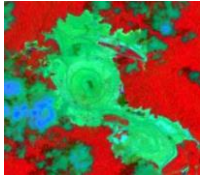
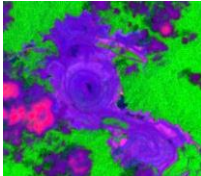
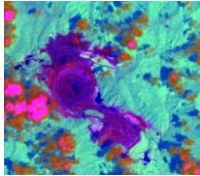
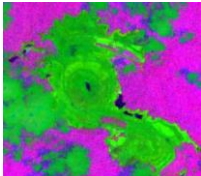
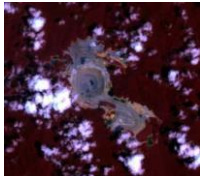
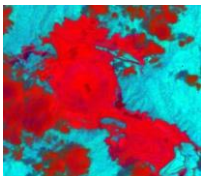
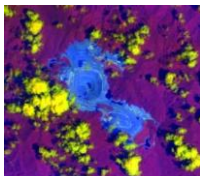
PALSAR. Hasil deteksi struktur dan formasi geologi bisa dilihat pada Gambar 3.

Garis warna merah pada Gambar 3 merupakan struktur geologi dibuat secara otomatis dengan metode *dip and strike* (*strike from map*). Garis ini mengindikasikan lokasi *sedimentary bedding*, *joints*, *foliation*, dan *fault plane*. Formasi geologi dibuat berdasarkan formasi, penyusun, endapan, dan kesamaan umur geologi. Pada Gambar 3 dapat diinterpretasi struktur dan formasi geologi secara visual (Julzarika et al., 2013).

Alterasi hidrotermal

Ada beberapa metode untuk identifikasi kondisi geologi dan tambang, diantaranya USGS dengan metode Prost (identifikasi lokasi tambang), Segal (zona alterasi, potensi logam besi, mineral hidroksil, biji besi), Abrams (alterasi hidrotermal oksida besi, tanah liat, tambang golongan C), Kaufmann (mineral hydroxyl), Chica-Olma (mineral logam dan non logam, tanah liat, tambang golongan C, bijih besi), dan lain-lain,

Tabel 2. Analisis Kondisi Geologi dan Tambang dengan Citra Landsat yang digunakan untuk pembuatan model pendeteksian potensi Tembaga.

| No | Metode | Hasil | Tujuan | No | Metode | Hasil | Tujuan |
|----|-----------------------|---|--|----|------------------|--|--|
| 1. | Prost, MPCA, dan VIDN |  | Identifikasi lahan tambang dan perubahannya | 5. | Chica-Olma |  | Pemetaan alterasi tanah liat, ion besi, dan oksida besi serta bijih besi, fumarol, tambang golongan C. Rasio yang digunakan (5/7:5/4:3/1). |
| 2. | Segal |  | Pemetaan zona alterasi, kombinasi 3/1, 5/7, 5/4 untuk analisis oksida besi, bearing mineral hidroksil, bijih besi. | 6. | ARI |  | Alterasi besi, argelic, tanah liat |
| 3. | Abrams |  | Pemetaan alterasi hidrotermal oksida besi, tanah liat, tambang golongan C dengan rasio (5/7:3/2:4/5). | 7. | Jensen |  | Optimum Index Factor (OIF) TM741, TM541, and TM531 |
| 4. | Kaufmann |  | Identifikasi mineral hidroksil, besi dengan rasio (7/4:4/3:5/7) | 8. | Crosta and Moore |  | Kombinasi band 4:7:2 and 4:7:6 untuk alterasi hidrotermal. |

lihat Tabel 2. Data yang digunakan berupa data Landsat yang sudah berupa reflektansi (Zhou et al., 2013).

Gaya berat bumi dan medan magnet bumi

Analisa gaya berat bumi dan medan magnet menggunakan pendekatan geodesi fisis.

