



## Aplikasi Principle Component Analysis dan Directed Principal Component untuk Pemetaan Alterasi Hidrotermal menggunakan Citra ASTER di Kecamatan Kokap, Kulon Progo

### *Application of Principle Component Analysis and Directed Principal Component in the Mapping of Hydrothermal Alteration using ASTER Image in Kokap Sub-District, Kulon Progo*

Bayu Raharja<sup>1,2</sup>, Agung Setianto<sup>2</sup>, dan Anastasia Dewi Titisari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, Kementerian ESDM, Jl. Dr. Soepomo No.10, Tebet, Jakarta Selatan

<sup>2</sup>Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta

e-mail : [bayu.raharja@esdm.go.id](mailto:bayu.raharja@esdm.go.id)

Naskah diterima : 29 November 2019, Revisi terakhir : 26 Mei 2019 Disetujui : 12 Juni 2019, Online : 13 Juni 2019

DOI: 10.33332/jgsm.2019.v20.3.119-131

**Abstrak-** Endapan emas di daerah Kokap, Kabupaten Kulon Progo yang berasosiasi dengan endapan tipe epitermal terbentuk akibat adanya proses alterasi hidrotermal. Pemanfaatan data penginderaan jauh untuk pemetaan alterasi telah berhasil dilakukan diberbagai lokasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji akurasi citra ASTER saluran *visible near infrared* (VNIR) dan saluran *shortwave infrared* (SWIR) dalam memetakan jenis alterasi menggunakan metode *principle component analysis* (PCA) dan *directed principal component* (DPC). Klasifikasi multispektral dilakukan untuk membedakan tipe alterasi hidrotermal menggunakan kombinasi saluran hasil PCA dan DPC. Keberhasilan pemetaan alterasi hidrotermal dievaluasi secara statistik menggunakan *confusion matrix*. Tingkat akurasi yang dapat diterima adalah sebesar 85% dengan koefisien *kappa* lebih besar dari 0.8. Hasil penelitian menunjukkan metode PCA dan DPC tidak berhasil dalam memetakan tipe alterasi di lokasi penelitian karena tingkat akurasi keduanya di bawah batas yang ditentukan. DPC memiliki akurasi 49% dengan *kappa* 0.29 lebih baik dari PCA (akurasi 47%, *kappa* 0.33). Saluran ASTER yang paling baik digunakan untuk memetakan tipe alterasi hidrotermal di lokasi penelitian adalah 1, 2, 4, dan 6.

**Katakunci** : alterasi hidrotermal, ASTER, PCA, DPC, klasifikasi multispektral

**Abstract-** Gold deposits in the Kokap area, Kulon Progo Regency are associated with epithermal deposits which formed due to the presence of hydrothermal alteration processes. The use of remote sensing data for alteration mapping has been successfully carried out in various locations. This study aims to assess the accuracy of visible near infrared (VNIR) and shortwave infrared (SWIR) bands of ASTER in alteration mapping using principle component analysis (PCA) and directed principal component (DPC) methods. Multispectral classification is then performed to distinguish the type of hydrothermal alteration using a combination of the PCA and DPC bands. The success of hydrothermal alteration mapping is evaluated statistically using confusion matrix. The acceptable level of accuracy is 85% with a kappa coefficient greater than 0.8. The results showed that the PCA and DPC failed to mapped hydrothermal alteration in the study area since the accuracy of both methods was below the the acceptance standard. DPC method had better accuracy (accuracy 49%, kappa 0.29) than PCA (accuracy 47%, kappa 0.33). The best ASTER bands for mapping hydrothermal alteration in the study area are 1, 2, 4, and 6.

**Keywords** : hydrothermal alteration, ASTER, PCA, DPC, multispectral classification

## PENDAHULUAN

### Latar belakang

Proses magmatik aktif berumur Tersier yang terjadi di Pulau Jawa akan membentuk terjadinya proses alterasi hidrotermal. Alterasi hidrotermal yang membawa mineralisasi telah banyak ditemukan di Pulau Jawa, misalnya endapan emas di Cibaliung, Pongkor, Jatibarang, Kulo Progo, Pacitan, dan Jember (Setijadji *et al.*, 2006; Setijadji dan Maryono, 2012). Penggunaan aplikasi penginderaan jauh (*remote sensing*) dalam pemetaan alterasi hidrotermal mengalami kemajuan pesat. Bedell (2001) menyatakan saluran *visible* sangat baik untuk pemetaan vegetasi dan mineral *iron-oxide* di permukaan tanah. Saluran *short wave* baik untuk pemetaan tanah dan litologi berdasarkan karakteristiknya yang baik dalam absorpsi *phyllosilicates* dan mineral-mineral karbonat, sedangkan saluran thermal baik untuk membedakan batuan silikat (Yamaguchi & Naito, 2003).

Ada beberapa hal yang harus diperhatikan ketika menggunakan data penginderaan jauh untuk pemetaan mineralogy regional. Pertama gangguan sensor dalam merekam permukaan bumi akibat efek awan, vegetasi, dan atmosfer. Kedua, metode seperti band ratio, *principle component analysis* (PCA), dan *directed principal component* (DPC) tidak mengindikasikan keterdapat mineral secara kuantitatif, hanya sebatas indikasi potensi sehingga tetap harus dilakukan validasi lapangan. Ketiga, setiap lokasi memiliki karakter berbeda sehingga metode untuk mineral *assemblage* yang baik digunakan pada lokasi A belum tentu baik digunakan pada lokasi B. Oleh karenanya, penggunaan data penginderaan jauh harus didukung data lain seperti peta geologi dan struktur, geokimia, geofisika dan lain-lain (Kalinowski & Oliver, 2004).

Di Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, penelitian tentang alterasi hidrotermal yang membawa mineralisasi emas telah dilakukan seperti oleh Harjanto (2008), Nugraha (2015), Sulthoni (2017), Pambudi (2017), dan Pramumijoyo (2017). Semua memberikan hasil bahwa pada daerah Kulon Progo, khususnya Sangon, Plampang, Gunung Agung dan Gunung Ijo, terdapat potensi emas yang berasosiasi dengan tipe endapan epitermal. Beberapa tipe alterasi hidrotermal berhasil dipetakan antara lain propilitik, argilik, argilik lanjut, filik, dan silisifikasi. Secara umum penelitian sebaran alterasi hidrotermal yang membawa

mineralisasi dilakukan dengan pengambilan sampel di lapangan dan dilanjutkan dengan analisis di laboratorium. Oleh sebab itu, perlu penelitian tentang akurasi data penginderaan jauh dalam memetakan alterasi hidrotermal. Diharapkan kegiatan eksplorasi mineral dengan memanfaatkan teknologi penginderaan jauh dapat memberikan kontribusi lebih dan mengurangi persentase pekerjaan di lapangan.

### Permasalahan

Penelitian ini dilakukan berdasarkan beberapa permasalahan yang dirumuskan dari latar belakang yaitu:

1. Mampukah saluran VNIR dan SWIR citra ASTER digunakan untuk memetakan alterasi hidrotermal di lokasi penelitian?
2. Metode manakah (diantara PCA dan DPC) serta kombinasi saluran ASTER manakah yang paling baik akurasinya dalam memetakan jenis alterasi hidrotermal di lokasi penelitian?

### Maksud dan Tujuan

Maksud penelitian ini adalah untuk mengkaji akurasi citra ASTER dalam memetakan alterasi hidrotermal. Tujuannya adalah untuk mengetahui kombinasi terbaik saluran ASTER dalam memetakan tipe alterasi hidrotermal melalui analisis citra penginderaan jauh dengan metode PCA dan DPC berdasarkan akurasinya. Selanjutnya dari penelitian ini juga dapat diketahui metode manakah antara PCA dan DPC yang lebih baik akurasinya dalam memetakan jenis alterasi tersebut.

### Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian mencakup Kecamatan Kokap dan sekitarnya, Kabupaten Kulon Progo, (Gambar 1). Secara geografi, daerah penelitian dibatasi oleh 4 titik koordinat yaitu (1) 110,08017° BT, 7,78103° LS; (2) 110,1511° BT, 7,7919° LS; (3) 110,1133° BT, 7,8756° LS; dan (4) 110,0383° BT, 7,867° LS, dihubungkan dengan garis lurus membentuk poligon tertutup dengan luas ± 80 km<sup>2</sup>.

