



Pemetaan Litologi Menggunakan Data Citra Multispektral : Perbandingan antara Citra ASTER, Landsat 8 dan Sentinel-2

Lithological Mapping Using Multispectral Remote Sensing Data: A Comparison of ASTER, Landast 8 and Sentinel-2 images

Bayu Raharja

Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, Kementerian ESDM, Jl. Dr. Soepomo No.10, Tebet, Jakarta Selatan

e-mail : bayu.raharja@esdm.go.id

Naskah diterima: 14 Juli 2023, Revisi terakhir: 20 September 2023, Disetujui: 20 September 2023 Online: 07 November 2023

DOI: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v24i4.797>

Abstrak-Penggunaan penginderaan jauh untuk pemetaan jenis litologi selain menghemat waktu dan biaya juga dapat meningkatkan akurasi. Pada penelitian ini, perbandingan penggunaan citra multispektral untuk memetakan jenis litologi dilakukan di daerah Kokap, Kulon Progo. Tiga citra *multispectral* yaitu ASTER, Landsat 8 dan Sentiel-2 digunakan untuk mencari akurasi terbaik pemetaan jenis litologi menggunakan metode *principle component analysis* (PCA) dan *directed component analysis* (DPC). Klasifikasi multipsektoral dengan algoritma *maximum likelihood* digunakan dalam memetakan jenis litologi berdasarkan 60 sampel *data training* dan 56 *sampel testing* yang dilanjutkan dengan penilaian akurasi. Lima jenis litologi berhasil dipetakan yaitu: intrusi dan lava andesit, breksi piroklastik, breksi andesit, batugamping, dan alluvium. Hasil dari teknik klasifikasi citra ini diperbandingkan dengan peta geologi dari penelitian sebelumnya. Kombinasi PCA dari Citra Landsat 8 saluran VNIR - SWIR dan SRTM dem menghasilkan nilai akurasi klasifikasi sebesar 74,86%, lebih tinggi dibandingkan akurasi citra ASTER dan Sentinel-2. Akurasi pemetaan ini masih berada di bawah batas yang ditentukan. Penggunaan DEM bersama dengan citra multispektral meningkatkan akurasi pemetaan litologi di daerah penelitian.

Kata Kunci: citra *multispectral*, litologi, klasifikasi multispektral, ASTER, Landsat 8, Sentinel-2

Abstract-Using remote sensing data for lithological mapping beside saving time and reducing cost leads to increased accuracy. In this study, the result of multispectral remote sensing techniques has been compared for manifesting lithological type in Kokap, Kulon Progo. Three multispectral images, including ASTER, Landsat 8, and Sentinel-2, were used in order to find the highest overall accuracy using principle component analysis (PCA) and directed component analysis (DPC). Multispectral classification with the maximum likelihood algorithm was performed to map the lithological type based on 60 training and 56 testing data and followed by accuracy evaluation. Five lithological types were succeeded to be mapped: andesite lava and intrusion, pyroclastic breccias, andesite breccias, limestone, and alluvium. Results of these image classification techniques were compared with geological map from previous study. PCA combination of VNIR-SWIR band of Landsat 8 imagery and SRTM DEM yielded a classification accuracy of 74,86%, higher than those of the ASTER and Sentinel-2 imagery. The accuracy of this lithological mapping was below the acceptance standard The used of DEM together with multispectral images was increase the accuracy of lithological mapping in the study area.

Keywords: multispectral images, lithology, multispectral classification, ASTER, Landsat 8, Sentinel-

satu buah DEM (*Digital Elevation Model*) SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) dengan resolusi spasial 12,5 meter yang diunduh dari website Alaska Satellite Facility (ASF) digunakan dalam penelitian ini. Seluruh citra ini telah tergeoreferensi pada sistem proyeksi UTM (*Universal Transverse Mercator*) zona 49S dengan elipsoid WGS-84.

Pra-pengolahan citra seperti koreksi radiometrik (termasuk koreksi atmosferik) dan proses *masking* dilakukan pada ketiga citra multispektral. Koreksi atmosferik bertujuan untuk meminimalisir gangguan molekul dan elemen di atmosfer, sehingga nilai radian atau nilai reflektan dapat mendekati nilai aslinya (*surface reflectance*). Modul FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes*) digunakan pada koreksi atmosferik citra ASTER dan Landsat 8 sedangkan pada citra Sentinel-2, koreksi atmosferik dilakukan menggunakan perangkat lunak *Sentinel Application Platform* (SNAP). Proses terakhir yang dilakukan adalah *masking* citra sehingga menghasilkan citra pada area studi penelitian dan menghilangkan obyek-obyek yang mengganggu seperti awan dan air laut (Wicaksono dan Danoedoro, 2012).

Identifikasi Litologi dengan Penginderaan Jauh

Kamel, dkk. (2016) melakukan teknik *principle component analysis* (PCA) dan *band ratio* pada Landsat ETM+ untuk memetakan litologi di Mesir. Kombinasi komposit RGB hasil PCA (PC2, PC1, PC4), band ratio (5/1, 3/2, 7/2), (5/3, 4/2, 3/1), dan