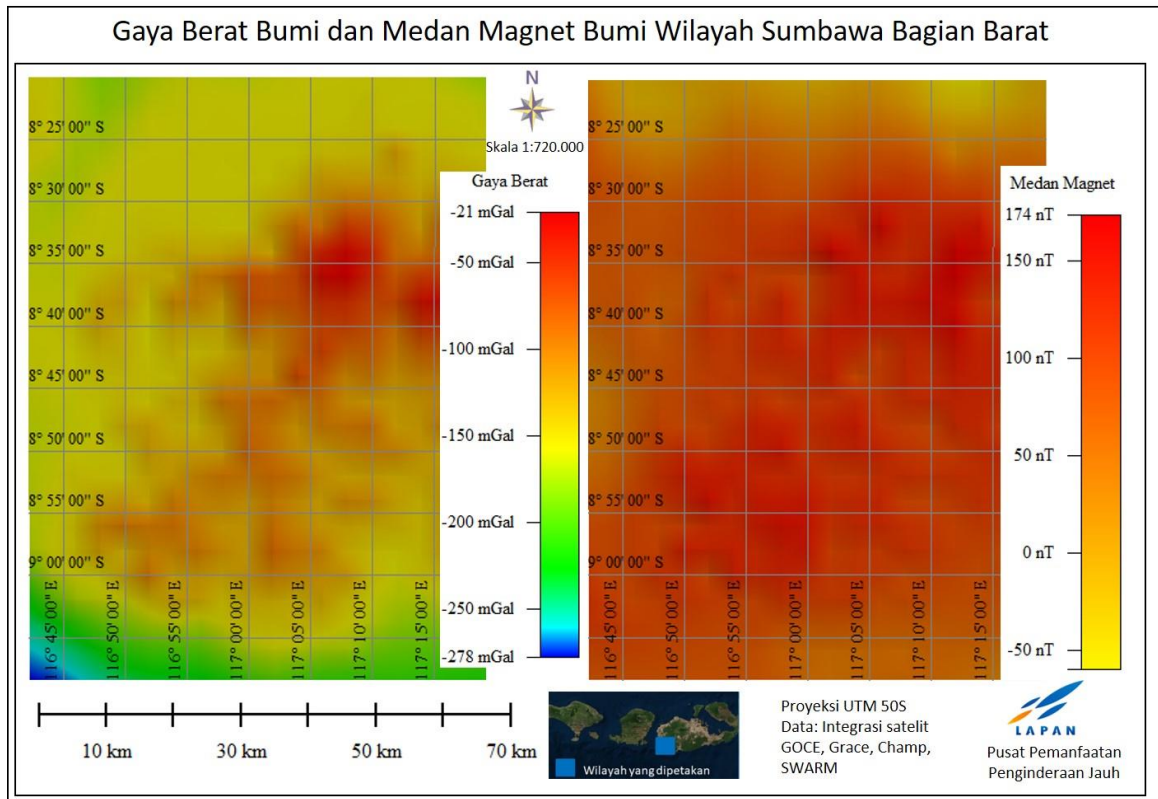
Medan magnet menggunakan data SWARM, sedangkan gaya berat dengan Grace, Champ, GOCE. Gambar 4 menjelaskan tentang nilai gaya berat yang diekstraksi dari data satelit dalam satuan miligal, sedangkan medan magnet diekstraksi dalam satuan tesla. Medan magnet ini diilustrasikan dengan simbol panah.

Gaya berat digunakan untuk menghitung densitas tembaga, sedangkan medan magnet berpengaruh dalam deformasi vertikal dan deformasi horizontal

yang terjadi pada lokasi yang terdeteksi potensi awal tembaga. Gaya berat dengan warna kuning-merah memiliki nilai lebih tinggi. Gaya berat dengan warna hijau memiliki nilai menengah. Gaya berat dengan warna biru-ungu memiliki nilai lebih rendah. Medan magnet pada Gambar 4 dengan warna merah-kuning. Warna merah menunjukkan nilai medan magnet lebih tinggi, sedangkan nilai kuning menunjukkan nilai medan magnet lebih rendah. Nilai medan magnet tinggi mengindikasikan ada potensi awal mineral logam.

Geodinamika dan densitas

Analisa geodinamika berupa deteksi lempeng tektonik dan deformasi (utara-selatan dan barat-timur) wilayah kajian. Data yang digunakan berupa data dari Satelit Geodesi (Grace, Champ, Goce, dan SWARM), dan data lapangan.