### Geologi Umum

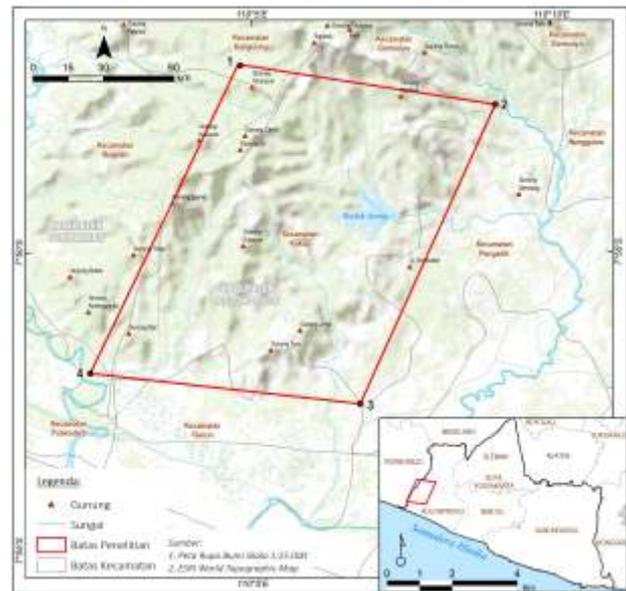
Pegunungan Kulon Progo menyerupai kubah besar (*Oblong Dome*), berarah baratdaya-timurlaut sepanjang 32 km dengan lebar 20 km yang terbentuk akibat peristiwa tektonik uplift. Kubah ini tersusun atas

material gunungapi andesit tua berumur Oligosen – Miosen, yaitu Gunung Gajah, Gunung Ijo, dan Gunung Menoreh (Van Bemmelen, 1949). Menurut Suroso *et al.* (1986) Gunung Gajah pada bagian tengah *dome* tersebut terbentuk pertama kali dan menghasilkan andesit augit basaltik. Selanjutnya, pada bagian selatan terbentuk Gunung Ijo yang menghasilkan andesit piroksen basaltik, kemudian andesit augit hornblenda, serta intrusi dasit pada tahap terakhir (Suroso *et al.*, 1986). Gunung Menoreh terbentuk paling akhir di bagian utara setelah aktivitas Gunung Gajah berhenti dan mengalami denudasi (Van Bemmelen, 1949), menghasilkan andesit augit hornblenda, intrusi dasit dan terakhir intrusi andesit (Suroso *et al.*, 1986).

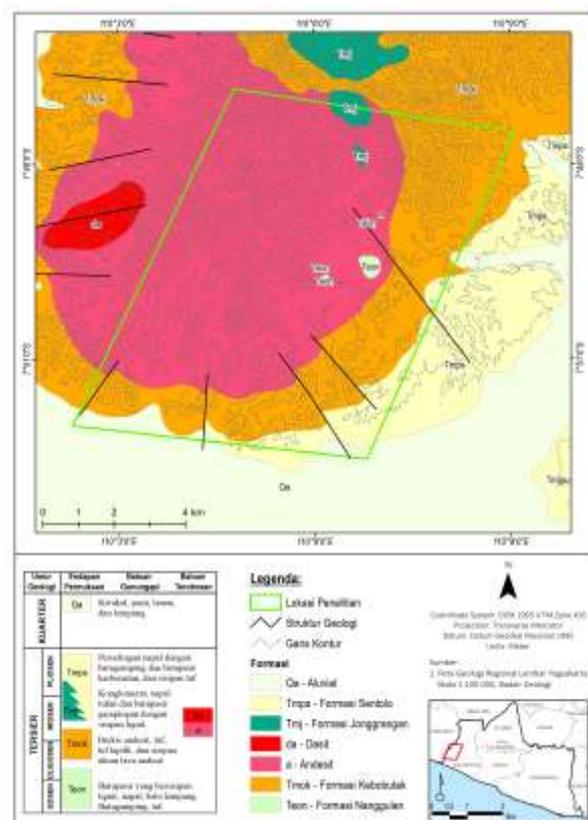
Berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Yogyakarta 1408-2 dan 1407-5 (Gambar 2), lokasi penelitian sebagian besar terletak kompleks batuan intrusi berumur Oligosen hingga Miosen, berupa intrusi andesit (a). Intrusi ini yang menerobos Formasi Nanggulan (Teon) dan Formasi Kebobotak (Tmok). Selain itu, terdapat struktur-struktur geologi yang merupakan hasil gabungan dari vulkanisme dan proses sekunder (Widagdo *et al.*, 2016). Struktur geologi ini merupakan celah bagi sirkulasi fluida hidrotermal yang membawa mineralisasi (Pramumijoyo, 2017).

Menurut studi Widagdo *et al.* (2016) kelurusan yang berkembang pada Pegunungan Kulon Progo sebagai berikut:

- (1) Kelurusan dengan arah baratlaut-tenggara merupakan hasil vulkanisme Gunung Gajah berkembang pada bagian tengah dan selatan.
- (2) Kelurusan struktur dengan arah baratlaut-tenggara berkembang di bagian selatan pada tubuh Gunung Ijo. Pada bagian baratlaut Gunung Ijo kelurusan berubah arah menjadi arah barat-timur.
- (3) Kelurusan dengan arah utara-selatan berkembang pada bagian utara, barat, dan selatan Pegunungan Kulon Progo digambarkan sebagai sesar mendatar sinistral.
- (4) Kelurusan yang menunjukkan adanya sesar dengan pergerakan sinistral berkembang di bagian utara pada kompleks Gunung Menoreh.



Gambar 1. Lokasi Penelitian (dalam kotak merah).



(Sumber: Rahardjo dkk., 1995)

Gambar 2. Peta Geologi Regional Lembar Yogyakarta.

### Alterasi Hidrotermal Daerah Kokap

Pemetaan jenis alterasi hidrotermal pernah dilakukan sebelumnya oleh Harjanto (2008), Nugraha (2015), Sulthoni (2017), Pambudi (2017), dan Pramumijoyo (2017). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada daerah Kulon Progo, khususnya Sangon, Kokap, Gunung Agung dan Gunung Ijo, terdapat potensi emas berasosiasi dengan tipe endapan epitermal. Jenis alterasi dapat dikelompokkan kedalam 4 macam alterasi yaitu silisifikasi, argilik lanjut, argilik, dan propilitik dengan mineral penciri alterasi berbeda beda (Tabel 1).

Tabel 1. Tipe alterasi dan mineral pencirinya

Tipe Alterasi	Mineral Penciri
Propilitik	Klorit, epidot, albit, kalsit
Argilik	Montmorilonit
Argilik Lanjut	Dickite, kaolinit
Silisifikasi	Kuarsa, ilit, muscovite

Sumber: Harjanto (2008), Nugraha (2015), Sulthoni (2017), Pambudi (2017), dan Pramumijoyo (2017)

### METODOLOGI

#### Pengolahan Citra Digital

Citra satelit yang digunakan dalam penelitian ini adalah citra ASTER hasil perekaman tanggal 9 September 2003 dengan resolusi radiometrik 8-bit. Saluran (*band*) yang digunakan adalah saluran *visible near infrared* (VNIR) dan *shortwave infrared* (SWIR). Saluran *thermal infrared* (TIR) tidak digunakan pada penelitian ini. Citra tersebut telah terkoreksi geometrik, sehingga lokasi objek pada citra sudah terproyeksi dengan baik pada referensi koordinat UTM zona 49S, namun belum terkoreksi radiometrik sistematis, sehingga nilai piksel citra (*digital number*) perlu dikalibrasi. Selanjutnya, nilai *digital number* (DN) dikonversi ke sensor *spectral radiance* untuk mengkalibrasi sensor berdasarkan koefisien pada *header* (metadata) citra (Wicaksono & Danoedoro, 2012).