(3/1, 4/2, 5/7) terbukti dapat menonjolkan perbedaan litologi dan memudahkan interpretasi terutama dalam membedakan *serpentinites talc*, *carbonate rocks*, dan batuan intrusif (Gambar 2A). Gasmi, dkk. (2016) melakukan pemetaan litologi di Tunisia dengan menggunakan teknik PCA pada citra ASTER. Kombinasi citra komposit RGB (PC1, PC5, PC4) dan RGB (PC6, PC4, PC1) dapat membedakan unit litologi *limestone*, *clay*, *lumachel*, dan *dolomite* (Gambar 2B). Yao, dkk. (2015) menggunakan *Directed Principle Component* (DPC) pada citra Landsat 8 dengan 4 (empat) kombinasi *band ratio* sebagai input PCA yang mewakili empat indeks mineral: *Clay Mineral* (*band ratio* 6/7), *Vegetasi* (*band ratio* 5/4), *Ferric Iron Oxide* (*band ratio* 4/2), dan *Ferrous Iron Oxide Index* (*band ratio* 6/5) untuk memetakan litologi di Gua Musang, Malaysia. Hasilnya menunjukkan spektral vegetasi dapat dikurangi dan fitur litologi dapat lebih ditonjolkan. Teknik PCA dan DPC terbukti bermanfaat untuk menekan spektra vegetasi dari citra satelit pada lingkungan dengan kerapatan vegetasi rendah sampai sedang. Bentahar, I., dan Raji, M., (2020) menggunakan teknik *Principal Component Analysis* (PCA), *Minimum Noise Fraction* (MNF), dan *Independent Component Analysis* (ICA) untuk menggunakan citra ASTER, Landsat OLI dan Sentinel 2A untuk memetakan perbedaan litologi di Central High Atlas, Maroko dengan klasifikasi multispektral dan mendapatkan akurasi sebesar 93,93% untuk *support vector machine* (SVM) dan 82,86% untuk *maximum likelihood classification* (MLC).

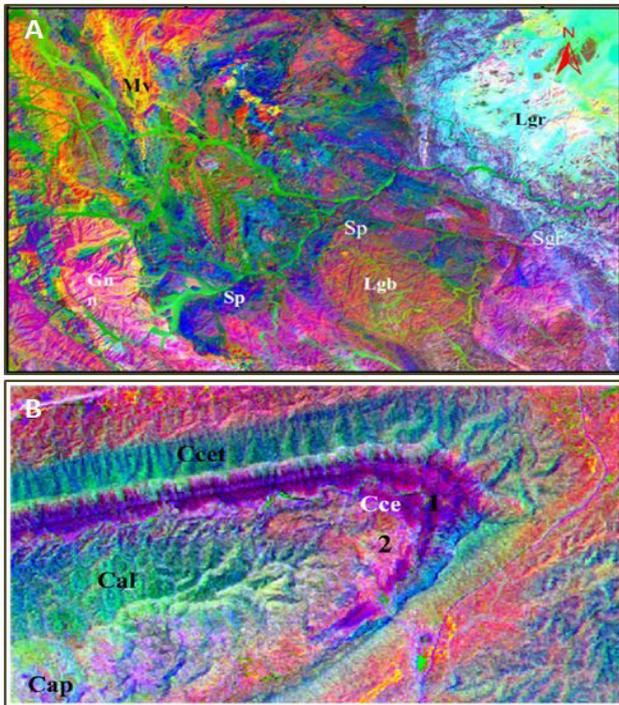
Tabel 1 Detil sensor citra ASTER, Landsat 8 dan Sentinel-2 (Van Der Werff dan Van Der Meer 2016)

ASTER		Landsat 8			Sentinel-2					
Saluran	Nilai tengah Panjang gelombang (nm)	Resolusi Spasial (m)	Saluran	Nilai tengah Panjang gelombang (nm)	Resolusi Spasial (m)	Saluran	Nilai tengah Panjang gelombang (nm)	Resolusi Spasial (m)		
1	0,5560	15	1	0,4430	30	1	0,4430	60		
2	0,6610		2	0,4826		2	0,4900			
3N	0,8070		3	0,5613		3	0,5600	10		
3B	0,8070		4	0,6546		4	0,6650			
4	16,560	30	5	0,8646	15	5	0,7050	20		
5	21,670		6	16,090		6	0,7400			
6	22,090		7	22,010		7	0,7830			
7	22,620		8	0,5917		8	0,8420		10	
8	23,360	90	9	13,730	30	8A	0,8650	20		
9	24,000					9	0,9450	9	0,9450	60
10	82,910					10	109,000	10	13,750	
11	86,340					11	120,000	11	16,100	20
12	90,750	100	11	120,000	12	21,900				
13	106,570									
14	113,180									

Beberapa kombinasi *false color composite* dari citra hasil PCA dan DPC dapat disusun untuk mendapatkan informasi litologi dari citra (Tabel 2). Saluran yang digunakan sebagai input pada pemetaan litologi ini adalah saluran VNIR dan SWIR. Kedua saluran ini dianggap paling mampu memetakan kondisi geologi khususnya jenis litologi (Haselwimmer, et. al., 2010).

Klasifikasi Multispektral dan Data Sampel

Citra hasil transformasi dengan PCA dan DPC selanjutnya diklasifikasi menjadi peta jenis litologi menggunakan klasifikasi multispektral dengan algoritma *maximum likelihood*, metode klasifikasi terbimbing yang umum digunakan dalam penginderaan jauh. *Maximum Likelihood* adalah salah satu teknik yang digunakan dalam penaksiran suatu parameter distribusi data dan tetap dominan dipakai dalam pengembangan uji-uji yang baru (Lehmann dan Casella, 1998). Metode ini mengasumsikan bahwa tiap-tiap obyek di atas permukaan bumi memiliki pantulan spektral yang berbeda-beda, sehingga dapat dikelompokkan berdasarkan kemiripan nilai spektralnya tersebut. Sebelum dapat melakukan klasifikasi *maximum likelihood*, diperlukan sampel untuk *training* dan *testing area* yang bisa berasal dari data primer maupun data sekunder.