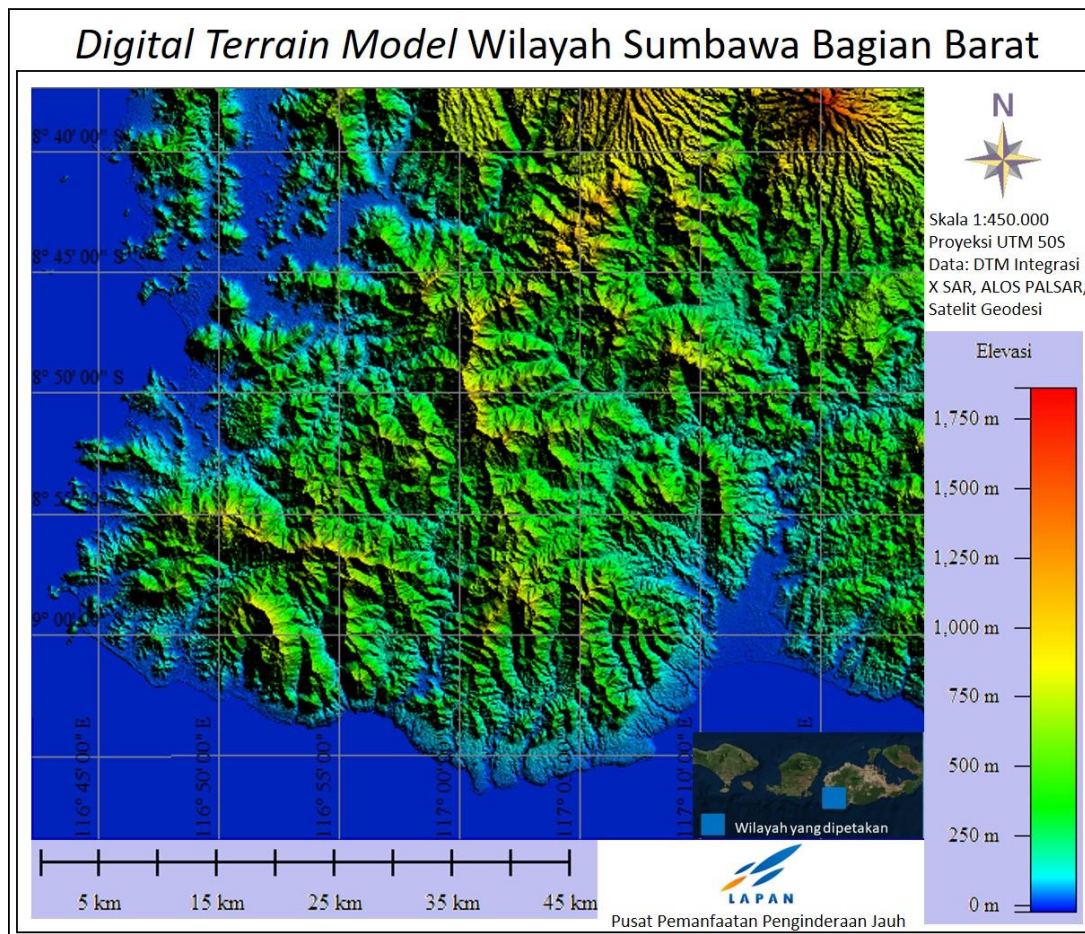
Gambar 4. Gaya Berat (kiri) dalam satuan mgal (merah: nilai tinggi dan biru: nilai rendah) dan Medan Magnet (kanan) ditandai (merah: nilai tinggi dan kuning: nilai rendah). Hasil olahan satelit Geodesi.

Tabel 3. Geodinamika.

| No | 1 | 2 | 3 |
|------------|--|--|--|
| Hasil | | | |
| Keterangan | Deformasi arah utara-selatan (warna kuning: deformasi tinggi, hijau: deformasi sedang, biru: deformasi rendah) | Deformasi arah barat-timur (warna hijau: deformasi tinggi, biru: deformasi rendah) | Deformasi gabungan (warna kuning: deformasi tinggi, hijau: deformasi sedang, biru: deformasi rendah) |

Tabel 3 menjelaskan prediksi pergerakan lempeng bumi berdasarkan arah utara-selatan, arah barat timur, dan kombinasi keduanya. Densitas dari tembaga dapat dideteksi dengan data satelit Geodesi. Nilai densitas tembaga pada model ini terletak dengan nilai sekitar $\rho=8960 \text{ kg/m}^3 + 1,96\sigma$ dan Specific Gravity ($S-G=8.9$). Kondisi ini

berlaku pada $S-G=\frac{\rho_{\text{substance}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}$ dimana $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ 4°C of 1000 kg/m^3 . Jika prediksi tembaga sudah dapat dideteksi, terutama pada densitas yang ditetapkan maka potensi emas juga dapat diprediksi. Hal ini berkaitan dengan konsep asosiasi tembaga dengan emas pada bijih yang sama.



Gambar 5. Integrasi DTM (warna merah, kuning, dan hijau: topografi dengan akurasi vertikal $\pm 1,5$ m, biru: batimetri, belum diuji akurasi vertikalnya).