Langkah selanjutnya, nilai *spectral radiance* di konversi ke *top of atmospheric* (TOA) reflektansi dan dilanjutkan dengan koreksi atmosferik menggunakan metode FLAASH (*fast line-of-sight atmospheric analysis of hypercubes*). Koreksi atmosferik bertujuan untuk menghilangkan pengaruh unsur-unsur dan molekul di atmosfer sehingga nilai radian atau pantulan mendekati nilai sebenarnya (*surface reflectance*; Vermote *et al.*, 2002). Proses *masking* dilakukan untuk menampilkan citra hanya pada batas penelitian dan

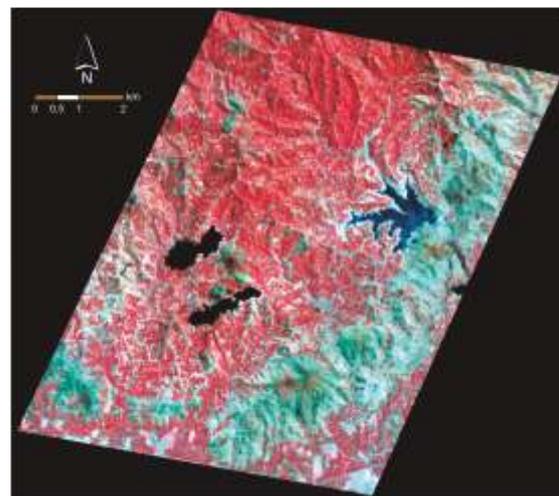
menghilangkan objek lain seperti laut dan awan karena akan mengganggu dalam proses PCA dan DPC (Gambar 3). Nilai statistik citra ASTER setelah proses *masking* dapat dilihat pada Tabel 2.

#### Penginderaan Jauh untuk Identifikasi Mineral

Pemetaan alterasi hidrotermal dilakukan dengan mineral penciri alterasi seperti kuarsa, kaolinit, epidot, illit, klorit, montmorillonit, alunite, muskovit (serisit) dan mineral lempung lainnya. Saluran VNIR dan SWIR dalam citra ASTER dianggap sebagai saluran yang dapat membedakan jenis mineral dari karakteristik pantulan spektralnya. Berdasarkan perbedaan respon spektral masing-masing mineral terhadap saluran-saluran pada citra ASTER, maka dapat disusun algoritma untuk menonjolkan mineral tertentu dan meminimalkan respon spektral objek lainnya. Beberapa algoritma yang sering digunakan adalah *band ratio*, *principle component analysis*, dan *directed principal component* (Abram *et al.*, 1977; Taranik & Crosta, 1996; Carranza, 2002).

Tabel 2. Statistik citra ASTER setelah *masking* (DN dalam satuan reflectance)

	Saluran	Min	Max	Mean	Stdev
VNIR	Saluran 1	0.0	0.382	0.032	0.029
	Saluran 2	0.0	0.421	0.056	0.050
	Saluran 3	0.0	0.465	0.140	0.117
	Saluran 4	0.0	0.437	0.120	0.102
	Saluran 5	0.0	0.253	0.046	0.042
SWIR	Saluran 6	0.0	0.290	0.050	0.046
	Saluran 7	0.0	0.270	0.046	0.042
	Saluran 8	0.0	0.224	0.031	0.030
	Saluran 9	0.0	0.142	0.014	0.016



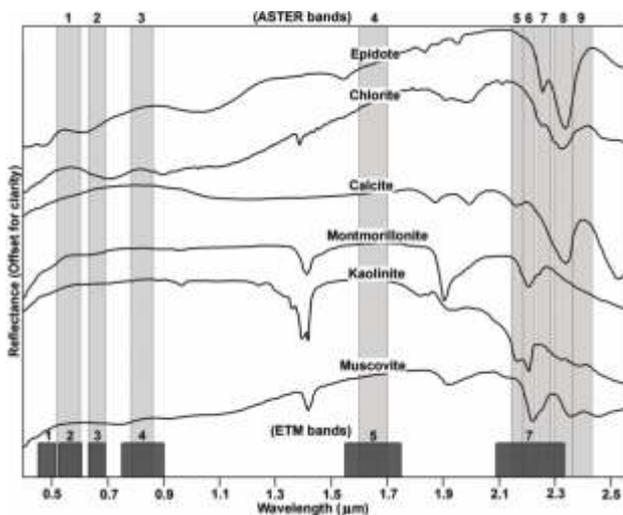
Gambar 3. Citra ASTER (RGB: 321) setelah proses *masking*.

Penting untuk memahami pantulan spektral (*reflectance*) dari mineral penciri alterasi (Gambar 4). Sebagai contoh mineral epidot memiliki pantulan spektral tinggi pada saluran 5 ASTER dan pantulan spektral rendah pada saluran 8 ASTER. Kaolinit memiliki respon spektral paling baik jika ditangkap menggunakan ASTER saluran 4 dan saluran 7 serta memiliki respon rendah pada ASTER saluran 6.

Permasalahan yang umum ditemui pada pemetaan mineral dan litologi pada daerah dengan kerapatan vegetasi tinggi adalah membedakan respon kedua unsur ini. Vegetasi dan mineral sama-sama merespon baik pada panjang gelombang inframerah. Apabila tutupan vegetasi tinggi, bisa dipastikan respon spektral yang ditangkap sensor citra satelit adalah DN vegetasi, dan bukan DN mineral atau litologi.

### Principle Component Analysis (PCA)

PCA merupakan suatu proses transformasi saluran spektral pada citra dengan bertujuan untuk mengurangi data *redundancy*. Hasil dari transformasi PCA adalah saluran-saluran PC yang tidak saling berkorelasi. PC1 akan berisi data dengan persentase varian paling besar, PC2 mengandung persentase varian terbesar kedua, dan begitu seterusnya hingga PC terakhir hanya akan berisi gangguan (*noise*; Gasmi *et al.*, 2016; Murti & Wicaksono, 2014). Input dari PCA adalah data statistik citra yang berupa rata-rata (*mean*), standar deviasi, variansi, kovarian, dan korelasi dari saluran-saluran masukan. Statistik tersebut nantinya akan disusun menjadi matriks yang digunakan untuk mendapatkan nilai *eigenvector* dan *eigenvalue* untuk merotasikan data asli (Smith, 2005; Murti & Wicaksono, 2014).



Sumber: Livo, *et al.*, (1993)

**Gambar 4.** *Spectral library* dari beberapa mineral penciri alterasi hidrotermal.

Teknik ini telah sukses diterapkan oleh peneliti diberbagai lokasi untuk memetakan alterasi hidrotermal (Bastianelli *et al.*, 1993; Davidson *et al.*, 1993; Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1998, Souza Filho & Drury, 1998; Tangestani & Moore, 2002, Carranza & Hale 2002; Crosta *et al.*, 2003). Kombinasi PCA untuk memetakan beberapa mineral penciri alterasi dirangkum pada Tabel 3.

PCA digunakan untuk mengetahui kontribusi tiap saluran spektral serta kombinasi saluran spektral dalam mengidentifikasi kelimpahan mineral penciri alterasi. PCA akan merotasi data dari tiap saluran spektral citra ASTER dan menghasilkan data baru yang lebih sederhana dan unik sehingga lebih mudah dalam interpretasi. Penelitian ini menggunakan kombinasi input saluran yang berbeda-beda untuk menonjolkan kelimpahan mineral-mineral penciri alterasi seperti alunit, illit, dan kaolinit. Pemilihan saluran sebagai input PCA didasarkan pada respon spektral tiap saluran ASTER terhadap mineral yang dicari (Tabel 3). Dengan membatasi jumlah saluran input PCA diharapkan informasi yang dihasilkan akan lebih menggambarkan kelimpahan dari mineral penciri alterasi yang dicari. Matriks yang digunakan dalam perhitungan PCA adalah matriks kovariansi. Hasil PC yang mengandung target mineral akan memiliki nilai *eigenvector loading* tinggi.

**Tabel 3.** Kombinasi saluran PCA untuk pemetaan mineral alterasi

Target	Kombinasi ASTER
<i>Alunite</i>	1-3-5-7
<i>Illite</i>	1-3-5-6
<i>Kaolinite + smectite</i>	1-4-6-9
<i>Kaolinite</i>	1-4-6-7
<i>Limonitic alteration zone</i>	1-3-4-5
<i>Clay alteration zone</i>	1-3-4-7

### Directed Principal Component (DPC)

Fraser & Green (1987) menggabungkan teknik analisis citra berdasarkan analisis principal component dan kalkulasi *band ratio* (disebut sebagai software *defoliant technique*). Pada dasarnya software *defoliant technique* adalah sebuah analisis *directed principal component* (DPC) dari dua citra *band ratio*. Input *band ratio* pertama harus mengandung informasi yang diinginkan (misalnya mineral penciri alterasi hidrotermal), dimana respon spektralnya mengalami gangguan dari respon spektral komponen lain (misalnya vegetasi). *Band ratio* kedua harus berisi informasi tentang komponen spektral yang mengganggu ini (Carranza, 2002).