Gambar2 Komposit hasil PCA dalam RGB: PC2, PC1, PC 4 oleh Gasmi (2016) (A) dan RGB: PC1, PC5, PC4 oleh Kamel (2016) (B). Gn: gneiss, Sp: serpentinites, Mgb: metagabbroic, Mv: metavolcanic, Lgb: late tectonic gabbro, Lgr: late tectonic granite, Cap: dolomite/limestone/gypsum/sand, Cal: limestone Knemiceras, Cce: clay/lumachel, Cce-t: limestone/dolomite.

Tabel 2 Kombinasi PCA dan DPC citra ASTER, Landsat 8, dan Sentinel-2 untuk menonjolkan aspek litologi (Bentahar, I., & Raji, M., 2020; Gasmi, 2016; Kamel, 2016)

Metode	Citra Multispektral	Kombinasi saluran
PCA	ASTER	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
	Landsat 8	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
	Sentinel-2	1, 2, 3, 4, 8, 11, 12
DPC	ASTER	4/1, 2/1, 7/1, 3/1, 4/7, 4/2, 3/4
	Landsat 8	6/2, 4/2, 3/7, 5/3, 6/7, 4/6, 5/6
	Sentinel-2	11/2, 4/2, 3/12, 8/3, 11/12, 4/11, 8/11

Klasifikasi multispektral terbimbing dengan algoritma *maximum likelihood* selanjutnya dilakukan berdasarkan sampel klasifikasi yang telah ditentukan. Sampel uji akurasi digunakan untuk mengevaluasi keberhasilan klasifikasi menggunakan *confusion matrix*. Parameter-parameter statistik seperti *overall accuracy*, *kappa coefficient*, dan *Z-statistic* dihasilkan melalui *confusion matrix* yang digunakan sebagai indikator keberhasilan klasifikasi. Keberhasilan hasil klasifikasi ditentukan dengan nilai akurasi keseluruhan >80% dengan kappa >0.8 (Congalton & Green, 1999).

HASIL PENELITIAN

Hasil identifikasi tipe litologi citra ASTER

Saluran VNIR dan SWIR citra ASTER sebanyak 9 saluran digunakan sebagai input PCA yang menghasilkan 9 citra PC yang tidak saling berkorelasi. PC1 dan PC2 berturut-turut mengandung 93,32% dan 4,5% dari total informasi pada citra, menjadikan kedua PC ini merupakan komponen paling penting. Sisanya sebesar 2,2% variansi data tersebar dari PC3 hingga PC9. PC9 mengandung paling sedikit informasi serta paling banyak *noise* pada citra ASTER. Meskipun PC3-PC9 hanya mengandung sedikit informasi, akan tetapi beberapa diantara output PC ini berguna untuk memperlihatkan kontras tipe litologi. Kontribusi saluran yang penting dari tiap saluran VNIR dan SWIR pada tiap komponen PC ditandai dengan angka *eigenvector* (ve) tebal (bold) pada Tabel 3.

Sebanyak 7 rasio saluran citra ASTER digunakan sebagai input DPC. Idealnya DPC hanya menggunakan dua rasio saluran sebagai input, dengan saluran pertama adalah kombinasi yang menonjolkan nilai spektral target dan saluran kedua merupakan

kombinasi yang menonjolkan nilai spektral obyek yang mengganggu target.

Pemilihan rasio saluran yang digunakan berdasarkan pantulan spektral obyek yang menonjolkan jenis litologi. Andesit dipetakan menggunakan rasio saluran 4:2 dari citra ASTER karena karakteristik pantulan spektral yang tinggi pada saluran 2 dan pantulan spektral yang rendah pada saluran 4. Batupasir dideteksi dengan rasio saluran 7:1 karena memiliki respon spektral tinggi pada saluran 7 dan respon spektral rendah pada saluran 1. Konglomerat memiliki respon spektral tinggi pada saluran 1 dan memiliki respon spektral rendah pada saluran 3, sehingga rasio saluran 3:1 digunakan untuk memetakan konglomerat. Batugamping dipetakan dengan rasio saluran 4:1. Hasil DPC berupa 7 saluran DPC dengan nilai *ve* yang lengkap disajikan pada Tabel 4.

Citra komposit warna semu (*false color composite*) disusun untuk lebih mempertajam kontras dalam membedakan tipe litologi pada daerah penelitian.

Citra PCA dengan komposisi RGB PC3-PC2-PC1 menyajikan kontras litologi yang baik (Gambar 3). Pada komposit warna ini, kelompok intrusi andesit ditampilkan dengan warna ungu terang, kelompok batuan breksi ditampilkan dengan warna hijau hingga kuning kecokelatan, dan kelompok batupasir dan batugamping tampil dengan warna ungu muda berselang-seling dengan warna hijau.