DTM

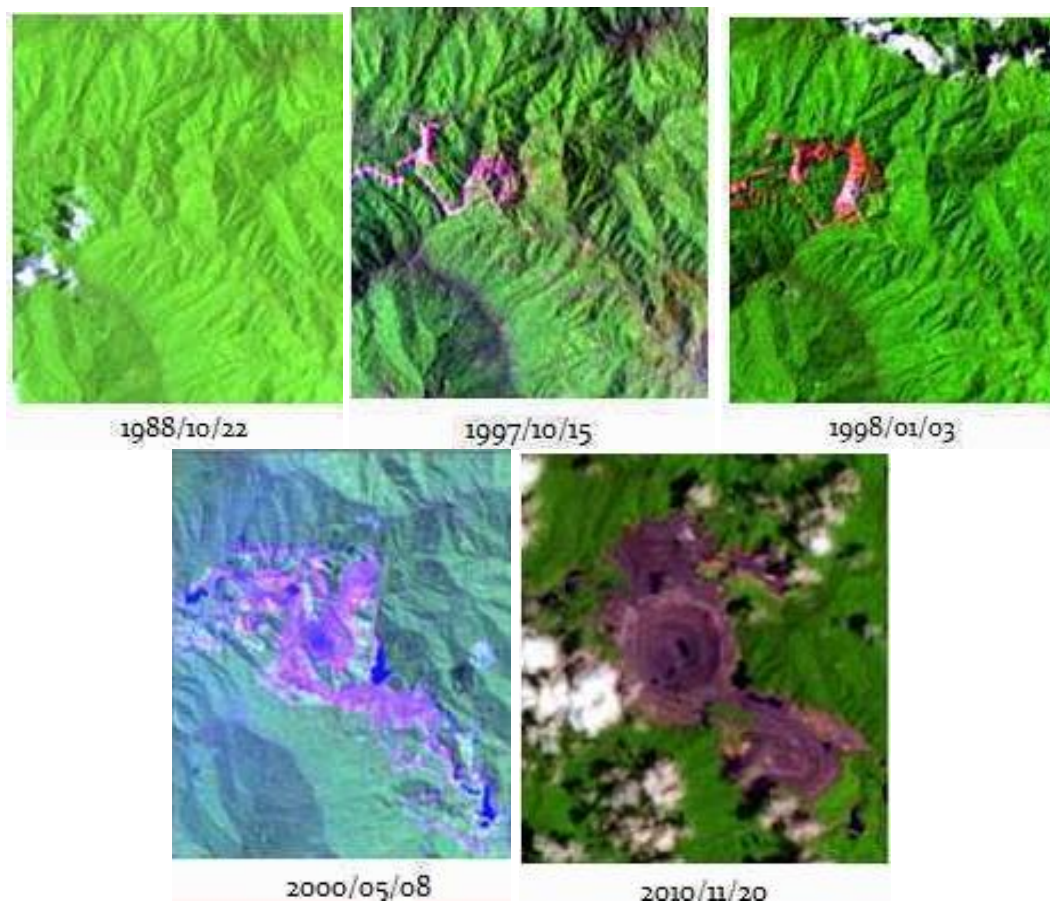
DTM diperlukan untuk berbagai aplikasi, seperti untuk deteksi struktur geologi, bentuk lahan, survei dan pemetaan. Data yang digunakan dari hasil integrasi ALOS Palsar, SRTM C, X SAR, batimetri, dan data lapangan. Integrasi model tinggi ini menghasilkan DSM sehingga diperlukan koreksi terrain dan koreksi kesalahan tinggi. Hal ini bertujuan untuk mengubah DSM menjadi DEM dan DTM serta meningkatkan nilai akurasi vertikalnya. Integrasi model tinggi pada Gambar 5 merupakan integrasi model tinggi dengan akurasi vertikal + 1,5 m.

Penutup lahan dan perubahannya

Penutup lahan dapat digunakan sebagai informasi awal untuk deteksi potensi tambang hidrokarbon dan mineral. Misal, deteksi potensi batubara dengan melihat asosiasi dari gambut, deteksi

tembaga dengan asosiasi vegetasi rendah/paku-pakuan/pakis/*copper fern* dengan kondisi batuan berwarna hijau/kuning keemasan, dan lain-lain. Selain penutup lahan, juga bisa dipantau perubahan penutup lahan di wilayah pertambangan tersebut (Radke et al., 2005).