Pada prinsipnya proses DPC pada penelitian ini sama

dengan proses PCA. Perbedaan mendasar DPC dibandingkan PCA adalah input DPC menggunakan 2 (dua) saluran hasil kalkulasi *band ratio*. *Band ratio* digunakan untuk lebih menonjolkan kelimpahan mineral yang dicari. Matriks yang digunakan dalam perhitungan DPC juga menggunakan matriks kovariansi sehingga hasilnya dapat dibandingkan dengan hasil PCA.

Beberapa kombinasi DPC yang telah sukses digunakan oleh peneliti sebelumnya dan digunakan dalam penelitian ini dirangkum pada Tabel 4 berikut.

**Tabel 4.** Kombinasi saluran DPC untuk pemetaan mineral alterasi

Target	Kombinasi ASTER
<i>Limonitic alteration</i>	2/1; 3/1
<i>Clay Alteration</i>	3/2; 4/6
<i>Quartz</i>	1/2; 6/2
<i>Alunite</i>	1/2; 4/1
<i>Illite</i>	3/1; 6/1
<i>Chlorite</i>	3/1; 4/1
<i>Epidote</i>	3/1; 4/6

### Klasifikasi Multispektral

Salah satu cara umum untuk mengelompokkan piksel-piksel dengan kemiripan karakteristik adalah menggunakan teknik *per-pixel analysis* (PPA) atau sering disebut *per-pixel classification*. Cara ini mengasumsikan bahwa tiap objek di permukaan bumi memiliki pantulan spektral berbeda-beda, sehingga dapat dikelompokkan berdasarkan nilai spektralnya. Klasifikasi ini dapat dibagi menjadi klasifikasi *supervised* (terselia) dan *unsupervised* (tak terselia) (Richards, 1999; Danoedoro, 2012). Dalam penelitian ini digunakan klasifikasi terselia dengan algoritma *maximum-likelihood*. *Maximum Likelihood* adalah salah satu teknik yang digunakan dalam penaksiran suatu parameter distribusi data dan tetap dominan dipakai dalam pengembangan uji-uji baru (Lehmann & Casella, 1998).

### Confusion Matrix

Keberhasilan klasifikasi pemetaan alterasi dengan data penginderaan jauh diukur secara kuantitatif menggunakan analisis Kappa. Analisis Kappa adalah teknik multivariat diskrit yang digunakan dalam penilaian akurasi untuk menentukan secara statistik apakah kesalahan satu matriks berbeda secara signifikan dengan matriks lain (Bishop *et al.*, 1975). Hasil analisis Kappa adalah statistik KHAT (atau K, perkiraan Kappa), yang merupakan ukuran lain dari

kesepakatan atau akurasi (Cohen, 1960). Ukuran akurasi ini didasarkan atas perbedaan antara kesepakatan sebenarnya dalam matriks kesalahan (yaitu, kecocokan antara klasifikasi penginderaan jauh dan data referensi uji akurasi) dan perjanjian peluang. Dengan cara ini, statistik KHAT sebenarnya mirip dengan analisis *chi-square* (Carranza, 2002). Rumus untuk menghitung keseluruhan akurasi klasifikasi, statistik-khat dan statistik-Z dapat ditemukan di Cohen (1960), Bishop *et al.*, (1975), atau Congalton & Green (1999) dan tidak diulang disini.

Tingkat akurasi keseluruhan yang dapat diterima adalah sebesar 85% (Anderson *et al.*, 1976). Statistik *khat* (estimasi koefisien kesesuaian, kappa) adalah ukuran kesesuaian antara hasil klasifikasi dan data referensi. Tingkat kecocokan atau kesesuaian antara hasil klasifikasi dan data referensi tergantung pada kisaran nilai *khat* (Landis & Koch, 1977). Nilai-nilai *Khat* lebih besar dari 0,8 artinya memiliki tingkat kesesuaian tinggi, nilai antara 0,4 dan 0,8 merupakan tingkat kesesuaian menengah, dan nilai di bawah 0,4 merupakan tingkat kesesuaian rendah atau buruk (Congalton & Green, 1999; Carranza, 2002).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil PCA dan DPC

Hasil analisis PCA dan DPC adalah *eigenvector loadings*. Nilai *eigenvector loadings* tinggi menunjukkan informasi dari keterdapatannya target mineral. Tanda positif (+) dan negatif (-) pada *eigenvector* menunjukkan tingkat kecerahan rona pada citra hasil PC. Apabila nilai *eigenvector* pada hasil PC tinggi dan negatif (-), maka piksel dengan nilai spektral mineral yang diinginkan akan memiliki nilai digital number (DN) rendah (berwarna gelap) begitu pula sebaliknya.

Beberapa kombinasi input PCA dilakukan untuk mendapatkan sebaran mineral penciri alterasi (Tabel 3). Kombinasi PCA dari saluran 1-4-6-7 digunakan untuk memetakan mineral kaolinit. Hasil PC menunjukkan bahwa kaolinit memiliki reflektan tinggi pada saluran 1 (nilai *loading* 0.92), saluran 4 (nilai *loading* 0.78) dan saluran 7 (nilai *loading* 0.71) serta memiliki absorpsi tinggi pada saluran 6 (nilai *loading* -0.7). Dengan demikian kaolinit akan dipresentasikan pada kombinasi PCA 1-4-6-7 dengan nilai DN terang pada PC1 dan PC3, serta DN gelap pada PC2 dan PC4. PC 3 dipilih untuk menampilkan kelimpahan mineral kaolinit dengan nilai *loading* tertinggi 0.92 dan terendah -0.24. PC 3

mengandung 2% dari total varian data spektral. PC4 sebenarnya juga memiliki nilai *loading* tinggi dan positif (0.71) serta tinggi dan negatif (-0.70) sehingga baik untuk pemetaan kaolinit. Namun PC4 tidak digunakan karena mengandung banyak gangguan (*noise*).

Mineral illit memiliki nilai reflektan tinggi pada saluran 1, 3, dan 5 serta menyerap baik pada saluran 6. PCA dengan kombinasi 1-3-5-6 digunakan untuk memetakan mineral illit. Hasil PC 1-3-5-6 memiliki negatif *loading* pada seluruh saluran PC1 dengan nilai absorpsi paling tinggi terdapat pada saluran 3 dengan nilai *loading* -0.84. PC3 menunjukkan nilai *loading* tinggi dan positif (0.92) untuk saluran 1 dan negatif *loading* untuk saluran 3, saluran 5, dan saluran 6. PC4 menunjukkan nilai *loading* tinggi dan negatif (-0.73) pada saluran 5 serta tinggi dan positif pada saluran 6 (0.68). Secara teori, hasil *loading* terbaik adalah PC4, namun karena PC4 banyak mengandung *noise*, maka pemetaan kelimpahan illit menggunakan PC3 yang mengandung 2% dari total varian data spektral.

PC 1-3-5-7 digunakan untuk memetakan mineral alunit. Alunit memiliki respon spektral baik pada saluran 1 dan saluran 3 serta menyerap baik pada saluran 5 dan saluran 7. PC3 memiliki nilai *loading* tinggi dan negatif (-0.79) untuk saluran 1 serta tinggi positif (0.59) untuk saluran 3. Mineral alunit akan ditampilkan dengan DN gelap pada PC3, sehingga untuk menampilkan alunit dengan DN terang, PC3 perlu dinegatifkan (dikalikan -1). Alunit pada PC3 mengandung 2% dari total varian data. PC4 memiliki nilai *loading* tinggi negatif (-0.71) untuk saluran 5 dan tinggi positif (0.70) pada saluran 7. PC4 ini juga mengandung banyak *noise* seperti kombinasi PC sebelumnya, sehingga tidak digunakan.