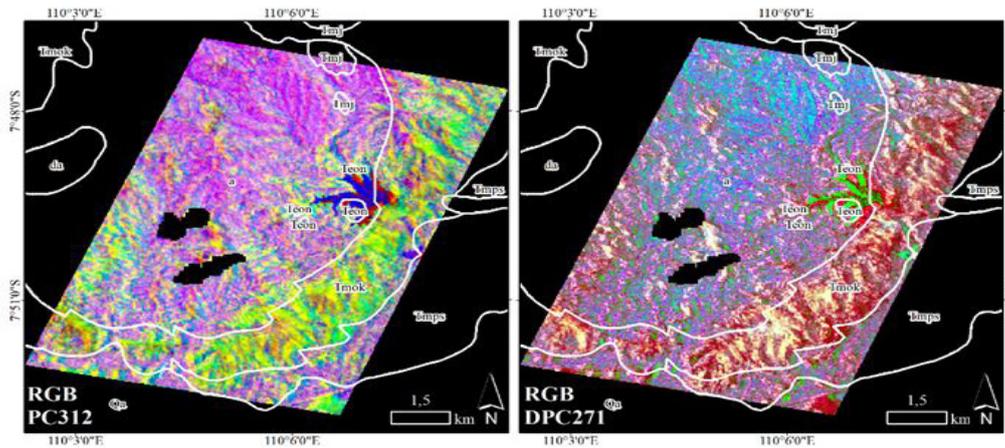
Pada citra komposit hasil DPC, komposisi RGB DPC2-DPC7-DPC1 menampilkan informasi jenis litologi dengan baik (Gambar 3). Kombinasi ini memisahkan dengan baik kelompok batuan breksi andesit dari Formasi Kebobutak yang ditampilkan dengan warna merah tua kecokelatan dengan gradasi yang merepresentasikan ketinggian topografi. Kelompok intrusi andesit ditampilkan dengan perpaduan warna ungu-hijau-biru dengan sedikit spot-spot warna merah tua kecokelatan. Kelompok batupasir dan batugamping dari Formasi Sentolo disajikan dengan warna dominansi ungu tua kecokelatan.

Tabel 3 Kontribusi tiap saluran pada sembilan komponen PCA ASTER

<i>Principle components</i>	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7	PC 8	PC 9
Saluran 1	0,15	-0,01	-0,49	-0,04	0,03	0,02	-0,01	-0,01	-0,86
Saluran 2	0,26	-0,06	-0,82	0,04	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,51
Saluran 3	0,64	0,71	0,16	-0,21	0,09	0,09	-0,03	0,00	0,02
Saluran 4	0,57	-0,30	0,20	0,62	-0,23	-0,26	0,19	-0,02	-0,06
Saluran 5	0,22	-0,31	0,08	-0,63	-0,61	-0,19	-0,15	0,12	0,01
Saluran 6	0,24	-0,34	0,11	0,08	0,09	0,74	-0,49	0,10	0,00
Saluran 7	0,22	-0,32	0,07	-0,23	0,71	-0,41	-0,13	0,32	0,02
Saluran 8	0,15	-0,26	0,06	-0,26	0,22	0,09	0,23	-0,85	0,02
Saluran 9	0,07	-0,14	0,03	-0,19	0,05	0,40	0,79	0,38	0,00
<i>Variance (%)</i>	93,32	4,50	1,20	0,25	0,22	0,21	0,16	0,14	0,02

Tabel 4 Kontribusi tiap saluran pada tujuh komponen DPC ASTER

<i>Principle components</i>	DPC 1	DPC 2	DPC 3	DPC 4	DPC 5	DPC 6	DPC 7
Saluran 4/1	0,53	0,49	-0,25	-0,28	-0,30	-0,30	0,41
Saluran 2/1	0,21	-0,01	-0,33	0,60	-0,45	-0,18	-0,51
Saluran 7/1	0,19	0,42	-0,14	0,34	0,20	0,78	0,11
Saluran 3/1	0,64	-0,22	0,70	0,01	-0,12	0,13	-0,12
Saluran 4/7	0,35	-0,65	-0,55	-0,27	0,07	0,26	0,05
Saluran 4/2	0,29	0,24	-0,11	-0,14	0,71	-0,26	-0,51
Saluran 3/4	0,15	-0,23	0,01	0,60	0,39	-0,35	0,54
<i>Eigen values (%)</i>	93,21	4,09	1,99	0,51	0,11	0,06	0,03



Gambar 3 Citra false color composite ASTER hasil PCA (RGB PC 3-1-2) dan DPC (RGB DPC 2-7-1) menampilkan kontras paling baik dalam membedakan tipe litologi. Garis warna putih merupakan batas litologi dari Peta Geologi Regional.

Hasil Identifikasi Tipe Litologi Citra Landsat 8

Pada citra Landsat 8, sebanyak 7 saluran (saluran 1 – 7) yang merupakan saluran VNIR dan SWIR digunakan sebagai input PC. Hasil PC pada PC1 mengandung 94.5% dari total varian data, diikuti PC2 yang mewakili 4.78% dari total varian data. Sisanya sebesar 0.72% terbagi pada PC3 – PC7 (Tabel 5). PC1 utamanya memberikan informasi tentang albedo sinar matahari dan topografi sehingga perbedaan tipe litologi kurang jelas. PC1 memiliki nilai *ve* (-) pada seluruh saluran yang mengindikasikan kontras antar saluran sulit dibedakan. PC2 memiliki nilai *ve* tinggi dan positif (+) pada saluran 5 dan nilai *ve* tinggi negatif (-) pada saluran 6. Hal ini menandakan obyek vegetasi akan memiliki rona terang pada PC ini sedangkan obyek litologi berona gelap. PC3 memiliki kontras nilai *ve* pada saluran 3 (tinggi dan negatif) dan saluran 6 (tinggi dan positif) sehingga obyek litologi akan ditampilkan dengan rona cerah. PC4 memiliki nilai *ve* tinggi dan positif pada saluran 1 (0.56) serta nilai *ve* tinggi negatif pada saluran 4 (-0.46). Hal ini sesuai dengan respon litologi breksi andesit yang mempunyai reflektan tinggi pada saluran 4 dan reflektan rendah pada saluran 1. Nilai *ve* negatif (-) pada saluran 4 menandakan bahwa litologi breksi andesit dicirikan dengan rona gelap pada PC4.