Informasi penutup lahan dan perubahannya dapat diekstraksi dengan metode klasifikasi digital berbasis objek (Ciampalini et al., 2013); (Bedini, 2011). Tambang Batu Hijau di Pulau Sumbawa adalah tambang tembaga terbesar selama ini di Kepulauan Nusa Tenggara. Hasil survei di lapangan, ditemukan banyak tumbuhan *copper fern*. Tumbuhan pakis/paku-pakuan itu menjadi penciri permukaan bahwa tanahnya mengandung tembaga. Pakis tembaga itu tumbuh, terkonsentrasi di suatu tempat yang relatif gundul di antara hutan lebat (Julzarika et al., 2013).



Gambar 6. Perubahan Penutup Lahan Tambang Newmont Nusa Tenggara (1988-2010).

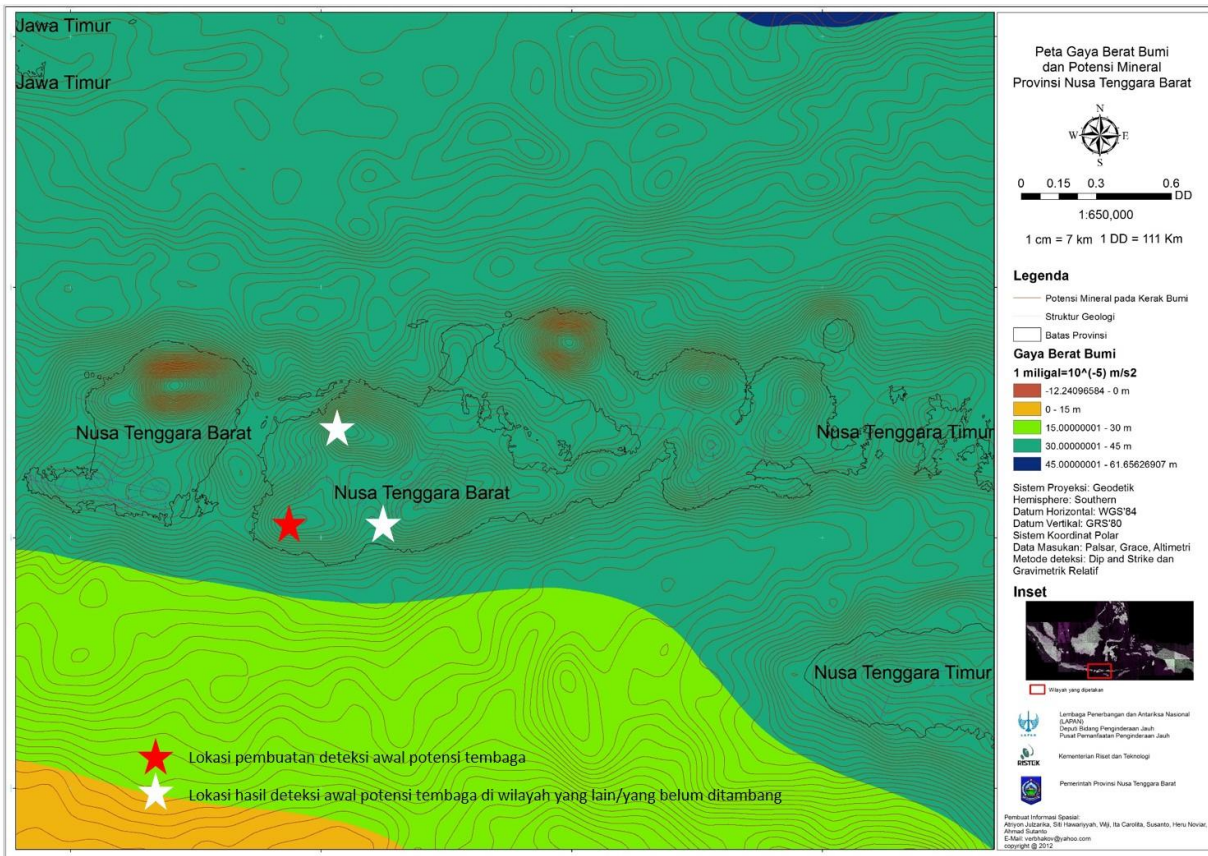
Gambar 6 menjelaskan tentang perubahan penutup lahan tambang Newmont Nusa Tenggara. Pada citra Landsat berbagai tahun dapat memantau kondisi lapangan dalam setiap tahapan eksplorasi. Pada citra tahun 1997 terpantau telah dilakukan eksploitasi. Pada citra tahun 1998 dan 2000 terpantau eksploitasi makin meluas.