Beberapa kombinasi DPC dilakukan untuk memetakan mineral kuarsa, alunit, illit, klorit, dan epidot dengan menggunakan kombinasi pada Tabel 4. Kuarsa dipetakan dengan kombinasi PC dari band1/band2 dan band6/band2 dengan pertimbangan bahwa kuarsa memiliki nilai reflektan tinggi pada saluran tersebut sedangkan vegetasi memiliki pantulan reflektan rendah pada saluran tersebut. Kombinasi DPC lainnya menggunakan konsep sama yaitu dengan mencari perpaduan saluran dengan reflektasi tinggi untuk mineral yang akan dipetakan dan kombinasi saluran dengan respon lemah pada vegetasi.

DPC1 untuk kuarsa, alunit, klorit, dan epidot keduanya bernilai negatif, sedangkan DPC1 illit keduanya bernilai positif. DPC2 memiliki nilai rentang *loading* lebih besar yakni dari nilai positif ke nilai negatif. Karena nilai *loading* terbesar DPC2 untuk kuarsa (-0.72), alunit (-0.89), klorit (-0.94), dan epidot (-0.87) bernilai negatif

sehingga akan dipresentasikan dengan DN gelap. Untuk menampilkan dalam DN terang, DPC2 perlu dinegatifkan (dikalikan -1). Hal ini tidak dilakukan pada DPC2 mineral illit karena memiliki nilai *loading* tinggi dan positif (0.94) sehingga illit sudah direpresentasikan dengan nilai DN terang.

Hasil PCA dan DPC terpilih dan digunakan untuk menampilkan sebaran mineral penciri alterasi ditandai dengan angka "tebal" pada Tabel 5 dan Tabel 6. Citra hasil PCA dan DPC disajikan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Perhitungan indeks vegetasi dengan algoritma NDVI (*normalized difference vegetation index*) dilakukan untuk mengetahui tingkat kerapatan vegetasi di lokasi penelitian (Gambar 6 f). Seperti diuraikan sebelumnya bahwa unsur vegetasi dan geologi (mineral dan litologi) keduanya sama-sama baik dipetakan dengan menggunakan panjang gelombang inframerah dan seringkali sulit membedakan nilai reflektan antara keduanya.

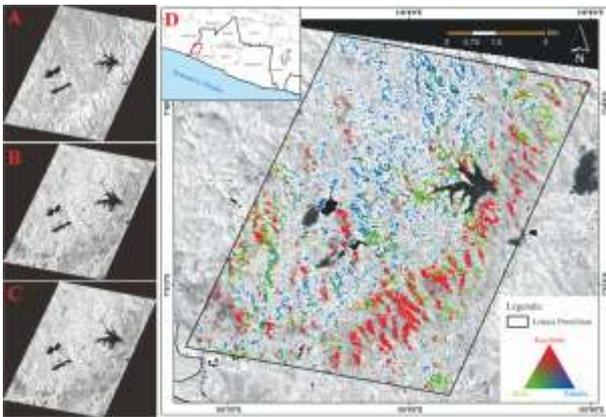
Pada hasil PCA terlihat bahwa kelimpahan mineral illit dan alunit (Gambar 5 A dan B) berada pada lokasi dengan sebaran vegetasi dengan kerapatan tinggi pada citra NDVI. Hal ini menjadikan hasil PCA kurang baik karena gangguan dari vegetasi. Hasil DPC juga menunjukkan kondisi serupa untuk mineral kuarsa, alunit, dan epidot (Gambar 6 a, b, c). Kelimpahan mineral-mineral ini secara spasial terletak pada sebaran vegetasi dengan kerapatan tinggi pada citra NDVI (Gambar 6 f). Karena metode penajaman kontras dengan memilih *eigenvector loading* terbaik dari PCA dan DPC kurang berhasil menonjolkan kelimpahan mineral penciri alterasi, maka dilakukan klasifikasi multispektral untuk memetakan tipe alterasi dengan kombinasi saluran hasil PC.

Tabel5. *Eigenvector loadings* hasil PCA

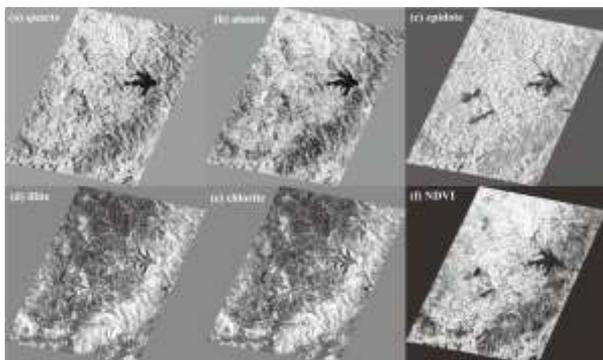
	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	Mineral Alterasi
Saluran 1	0.37	-0.12	<b>0.92</b>	0.01	Kaolinit
Saluran 4	0.78	0.58	<b>-0.24</b>	0.01	
Saluran 6	0.37	-0.57	-0.21	-0.70	
Saluran 7	0.35	-0.57	-0.22	0.71	
<i>Eigen values</i> (%)	94%	3%	2%	1%	
Saluran 1	-0.34	-0.20	<b>0.92</b>	0.00	Illit
Saluran 3	-0.84	0.51	-0.20	0.00	
Saluran 5	-0.29	-0.57	-0.23	-0.73	
Saluran 6	-0.32	-0.61	<b>-0.25</b>	0.68	
<i>Eigen values</i> (%)	92%	6%	2%	0%	
Saluran 1	0.50	0.35	<b>-0.79</b>	0.00	Alunit
Saluran 3	0.49	0.64	<b>0.59</b>	0.02	
Saluran 5	0.51	-0.47	0.12	-0.71	
Saluran 7	0.50	-0.49	0.10	0.70	
<i>Eigen values</i> (%)	89%	7%	3%	1%	

Tabel6. *Eigenvector loadings* hasil DPC

	DPC1	DPC2	Mineral Alterasi
Saluran 1 : Saluran 2	-0.69	<b>-0.72</b>	Kuarsa
Saluran 6 : Saluran 2	-0.72	<b>0.69</b>	
<i>Eigen values (%)</i>	94%	6%	
Saluran 1 : Saluran 2	-0.45	<b>-0.89</b>	Alunit
Saluran 4 : Saluran 1	-0.89	<b>0.45</b>	
<i>Eigen values (%)</i>	97%	3%	
Saluran 3 : Saluran 1	0.94	<b>-0.33</b>	Illit
Saluran 6 : Saluran 1	0.33	<b>0.94</b>	
<i>Eigen values (%)</i>	96%	4%	
Saluran 3 : Saluran 1	-0.33	<b>-0.94</b>	Klorit
Saluran 4 : Saluran 1	-0.94	<b>0.33</b>	
<i>Eigen values (%)</i>	96%	4%	
Saluran 3 : Saluran 1	-0.49	<b>-0.87</b>	Epidot
Saluran 4 : Saluran 6	-0.87	<b>0.49</b>	
<i>Eigen values (%)</i>	83%	17%	



**Gambar 5.** Hasil PCA untuk mineral kaolinit (A), illit (B), dan alunit (C) serta kelimpahan mineral tersebut dengan *confidence threshold* 95% di atas ASTER saluran 3 (D). Pikel dengan warna cerah (gambar A, B, dan C) mengindikasikan mineral dimaksud.



**Gambar6.** Hasil DPC untuk mineral kuarsa (a), alunit (b), epidot (c), illit (d), dan klorit (e) serta hasil NDVI (f). Warna terang pada gambar a-e menunjukkan kelimpahan mineral dimaksud, sedangkan warna terang pada gambar f menunjukkan kerapatan vegetasi tinggi.