Pada proses DPC, beberapa kombinasi rasio saluran yang dapat menonjolkan aspek litologi dipilih sebagai input PC didasarkan pada respon spektral tiap saluran pada jenis litologi. Rasio saluran 6:2 misalnya, baik untuk mengidentifikasi batuan beku seperti granit, granodiorit, tonalit, dan riolit serta batugamping yang memiliki reflektan tinggi pada saluran 6 dan reflektan rendah pada saluran 2. Breksi andesit dan gabro baik dideteksi dengan rasio saluran 4:2 (*weathered rock*) dan rasio saluran 4:6 (*fresh rock*). Sementara batuan konglomerat baik dideteksi dengan rasio saluran 6:7.

Batupasir memiliki reflektansi tinggi pada saluran 7 dan merespon lemah pada saluran 3, sehingga rasio saluran 3:7 baik digunakan untuk mendeteksi kelimpahan batupasir. Hasil DPC dari 7 rasio saluran adalah 7 saluran PC dengan nilai *eigen loading vector*. Nilai *ve* yang penting dan berkontribusi tinggi pada tiap saluran hasil PC ditandai dengan angka tebal pada Tabel 6.

DPC1 memiliki variansi data terbesar (97.11%) dari total data sehingga memiliki informasi paling banyak. Nilai *ve* pada DPC1 negatif (-) pada semua saluran sehingga kontras antar saluran PC kurang baik. DPC2 merupakan saluran terpenting kedua dengan 1.67% variansi data. DPC3 mengandung sekitar 0.81% dari total varian data serta memiliki kontras warna yang hampir sama dengan DPC1. Hasil DPC menunjukkan DPC3 memiliki nilai *ve* tinggi dan positif pada rasio saluran 6:7 serta nilai *ve* tinggi dan negatif pada rasio saluran 6:2.

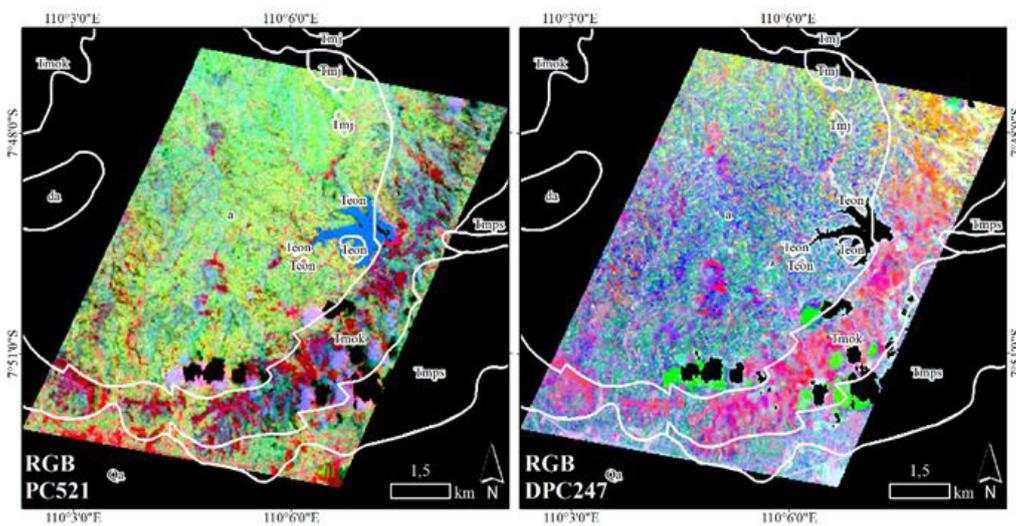
Untuk menampilkan kontras yang lebih baik, beberapa kombinasi citra komposit warna semu disusun baik dari kombinasi hasil PCA maupun DPC (Gambar 4). Kombinasi PC5-PC2-PC1 (RGB) dan DPC2-DPC4-DPC7 (RGB) dianggap sebagai kombinasi terbaik dalam menampilkan kontras jenis litologi di lokasi penelitian. Pada kombinasi komposit R-G-B PC5-PC2-PC1, kelimpahan andesit ditampilkan dengan warna hijau, breksi andesit dari Formasi Kebobutak dengan warna merah-keunguan, serta batugamping dan batupasir dari Formasi Sentolo ditampilkan dengan kombinasi warna merah-hijau. Sementara itu, DPC2-DPC4-DPC7 dalam RGB menampilkan intrusi andesit dengan warna dominansi biru hijau keunguan. Breksi andesit ditampilkan lebih baik pada kombinasi DPC ini sebagai warna merah. Terakhir Formasi Sentolo ditampilkan dengan warna biru keunguan pada DPC2-4-7.

Tabel 5 Kontribusi tiap saluran pada tujuh komponen PCA Landsat 8

<i>Principle components</i>	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7
Saluran 1	-0,11	-0,22	-0,47	0,56	0,30	-0,03	0,56
Saluran 2	-0,12	-0,21	-0,44	0,28	0,12	0,04	-0,81
Saluran 3	-0,18	-0,16	-0,47	-0,36	-0,51	-0,56	0,10
Saluran 4	-0,17	-0,29	-0,31	-0,46	-0,05	0,75	0,13
Saluran 5	-0,75	0,64	-0,07	-0,04	0,13	0,03	0,00
Saluran 6	-0,52	-0,45	0,46	0,34	-0,43	0,08	0,00
Saluran 7	-0,28	-0,44	0,22	-0,39	0,65	-0,33	-0,02
<i>Variance (%)</i>	94,50	4,78	0,60	0,08	0,03	0,01	0,00