Korelasi Data Penginderaan Jauh dengan Tembaga dan Uji Ketelitian

Setelah diperoleh hasil penentuan dan ekstraksi parameter geologi terhadap kondisi geologi dan tambang tembaga, maka kemudian dilakukan korelasi data penginderaan jauh dengan tembaga. Korelasi dapat berupa semua parameter geologi yang dapat digunakan untuk deteksi awal tembaga. Dari hasil korelasi ini akan diketahui, parameter geologi mana yang akan dominan dalam deteksi potensi tembaga. Korelasi ini akan menghasilkan model untuk deteksi potensi tembaga. Model ini dibuat pada lokasi tambang Newmont di Batu Hijau Sumbawa.

Banyak hasil yang diperoleh dari korelasi ini, salah satunya pemanfaatan untuk prediksi volume tambang. Volume dapat dihitung dengan mengalikan luas permukaan dengan topografi wilayahnya. Volume bijih tembaga dapat diperkirakan, sehingga emas, perak, dan tanah jarang juga bisa diprediksi volumenya. Prediksi ini didukung oleh asosiasi tembaga dengan perak, emas, tanah jarang, uranium, dan lain-lain. Hal ini merupakan salah satu cara pendekatan dengan Penginderaan Jauh berdasarkan kunci interpretasi 'asosiasi'.

Prediksi potensi tembaga ini menggunakan model yang dibuat dari hasil korelasi parameter geologi dengan data penginderaan jauh terhadap tembaga. Model yang digunakan telah dilakukan uji ketelitian. Uji ketelitian (akurasi dan presisi) terhadap model ini menggunakan toleransi $<1.96\sigma$ (95 %), mengacu pada standar survei pemetaan ASPRS *Accuracy Data for Digital Geospatial Data* (ASPRS, 2014). Informasi geospasial potensi tembaga ini menggunakan skala 1:50.000.



Gambar 7. Informasi geospasial potensi awal Tembaga di Pulau Sumbawa. Tanda bintang merah adalah lokasi yang dijadikan model deteksi potensi tambang. Tanda bintang putih adalah potensi tembaga pada wilayah yang belum diketahui potensi/ditambang. Ketiga wilayah ini memiliki kemiripan/kesamaan nilai densitas.

DTM menggunakan skala 1:10.000, sedangkan parameter geologi lainnya dengan skala 1:25.000-1:100.000.

Gambar 7 menampilkan hasil korelasi berbagai parameter geologi sehingga dapat diprediksi potensi Tembaga yang ada di pulau Sumbawa. Prediksi awal, lokasi Tembaga terletak di tiga lokasi yaitu Batu Hijau, Elang Dodo, dan Sumbawa bagian utara. Prediksi ini bisa diaplikasikan ke wilayah lain dengan menggunakan nilai parameter gaya berat yang sama.

KESIMPULAN

Data Landsat, ALOS Palsar, dan satelit Geodesi dapat dimanfaatkan untuk pendeteksian awal potensi tembaga. Uji ketelitian (akurasi dan presisi) terhadap model ini menggunakan toleransi $<1,96\sigma$ (95 %), mengacu pada standar survei pemetaan ASPRS *Accuracy Data for Digital*

Geospatial Data. Informasi geospasial potensi tembaga ini menggunakan skala 1:50.000. Parameter geologi integrasi model tinggi menggunakan skala 1:10.000, sedangkan parameter geologi lainnya dengan skala 1:25.000-1:100.000.

Potensi tembaga ini dapat dideteksi dengan berbagai parameter geologi. Parameter geologi ini meliputi struktur geologi, model tinggi, gaya berat, medan magnet, densitas, penutup lahan, dan alterasi hidrotermal serta parameter lainnya. Parameter geologi yang dominan untuk deteksi potensi tembaga adalah model tinggi, struktur geologi, dan densitas. Nilai densitas tembaga pada model ini terletak dengan nilai sekitar $\rho=8960 \text{ kg/m}^3 + 1,96\sigma$ dan *Specific Gravity* ($S-G=8.9$). Kondisi ini berlaku pada $S-G=\rho_{\text{substance}}/\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ dimana $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ 4°C of 1000 kg/m^3 . Jika potensi tembaga sudah dapat dideteksi, terutama pada densitas yang ditetapkan maka potensi emas juga

dapat diprediksi. Hal ini berkaitan dengan konsep asosiasi tembaga dengan emas pada bijih yang sama.