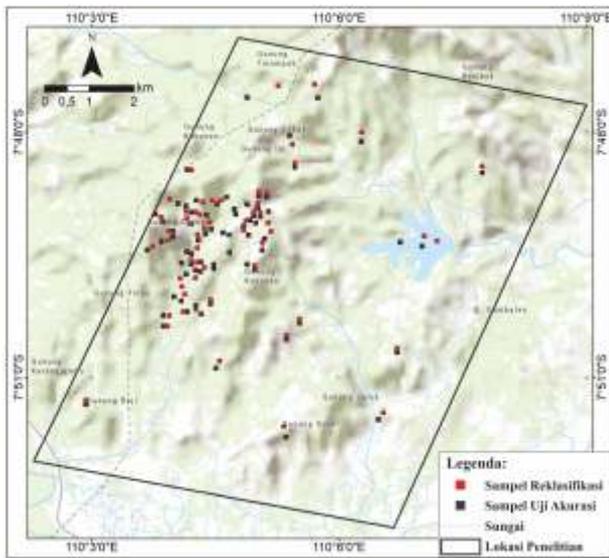
### Klasifikasi Multispektral dan Uji Akurasi

Klasifikasi multispektral yang digunakan dalam penelitian ini adalah *maximum likelihood*. Sampel *training area* klasifikasi dan uji akurasi menggunakan titik sampel lapangan hasil penelitian terdahulu (Harjanto, 2008; Sulthoni, 2017; Pambudi, 2017; dan Pramumijoyo, 2017) serta titik sampel hasil observasi pada bulan November 2018 (Gambar 7).

Selain titik sampel tipe alterasi, dipilih pula sampel untuk tubuh air serta lokasi yang tidak mengalami alterasi (*unaltered zone*). Hal ini dikarenakan pada area penelitian terdapat Waduk Sermo yang cukup luas dan dapat diidentifikasi berdasarkan nilai spektralnya. Tidak seluruh lokasi penelitian mengalami alterasi, sehingga sampel untuk daerah *unaltered* dirasa diperlukan. Sampel pada proses klasifikasi dan uji akurasi merupakan sampel yang berbeda.

Hasil klasifikasi multispektral dengan input saluran hasil PCA dan DPC memiliki kisaran akurasi keseluruhan antara 35% hingga 49% (Tabel 7). Nilai ini tidak dapat diterima karena nilai akurasi dibawah 85% serta nilai *khat-statistic* dari seluruh kombinasi PC dan DPC kurang dari 0.4 sehingga tingkat kecocokan antara klasifikasi dan uji akurasi sangat rendah. Nilai *Z-statistic* secara keseluruhan (10.46 - 23.41) melampaui nilai kritis pada tingkat kepercayaan 99%, yaitu 2.58, mengindikasikan bahwa hasil dari klasifikasi ini lebih baik daripada klasifikasi acak.

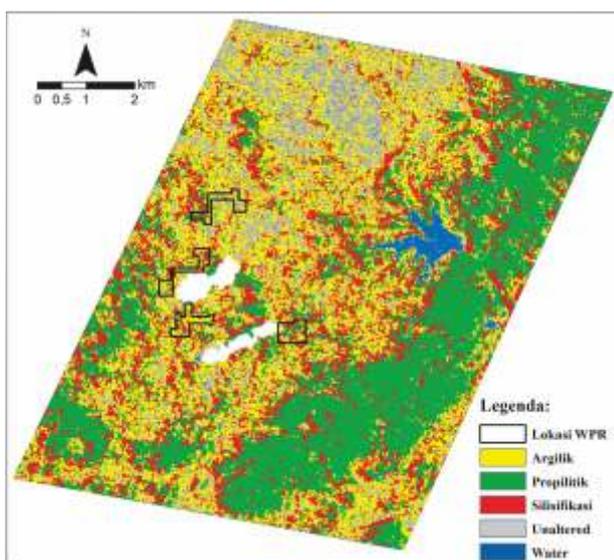
Nilai akurasi paling baik dihasilkan dengan menggunakan DPC b1/b2 – b6/b2 sebesar 49%. Hal ini dikarenakan respon mineral penciri alterasi seperti epidot, klorit, kuarsa, dan illit memiliki nilai reflektan tinggi pada saluran 6 meski beberapa mineral seperti muskovit, kaolinit, dan montmorillonit memiliki reflektan rendah pada saluran tersebut. Selanjutnya mineral alunit, kaolinit, montmorillonit juga mempunyai respon spektral baik pada saluran 1 dan saluran 2. Kontras dengan kondisi tersebut, vegetasi mempunyai reflektan rendah pada saluran 1 saluran 2, serta saluran 6. Vegetasi memiliki respon spektral paling baik pada saluran 3. Hal ini tentunya akan menguntungkan dalam pemetaan mineral penciri alterasi. Hasil klasifikasi *maximum likelihood* dengan input DPC b1/b2 – b6/b2 selanjutnya ditumpang-susunkan dengan batas prospek wilayah pertambangan rakyat (WPR; Gambar 8).



**Gambar 7.** Sebaran sampel alterasi untuk proses klasifikasi dan uji akurasi.

**Tabel 7.** Indikator statistik akurasi klasifikasi tipe alterasi

Kombinasi saluran	Akurasi (%)	Khat-statistic	Z-statistic
PCA 1-4-6-7	47%	0.33	23.41
PCA 1-3-5-6	44%	0.25	12.51
PCA 1-3-5-7	44%	0.25	12.95
DPC b1/b2-b6/b2	<b>49%</b>	0.29	13.82
DPC b1/b2-b4/b1	40%	0.20	10.46
DPC b3/b1-b6/b1	43%	0.24	12.25
DPC b3/b1-b4/b1	43%	0.24	12.25
DPC b3/b1-b4/b6	35%	0.20	12.66



**Gambar 8.** Hasil klasifikasi alterasi hidrotermal dengan DPC b1/b2 – b6/b2. Poligon dengan hitam merupakan wilayah pertambangan rakyat yang memiliki potensi.

Hasil akurasi terbaik kedua diperoleh dari kombinasi PCA saluran 1-4-6-7 dengan nilai akurasi 47%. Pada kombinasi ini, diperoleh nilai koefisien kappa (*khat-statistic*) tertinggi yaitu sebesar 0.33 meskipun nilai tersebut masih masuk dalam tingkat kecocokan rendah antara klasifikasi dan uji akurasi (<0.4). Tingginya nilai koefisien kappa dibandingkan dengan kombinasi lain dikarena penggunaan saluran 4 dan saluran 7 pada kombinasi ini. Mineral lempung, serisit, klorit, epidot, dan kalsit memiliki reflektansi tinggi pada ASTER saluran 4. Serisit, klorit, kalsit dan epidot juga memiliki respon reflektan tinggi pada saluran 7 dari citra ASTER.

Hasil akurasi paling rendah dihasilkan oleh kombinasi DPC b3/b1-b4/b6 dengan nilai akurasi keseluruhan sebesar 35%. Nilai *khat-statistic* untuk kombinasi DPC ini juga memiliki nilai paling rendah yaitu 0.20. Rendahnya akurasi dan koefisien kappa pada kombinasi ini dikarenakan penggunaan saluran 3 yang sangat peka terhadap respon vegetasi sehingga unsur vegetasi akan lebih menonjol dibandingkan unsur mineral. Selain itu, pemilihan *band ratio* band4/band6 mungkin gagal untuk menonjolkan mineral penciri alterasi mengingat pada kedua saluran ini beberapa mineral memiliki respon sama tinggi, sehingga nilai DN hasil *band ratio* dari b4/b6 akan kecil.

### DISKUSI

Pemetaan alterasi dengan citra ASTER pada lokasi penelitian ini kurang berhasil karena beberapa alasan. Faktor pertama adalah faktor tutupan vegetasi tinggi, sehingga penetrasi sensor ke tanah (mineral) tidak dapat maksimal. Pada lokasi dengan tutupan vegetasi tinggi, baik PCA maupun DPC tidak berhasil digunakan untuk memetakan mineral penciri alterasi. Seperti hasil pada Gambar 6 a, b, dan c, kelimpahan mineral kuarsa, alunit, dan epidot berada pada lokasi dengan tutupan vegetasi tinggi, sehingga hasil DPC meragukan. Hal ini dibuktikan dengan nilai DN tinggi (terang) pada ketiga citra hasil DPC berasosiasi dengan DN tinggi (terang) pada citra hasil NDVI.

Faktor kedua adalah pentingnya bagi kita untuk mengetahui lokasi alterasi hidrotermal serta jenis-jenis mineral penciri alterasi di lokasi tersebut. Pada penelitian ini lokasi dimana alterasi hidrotermal terjadi beserta mineral pencirinya diketahui dari penelitian sebelumnya, hasil observasi, serta lokasi-lokasi wilayah pertambangan rakyat (Gambar 7 dan Gambar 8). Namun karena lokasi tersebut berada pada lokasi dengan kerapatan vegetasi tinggi, kombinasi PCA dan DPC kurang maksimal menangkap respon mineral penciri alterasi.