Tabel 6 Kontribusi tiap saluran pada tujuh komponen DPC Landsat 8

<i>Principle components</i>	DPC1	DPC2	DPC3	DPC4	DPC5	DPC6	DPC7
Saluran 6/2	-0,58	0,56	-0,43	0,30	-0,16	0,03	-0,23
Saluran 3/7	-0,17	0,39	0,52	-0,32	0,52	0,28	-0,32
Saluran 4/2	-0,17	0,23	0,35	0,44	0,27	-0,25	0,69
Saluran 5/3	-0,58	-0,56	-0,25	-0,16	0,49	-0,17	0,02
Saluran 6/7	-0,24	-0,15	0,51	0,10	-0,35	-0,59	-0,41
Saluran 4/6	-0,41	0,02	0,16	-0,56	-0,51	0,20	0,44
Saluran 5/6	-0,20	-0,39	0,28	0,51	-0,15	0,66	-0,09
<i>Variance (%)</i>	97,11	1,67	0,81	0,30	0,09	0,02	0,01



Gambar 4 Citra *false color composite* Landsat 8 hasil PCA (RGB PC 5-2-1) dan DPC (RGB DPC 2-4-7) menampilkan kontras paling baik dalam membedakan tipe litologi. Garis warna putih merupakan batas litologi dari Peta Geologi Regional.

Hasil identifikasi tipe litologi citra Sentinel-2

Proses PCA dengan input citra Sentinel-2 juga dilakukan dengan input yang sama yaitu saluran VNIR dan SWIR. Citra Sentinel-2 memiliki resolusi spektral yang mirip dengan citra Landsat 8 khususnya pada julat saluran VNIR dan SWIR. Hasil PC dari citra Sentinel-2 juga memiliki kemiripan dengan hasil PC citra Landsat 8. Kontribusi tiap saluran yang penting pada tiap komponen PC ditandai dengan angka tebal

(bold) pada Tabel 7. Pada PC1 seluruh saluran memiliki nilai *eigenvector loading* (ve) negatif, sehingga kontras rona dari tiap saluran kurang terlihat. PC1 mengandung 93,61% informasi dan menjadikannya PC terpenting. Sama halnya dengan hasil PC pada citra Landsat 8, PC1 mengandung utamanya informasi topografi dan albedo sinar matahari. Morfologi daerah penelitian terlihat jelas pada PC1 yang ditampilkan seperti halnya shaded relief dari data DEM.

PC2 mengandung 5,64% dari total varian data dan menjadikannya PC terpenting kedua. PC2 memiliki nilai *ve* tinggi dan positif (0,62) pada saluran 8 serta tinggi dan negatif (-0,53) pada saluran 11. Saluran 8 merupakan saluran near infrared sehingga peka terhadap vegetasi. PC3 memiliki nilai *ve* tinggi dan positif (0,53) pada saluran 4 dan nilai *ve* tinggi negatif (-0,47) pada saluran 11. Saluran 4 paling baik dalam menangkap litologi andesit, nilai *ve* yang tinggi dan positif menandakan litologi andesit akan ditampilkan dengan rona terang pada PC3. PC3 mengandung 0,58% dari total varian data spektral. PC3 juga menampilkan perbedaan topografi dengan cukup baik. PC4 mengandung 0,1% dari total informasi dan memiliki nilai *ve* tinggi negatif (-0,77) pada saluran 1 serta nilai *ve* tinggi positif (0,36) pada saluran 4. Kondisi ini membuat PC4 baik untuk mendeteksi kelimpahan jenis litologi breksi andesit terutama yang telah mengalami pelapukan karena litologi ini memiliki reflektan tinggi pada saluran 4 dan reflektan rendah pada saluran 1.

Proses PC kedua dari citra Sentinel-2 adalah menggunakan rasio saluran (*band ratio images*) sebagai input PC yang biasa juga disebut sebagai DPC. Batuan granit, riolit, tonalit, dan batugamping dideteksi menggunakan citra Sentinel-2 dengan rasio saluran 11:2 dan rasio saluran 11:12 dengan pertimbangan jenis litologi tersebut memiliki respon spektral tinggi pada saluran 11 dan memiliki respon spektral rendah pada saluran 2 dan saluran 12. Litologi gabro dan breksi andesit dipetakan menggunakan rasio saluran 4:11. Batupasir dideteksi keberadaannya dengan rasio saluran 3:12 karena respon spektral yang kontras (tinggi dan rendah) pada kedua saluran tersebut, sedangkan kelompok batuan konglomerat dipetakan dengan rasio saluran 4:2.

Hasil DPC berupa 7 saluran DPC yang tidak saling berkorelasi (Tabel 8). Tiap saluran DPC mengandung informasi yang berbeda dan tidak terulang pada saluran DPC lainnya. Kontribusi saluran yang penting

dari masing-masing saluran VNIR dan SWIR pada tiap komponen PC ditandai dengan nilai *ve* ‘tebal’ (*bold*). DPC1 mengandung 95,04% informasi dan menjadikan DPC1 saluran terpenting pada hasil DPC ini. DPC2 mengandung 4,11% dari total varian data dengan nilai *ve* tinggi dan negatif (-0,60) pada rasio saluran 11:2 serta nilai *ve* tinggi dan positif (0,57) pada rasio saluran 8:3. DPC3 mempunyai nilai *ve* (*eigenvector loading*) tinggi dan positif (0,58) pada rasio saluran 11:12 serta nilai *ve* negatif (-0,28) pada rasio saluran 8:3. Rasio saluran 11:12 baik untuk mendeteksi granit, riolit, dan tonalit.