Strategi dalam pendeteksian potensi tembaga dari penginderaan jauh adalah menyiapkan integrasi model tinggi berupa DTM dengan akurasi vertikal <1,5 m. Hal ini bertujuan untuk pembuatan struktur geologi yang lebih detail. Selain itu juga penentuan nilai densitas tembaga yang juga dipengaruhi oleh gaya berat dan geodinamika. Jika hal ini bisa disiapkan dengan baik maka akan efisien biaya dan efektif waktu sehingga uji akurasi berupa survei geologi hanya pada wilayah yang dideteksi potensi tembaga saja. Jika potensi tembaga ini sudah memenuhi toleransi maka akan berpengaruh juga pada pendeteksian potensi emas, perak, dan tanah jarang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih saya ucapkan kepada LAPAN, Universitas Gadjah Mada (UGM), DLR, USGS, *Alaska University*, dan ESA atas kesuksesan penelitian pada tahun 2012-2016 ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Amer, R., Kusky, T., and El Mezayen, A., 2012. Remote Sensing Detection of Gold Related Alteration Zones in Um Rus area, Central Eastern Desert of Egypt. *Advances in Space Research*, 49(1), 121-134.
- ASPRS. 2014. ASPRS Accuracy Standard for Digital Geospatial Data. ASPRS. Amerika Serikat.
- Bedini, E., 2011. Mineral Mapping in the Kap Simpson Complex, Central East Greenland, using HyMap and ASTER Remote Sensing Data. *Advances in Space Research*, 47(1), 60-73.
- Canty M.J., 2010. Image Analysis, Classification and Change Detection in Remote Sensing, With Algorithms for ENVI/IDL, Second edition. Taylor & Francis, CRC Press.
- Canty, M.J., and Nielsen, A.A., 2006. Visualization and Unsupervised Classification of Changes in Multispectral Satellite Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(18), 3961-3975.
- Canty, M.J., and Nielsen, A.A., 2008. Automatic Radiometric Normalization of Multitemporal Satellite Imagery with the Iteratively Re-Weighted MAD Transformation. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 1025-1036.
- Ciampalini, A., Garfagnoli, F., Antonielli, B., Moretti, S., and Righini, G., 2013. Remote Sensing Techniques using Landsat ETM+ Applied to the Detection of Iron Ore Deposits in Western Africa. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(11), 4529-4546.
- Desheng, Y., Gang, C., Xiaoping, L., 2010. Application of Geological Interpretation and Mineralization Information Extracting by Remote-Sensing in mineral Resource Evaluating. *Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science*, 29(2), 184-189.
- Ernowo dan Pardiarto, B., 2011. Aspek Geologi didalam penyusunan wilayah usaha pertambangan mineral logam. *Buletin Sumber Daya Geologi Volume 6 Nomor 2 Tahun 2011*. KESDM, Jakarta.
- Freedon, W. (Ed.). 2010. *Handbook of Geomathematics*. Springer Science & Business Media.
- Friasmar, R., 2016. Kondisi geologi Indonesia dan potensi mineral dan batubara.
- Gabr, S., Ghulam, A., Kusky, T., 2010. Detecting Areas of High-Potential Gold Mineralization using ASTER data. *Ore Geology Reviews*, 38(1), 59-69.
- Jin, H., Mountrakis, G., Stehman, S.V., 2014. Assessing Integration of Intensity, Polarimetric Scattering, Interferometric Coherence and Spatial Texture Metrics in PALSAR-Derived Land Cover Classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 98, 70-84.
- Julzarika, A., Susanto, dan Sutanto, A., 2013. Pengembangan Model Standar Pemanfaatan Data Penginderaan Jauh (Optik dan SAR) untuk Identifikasi Sumber Daya Mineral Tembaga. Laporan Penelitian Inhouse Tahun 2013. LAPAN. Jakarta.
- Julzarika, A., Tjahjaningsih, A., Sutanto, A., Nugroho, U.C., 2015. Pemanfaatan data penginderaan jauh untuk identifikasi