Ketiga, terkait dengan aspek resolusi spasial citra dan resolusi spektral citra. ASTER memiliki resolusi spektral paling baik khususnya pada rentang panjang gelombang *shortwave infrared* (SWIR) dari generasi citra multispektral lainnya, misalkan jika dibandingkan dengan Landsat 7, Landsat 8, dan Sentinel. Faktor ini seharusnya menjadi nilai tambah karena kombinasi PC dan DPC dapat lebih bervariasi dengan melihat reflektan tiap-tiap jenis mineral pada panjang gelombang berbeda-beda (Gambar 4). Dari aspek resolusi spasial, ASTER memiliki resolusi spasial 15 meter untuk saluran VNIR dan 30 meter untuk saluran SWIR. Sebagian besar mineral penciri alterasi paling baik dipetakan menggunakan saluran SWIR. Dengan resolusi spasial sebesar 30 meter, besar kemungkinan dalam 1 piksel citra, terdapat berbagai macam objek (*mix object*), sehingga sulit mendapatkan nilai reflektansi asli dari suatu mineral (*pure pixel index*). Dalam kondisi ideal yaitu pada area tanah terbuka tanpa vegetasi dengan kelimpahan mineral yang luas (lebih besar dari 30 meter x 30 meter) sangat mungkin mendapatkan *pure pixel index* sehingga klasifikasi multispektral dapat lebih akurat. Pada penelitian ini masing-masing sampel reklasifikasi dan uji akurasi kemungkinan mengandung nilai piksel tidak murni, sehingga akurasi klasifikasi multispektral yang dihasilkan rendah.

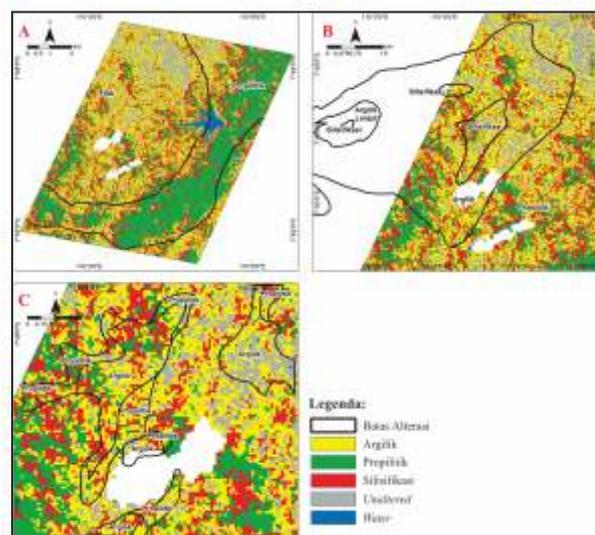
Hasil klasifikasi multispektral dari kombinasi DPC b1/b2 – b6/b2 pada Gambar 9, *over estimate* dalam memetakan tipe alterasi silisifikasi dan *under estimate* untuk lokasi tidak mengalami alterasi (*unaltered*). Alterasi silisifikasi berada dekat dengan *vein* sebagai pusat mineralisasi pada endapan epithermal. Umumnya zona silisifikasi tidak luas dan jarang terekspose sampai ke permukaan (kecuali pada kondisi mengalami tektonik dan erosi tinggi) sehingga kelimpahan mineral penciri tipe alterasi ini pun sangat sedikit. PCA dan DPC dapat digunakan untuk memetakan tipe alterasi argilik dan propilitik karena sebarannya lebih luas dari tipe alterasi silisifikasi.

Hasil pemetaan tipe alterasi hidrotermal dalam penelitian ini memiliki kemiripan dengan hasil pemetaan Harjanto (2008), yang membagi tipe alterasi pada lokasi penelitian menjadi 2, yaitu filik dan propilitik. Pada hasil penelitian ini, area dengan tipe alterasi argilik berada pada zona alterasi filik, sedangkan zona alterasi propilitik memiliki kesesuaian tinggi (Gambar 9 A). Dengan demikian, dapat disimpulkan peta zona alterasi hasil klasifikasi multispektral sesuai dengan hasil pemetaan alterasi yang dilakukan oleh Harjanto (2008). Hasil pemetaan alterasi juga dibandingkan dengan hasil pemetaan oleh Sulthoni (2017). Tidak seluruh lokasi penelitian ini bertampalan

dengan lokasi pemetaan alterasi yang dilakukan Sulthoni ( $\pm 25\%$  tampalan). Menurut Sulthoni (2017) lokasi penelitian terbagi dalam 3 zona alterasi yaitu silisifikasi, argilik, dan propilitik. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa pemetaan alterasi ini menunjukkan kemiripan dengan hasil pemetaan oleh Sulthoni pada tipe alterasi argilik dan gagal pada tipe alterasi silisifikasi dan propilitik (Gambar 9 B).

Terakhir perbandingan hasil pemetaan alterasi dibandingkan dengan hasil pemetaan oleh Pramumijoyo (2017). Lokasi penelitian hanya bertampalan sekitar  $\pm 12,5\%$ . Berdasarkan hasil pemetaan alterasi oleh Pramumijoyo (2017), lokasi penelitian yang bertampalan terdiri dari alterasi argilik dan propilitik. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa zona alterasi argilik kurang begitu berhasil dipetakan dengan baik, sedangkan zona alterasi propilitik memiliki kesesuaian sangat rendah (Gambar 9 C).

Kesesuaian zona alterasi yang tinggi dengan pemetaan oleh Harjanto (2007), kesesuaian menengah dengan hasil pemetaan Sulthoni (2017), serta kesesuaian rendah dengan hasil pemetaan Pramumijoyo (2017) terjadi karena faktor skala pemetaan. Citra ASTER memiliki resolusi spasial 20 meter untuk saluran VNIR dan 30 meter untuk saluran SWIR sehingga hasil pemetaan tipe alterasi hidrotermal maksimal dibuat pada skala 1:60.000. pemetaan oleh Harjanto (2007) dilakukan pada skala kecil sehingga hasil pemetaan dengan ASTER masih relevan untuk dibandingkan. Pemetaan zona alterasi oleh Sulthoni (2017) dan Pramumijoyo (2017) dilakukan pada skala 1:25.000 sehingga informasi didalamnya lebih detil dari pemetaan alterasi dalam penelitian ini.



Sumber: Harjanto (2008), Sulthoni (2017), dan Pramumijoyo (2017)

**Gambar 9.** Overlay peta tipe alterasi hasil klasifikasi multispektral dengan peta zona alterasi hasil penelitian Harjanto (2008; A) pada skala kecil, Sulthoni (2017; B) dan Pramumijoyo (2017; C) pada skala menengah.

## KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian ini dapat ditarik kesimpulan secara umum bahwa pemetaan alterasi hidrotermal menggunakan citra ASTER pada daerah penelitian yang beriklim tropis tidak berhasil dilakukan dengan metode PCA dan DPC. Hasil klasifikasi multispektral menunjukkan tingkat akurasi yang rendah (akurasi keseluruhan kurang dari 85% dengan koefisien kappa lebih kecil dari 0,8) sehingga dianggap belum berhasil.

Penelitian ini menemukan bahwa kombinasi saluran citra ASTER dengan akurasi terbaik untuk mengidentifikasi tipe alterasi hidrotermal adalah kombinasi saluran 1, 2, 4, dan 6. Saluran 3 sangat peka terhadap respon vegetasi, sehingga berkontribusi rendah terhadap keberhasilan pemetaan mineral penciri

alterasi hidrotermal. Metode DPC memiliki akurasi paling tinggi dalam penelitian ini dan lebih berhasil dibandingkan metode PCA dalam memetakan tipe alterasi hidrotermal. DPC dengan kombinasi band1/band2 – band6/band2 merupakan kombinasi terbaik dengan akurasi sebesar 49%. Kombinasi terbaik kedua adalah dengan metode PCA dengan input saluran 1-4-6-7 dengan akurasi sebesar 47%.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada kepada Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, Kementerian ESDM serta rekan-rekan di Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada atas biaya, waktu, dan fasilitas yang disediakan dalam mendukung penelitian ini.