Kombinasi citra komposit warna semu (*false color composite*) disusun untuk menampilkan kontras jenis litologi dari citra hasil PCA dan DPC (Gambar 5). Kombinasi PC3 – PC2 – PC1 dalam RGB memberikan perbedaan warna paling baik dibandingkan kombinasi PC lainnya. Pada kombinasi ini, batuan andesit ditampilkan dengan warna hijau. Breksi andesit dari Formasi Kebobutak tampak dengan warna ungu hingga ungu tua. Kelompok batuan breksi andesit ini memiliki area yang lebih kecil atau sedikit bila dibandingkan dengan batas litologi Formasi Kebobutak Peta Geologi regional. Batugamping dan batupasir dari Formasi Sentolo disajikan dengan warna hijau muda berselang seling merah. Terakhir endapan aluvium tampak dengan dominasi warna merah pada citra komposit PC321.

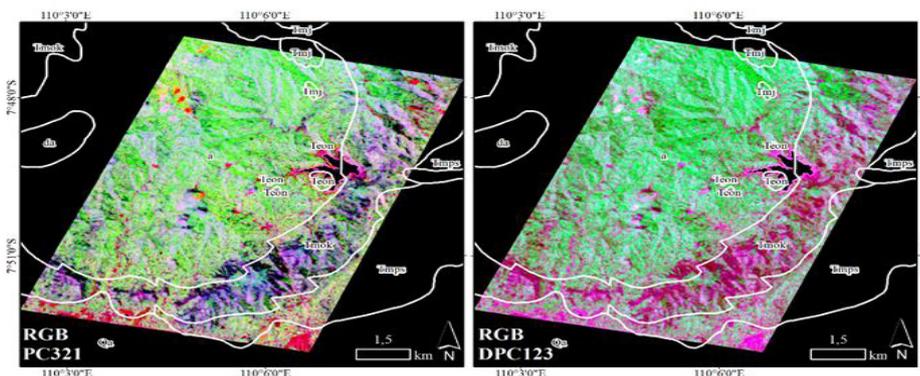
Untuk kombinasi citra komposit hasil DPC, kombinasi RGB DPC1 – DPC2 – DPC3 terpilih untuk menyajikan kontras warna tipe litologi. Kombinasi ini dinilai paling baik dalam menampilkan perbedaan tipe litologi dari citra hasil DPC. Litologi intrusi andesit pada citra komposit DPC123 tampak dengan warna hijau. Kelompok batuan breksi andesit disajikan dengan warna ungu tua, sedangkan batugamping dan batupasir dari Formasi Sentolo pada citra komposit tampak dengan warna hijau muda keunguan. Materi aluvial nampak dengan warna ungu terang ke arah merah muda pada citra komposit ini.

Tabel 7 Kontribusi tiap saluran pada tujuh komponen PCA Sentinel-2

Principle components	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Saluran 1	-0,13	-0,07	0,32	-0,77	0,38	0,19	0,31
Saluran 2	-0,13	-0,12	0,43	-0,19	-0,03	-0,16	-0,85
Saluran 3	-0,15	-0,14	0,45	0,10	-0,20	-0,74	0,39
Saluran 4	-0,18	-0,28	0,53	0,36	-0,27	0,62	0,15
Saluran 8	-0,77	0,62	-0,01	0,12	0,07	0,03	-0,01
Saluran 11	-0,50	-0,53	-0,47	-0,27	-0,41	-0,01	-0,01
Saluran 12	-0,25	-0,46	-0,09	0,38	0,75	-0,09	-0,04
<i>Eigen values</i> (%)	93,61	5,64	0,58	0,10	0,05	0,02	0,01

Tabel 8 Kontribusi tiap saluran pada tujuh komponen DPC Sentinel-2

Principle components	DPC1	DPC2	DPC3	DPC4	DPC5	DPC6	DPC7
Saluran 11/2	-0,46	-0,60	-0,16	0,00	-0,58	-0,04	0,27
Saluran 3/12	-0,19	-0,39	0,09	0,49	0,68	-0,07	0,31
Saluran 4/2	-0,16	-0,23	0,51	0,31	-0,13	0,21	-0,71
Saluran 8/3	-0,70	0,57	-0,28	0,28	0,01	0,18	-0,06
Saluran 11/12	-0,26	0,02	0,58	-0,52	0,16	0,56	0,31
Saluran 4/11	-0,35	-0,21	-0,24	-0,57	0,38	-0,35	-0,44
Saluran 8/11	-0,22	0,27	0,48	-0,02	-0,13	-0,70	0,19
<i>Eigen values (%)</i>	95,04	4,11	0,56	0,14	0,09	0,05	0,01



Gambar 5 *Citra false color composite Sentinel-2* hasil PCA (RGB PC 3-2-1) dan DPC (RGB DPC 1-2-3) menampilkan kontras paling baik dalam membedakan tipe litologi. Garis warna putih merupakan batas litologi dari Peta Geologi Regional.

Hasil observasi unit litologi

Citra komposit hasil PC selanjutnya digunakan untuk membuat deliniasi unit litologi sebagai satuan pemetaan observasi lapangan. Warna dan rona yang berbeda dari citra PC, perbedaan topografi serta kemiringan lereng yang homogen pada peta citra dapat digunakan sebagai kunci dalam membedakan jenis litologi. Hasil deliniasi unit litologi dari citra PC dan DPC disajikan pada Gambar 6. Hasil deliniasi ini masih bersifat tentatif, dan harus dilakukan verifikasi kebenarannya dengan survei lapangan dan/atau analisis laboratorium.