- tambang emas di Geumpang Aceh. Laporan penelitian inhouse 2015. LAPAN. Jakarta.
- Julzarika, A., 2015. Integration of Height Model using SRTM C, X SAR, Aster GDEM, and ALOS Palsar. Asian Conference on Remote Sensing.
- KESDM. 1999. Kepmentamben no 1519.K/20/MPE/1999. KESDM, Jakarta.
- KESDM. 2009. UU Minerba No.4 tahun 2009. KESDM, Jakarta.
- Leverington, D.W., Moon, W.M., 2012. Landsat-TM-Based Discrimination of Lithological Units Associated with the Purtuniqu Ophiolite, Quebec, Canada. *Remote Sensing*, 4(5), 1208-1231.
- Liu, L., Zhou, J., Yin, F., Feng, M., Zhang, B., 2013. The reconnaissance of mineral resources through ASTER data-based image processing, interpreting and ground inspection in the Jiafushaersu area, West Junggar, Xinjiang (China). *J. Earth Science*.
- Liu, L., Zhuang, D.F., Zhou, J., Qiu, D.S., 2011. Alteration Mineral Mapping using Masking and Crosta Technique for Mineral Exploration in Mid-Vegetated Areas: A Case Study in Areletuobie, Xinjiang (China). *International Journal of Remote Sensing*, 32(7), 1931-1944.
- Maryono, A., Setijadji, L.D., Arif, J., Harrison, R., 2014. Gold, Silver, and Copper Metallogeny of the Eastern Sunda Magmatic Arc Indonesia. *Majalah Geologi Indonesia* 29 (2), 85-99
- Nielsen, A.A., 2010. Kernel Maximum Autocorrelation Factor and Minimum Noise Fraction Transformations. *IEEE Transactions on Image Processing* 20 (3).
- Peters, S.G., King, T.V., Mack, T.J., Chornack, M. P., 2011. Summaries of Important Areas for Mineral Investment and Production Opportunities of Nonfuel Minerals in Afghanistan (No. 2011-1204). US Geological Survey.
- Prasad, K., Prabhu, G.K., 2011. Diag-AID: A Diagnostic Aid for Medical Image Enhancement using Colour Coding and Modified Histogram Equalisation Techniques. *International Journal of Medical Engineering and Informatics*, 3(3), 223-233.
- Qin, Y.Z., Liu, L.M., 2010. Extraction of Information on Structure, Rock and Alteration by ETM+ Remote Sensing at West Beishan Mountain, Gansu Province. *Southern Metals*, 6, 009.
- Rajendran, S., Nasir, S., Kusky, T.M., Ghulam, A., Gabr, S., El-Ghali, M.A., 2013. Detection of Hydrothermal Mineralized Zones Associated with Listwaenites in Central Oman using ASTER Data. *Ore Geology Reviews*, 53, 470-488.
- Radke, R. J., Andra, S., Al-Kofahi, O., Roysam, B., 2005. Image Change Detection Algorithms: a Systematic Survey. *IEEE Transactions on Image Processing*, 14(3), 294-307.
- Sabins, F.F., 1999. Remote Sensing for Mineral Exploration. *Ore Geology Reviews*, 14(3), 157-183.
- Schimmer, R., 2008. A Remote Sensing and GIS Method for Detecting Land Surface Areas Covered by Copper Mill Tailings. Pecora 17-The Future of Land Imaging. Denver, Colorado.
- Schölkopf, B., Smola, A., Müller, K.R., 1998. Nonlinear Component Analysis as a Kernel Eigenvalue Problem. *Neural Computation*, 10(5), 1299-1319.
- Schroeder, T.A., Cohen, W.B., Song, C., Canty, M.J., Yang, Z., 2006. Radiometric Correction of Multi-Temporal Landsat Data for Characterization of Early Successional Forest Patterns in Western Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 103(1), 16-26.
- Seigel, H.O., Brcic, I., Mistry, P., 1995. A Guide to High Precision Land Gravimeter Surveys. Scintrex Limited, 222.
- Shen, P., Shen, Y.C., Liu, T.B., Pan, H.D., Meng, L., Song, G.X., Dai, H.W., 2010. Discovery of the Xiemisitai Copper Deposit in Western Junggar, Xinjiang and its Geological Significance. *Xinjiang Geology*, 28(4), 413-418.
- USGS. 2010. Porphyry Copper Deposit Model. Scientific Investigations Report 2010-5070-B. USGS. Amerika Serikat.

- Wu L., 2011. The Geological Structure and Mineral Resources of Thailand J. Mineral Deposits.
- Youssef, A.M., Pradhan, B., Sabtan, A.A., El-Harbi, H. M., 2012. Coupling of Remote Sensing Data Aided with Field Investigations for Geological Hazards Assessment in Jazan Area, Kingdom of Saudi Arabia. Environmental Earth Sciences, 65(1), 119-130.
- Zhou, J., Liu, L., Jiang, D., Zhuang, D., Mansaray L.R., Zhang B., 2013. Targeting Mineral Resources with Remote Sensing and Field Data in the Xiemisitai Area, West Junggar, Xinjiang, China. Journal Remote Sensing, 5(7), 3156-3171.