## ACUAN

- Abrams, M.J., Ashley, R.P., Rowan, L.C., Goetz, A.F.H. and Kahle, A.B., 1977. Mapping of Hydrothermal Alteration in the Cuprite Mining District, Nevada, Using Aircraft Scanner Images for Spectral Region 0.46-2.36  $\mu\text{m}$ . *Geology*, 5: 713-718.
- Anderson, J.R., Hardy, E.E., Roach, J.T. and Witner, R.E., 1976. *A Land-use and Land-cover Classification System for Use with Remote Sensor Data*. USGS Professional Paper 964.
- Bastianelli, L., Bela, G. D., and Tarsi, L., 1993, Alteration Mapping: A Case Study in Mid-South Bolivia. *Proceedings of the 9th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Pasadena, CA (Ann Arbor, MI: Environmental Research Institute of Michigan)*, pp. 1133–1144.
- Bedell, R.L., 2001. Geological Mapping with ASTER Satellite: New Global Satellite Data That Is a Significant Leap in Remote Sensing Geologic and Alteration Mapping, *Special Publication Geo. Soc. of Nevada*, 33: 329-334.
- Bishop, M.M., Feinberg, S.E. and Holland, P.W., 1975. *Discrete Multivariate Analysis: Theory and Practice*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 587p.
- Carranza, E.J.M., 2002. Geologically-Constrained Mineral Potential Mapping, PhD Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 480p
- Carranza, E.J.M. and Hale, M., 2002. Mineral Imaging with Landsat Thematic Mapper Data for Hydrothermal Alteration Mapping in Heavily Vegetated Terrane. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 4827-852.
- Cohen, J., 1960. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Education and Psychological Measurement*, 20: 37-45.
- Congalton, R.G. and Green, K., 1999. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 137 pp.
- Crosta, A.P., Souza Filho, C.R., Azevedo, F. and Brodie, C., 2003. Targeting Key Alteration Minerals in Epithermal Deposits in Patagonia, Argentina, Using ASTER Imagery and Principal Component Analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 24: 4233-4240.
- Danoedoro, P., 2012. *Pengantar Penginderaan Jauh Digital*. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Davidson, D., Bruce, B., and Jones, D., 1993. Operational Remote Sensing Mineral Exploration in a Semi-arid Environment: the Troodos Massif, Cyprus. *Proceedings of the 9th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Pasadena, CA (Ann Arbor, MI: Environmental Research Institute of Michigan)*, pp. 845–859.

- Fraser, S.J. and Green, A.A., 1987. A Software Defoliant for Geological Analysis of Band Ratios. *International Journal of Remote Sensing*, 8(3): 525-532.
- Gasmi, A., Gomez, C., Zouari, H., Masse, A., and Ducrot, D., 2016. PCA and SVM as Geo-Computational Methods for Geological Mapping in the Southern of Tunisia, Using ASTER Remote Sensing Data Set. *Arabian Journal of Geoscience*, 9: 753
- Harjanto, A., 2008. Magmatisme dan Mineralisasi di Daerah Kulon Progo dan Sekitarnya, Jawa Tengah. Disertasi Doktor. Institut Teknologi Bandung, Bandung
- Kalinowski, A. and Oliver, S., 2004. *Aster Mineral Index Processing. Manual*. Remote Sensing Application Geoscience, 36.
- Landis, J. and Koch, G., 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33: 59-174.
- Lehmann, E.L. and G. Casella, 1998. *Theory of Point Estimation, 2nd Edition*. Springer, New York.
- Livo, K. E., Clark, R. N. and Knepper, D. H., 1993. *Spectral Plot Program for Accessing the USGS Digital Spectral Library Database with MS-DOS Personal Computers*. USGS Open-file. Denver, Colorado, Report No.93, 593p.
- Murti SH, Wicaksono P. 2014. Analisis Saluran Spektral yang Paling Berpengaruh dalam Identifikasi Kesehatan Terumbu Karang: Studi Kasus Pulau Menjangan Besar dan Menjangan Kecil Kepulauan Karimunjawa. *Majalah Ilmiah Globe*, 16 (2): 117-224.
- Nugraha, O. R., 2015. Geologi dan Alterasi Hidrotermal di Daerah Sangon dan Plampang, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulonprogo, DIY. Skripsi. Teknik Geologi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta (Tidak dipublikasikan).
- Pambudi, D., 2017. Geologi dan Mineralisasi Logam Daerah Sangon, Kokap, Kulon Progo, Yogyakarta, Skripsi., Universitas Diponegoro, Semarang (Tidak dipublikasikan).
- Pramumijoyo, P., 2017. Geologi, Geokimia, dan Karakteristik Fluida Hidrotermal pada Endapan Epithermal Sulfidasi Rendah di Daerah Sangon, Kokap, DIY. Tesis. Teknik Geologi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta (Tidak dipublikasikan).
- Rahardjo, W., Sukandarrumidi, dan Rosidi, H.M.D., 1995. *Peta Geologi Lembar Yogyakarta, Jawa*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Richards, J.A., 1999. *Remote Sensing Digital Image Analysis, An Introduction, 3rd Ed*. Springer-Verlag, Berlin, 363p.
- Ruiz-Armenta, J. R., and Prol-Ledesma, R. M., 1998. Techniques for Enhancing the Spectral Response of Hydrothermal Alteration Minerals in Thematic Mapper Images of Central Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 1981-2000.
- Setijadji, L.D., Kajino, S., Imai, A., and Watanabe, K., 2006. Cenozoic Island Arc Magmatism in Java Island (Sunda Arc, Indonesia): Clues on Relationships between Geodynamics of Volcanic Centers and Ore Mineralization. *Resource Geology* 56(3): 267-292.
- Setijadji, L.D. and Maryono, A., 2012. Geology and Arc Magmatism of the Eastern Sunda Arc, Indonesia. *Proceeding of Banda and Eastern Sunda Arc 2012 MGEI Annual Convention*, pp. 1-22
- Smith, R.B., 2005. Outline of Principle Component Analysis, Site: [http://www.yale.edu/ceo/Documentation/PCA\\_Outline.pdf](http://www.yale.edu/ceo/Documentation/PCA_Outline.pdf). Diakses pada 20 Agustus 2018.
- Souza Filho, C. R., and Drury, S. A., 1998. Evaluation of JERS-1 (FUYO-1) OPS and Landsat TM Images for Mapping of Gneissic Rocks in Arid Areas. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 3569-3594.
- Sulthoni, J.N., 2017. Geologi dan Kontrol Struktur Terhadap Mineralisasi Epithermal Berdasarkan Analisis Tensor dan Geokimia di Gunung Ijo dan Sekitarnya, Pegunungan Kulonprogo, DIY. Skripsi. Teknik Geologi, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto (Tidak dipublikasikan).
- Suroso, Rodhi, A., dan Sutanto, 1986, Usulan Penyesuaian Tata Nama Litostratigrafi Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. *Proceeding of The 15th Annual Convention of The Indonesian Association of Geologists*, v. 1, 10 p.

- 
- Tangestani, M. H., and Moore, F., 2002. Porphyry Copper Alteration Mapping at the Meiduk Area, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 4815-4826.
- Taranik, J.V. and Crósta, A.P., 1996. Remote Sensing for Geological and Mineral Resources, an Assessment of Tools for Geoscientists in the Future. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31(B7): 689-698.
- Van Bemmelen, R.W., 1949. *The Geology of Indonesia*. The Haque, Belanda.
- Vermote, E.F., El Saleous, N.Z., and Justice, C.O., 2002. Atmospheric Correction of MODIS Data in Visible to Middle Infrared: First Result. *Remote Sensing of Environment*, 83: 97-111.
- Wicaksono, P. and Danoedoro, P., 2012. Multitemporal Vegetation Cover Mapping Using ALOS AVNIR-2: The Important of Atmospheric Effect Normalization on Multitemporal Analysis. *Report and Proceedings of ALOS Application and Verification Project in Indonesia*. Jakarta: JAXA dan LAPAN.
- Yamaguchi, Y., and Naito, C., 2003. Spectral Indices for Lithologic Discrimination and Mapping by Using the ASTER SWIR Bands. *International Journal of Remote Sensing*, 24(22): 4311-4323.
-