Observasi lapangan dan pengambilan sampel dilakukan pada 56 stasiun titik pengamatan untuk mendapatkan deskripsi batuan secara megaskopis. Pengamatan petrografi menggunakan mikroskop polarisasi (*transmitted light polarizing microscope*) dilakukan pada 18 sayatan tipis (Gambar 7). Sampel ini dianggap dapat mewakili sebaran sampel litologi lainnya. Dalam analisis dan interpretasi data petrografi pada sayatan tipis digunakan klasifikasi yang dibuat oleh Streckeisen (1978) untuk klasifikasi batuan beku, klasifikasi Pettijohn (1975) untuk batuan sedimen, klasifikasi Fisher (1981) dan Pettijohn (1975) untuk batuan piroklastik, dan klasifikasi

Dunham (1962) untuk batugamping. Ringkasan hasil analisis petrografi sayatan tipis batuan dirangkum pada Tabel 9.

Sebelum melakukan klasifikasi multispektral dilakukan pembuatan sampel *training area* dan *sampel testing area* yang bersumber dari data primer dan data sekunder. Data primer merupakan data pengamatan lapangan dan hasil analisis petrografi sedangkan data sekunder berasal dari peta geologi regional dan pemetaan geologi oleh peneliti-peneliti sebelumnya (Harjanto, 2008; Nugraha, 2015; Pramumijoyo, 2017; Sulthoni, 2017; dan Pambudi, 2017). Sebanyak 116 sampel dipilih untuk proses klasifikasi dan uji akurasi yang terdiri dari 60 sampel *training area* dan 56 sampel *testing area* (Gambar 8).

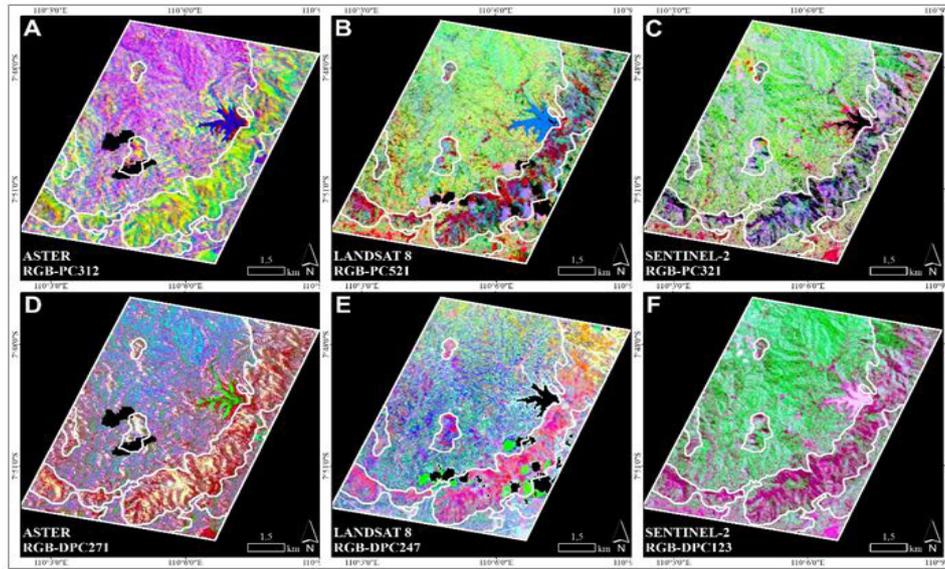
Hasil klasifikasi multispektral jenis litologi

Klasifikasi multispektral untuk memetakan jenis litologi dilakukan menggunakan input citra hasil transformasi PCA dan DPC dari citra ASTER, Landsat 8, dan Sentinel-2 yang telah diproses. Hasil klasifikasi multispektral dengan input saluran hasil PCA dan DPC citra ASTER, Landsat 8, dan Sentinel-2 memiliki kisaran akurasi keseluruhan antara 45,97% hingga 60,63% dengan nilai kappa berkisar dari 0,32

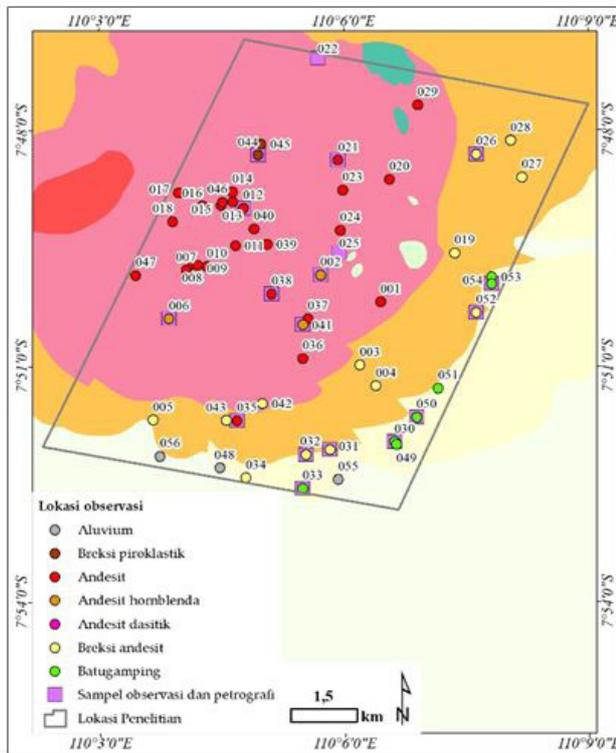
-0,47 (Tabel 10). Nilai ini tidak dapat diterima karena besar nilai akurasi dibawah 85% serta nilai kappa kurang dari 0,8. Nilai Z-statistic secara keseluruhan (23,57 – 69,4) melampaui nilai kritis Z pada tingkat kepercayaan 99% yaitu 2,58, mengindikasikan bahwa hasil klasifikasi ini lebih baik daripada klasifikasi acak.

Akurasi terbaik diberikan oleh kombinasi PCA

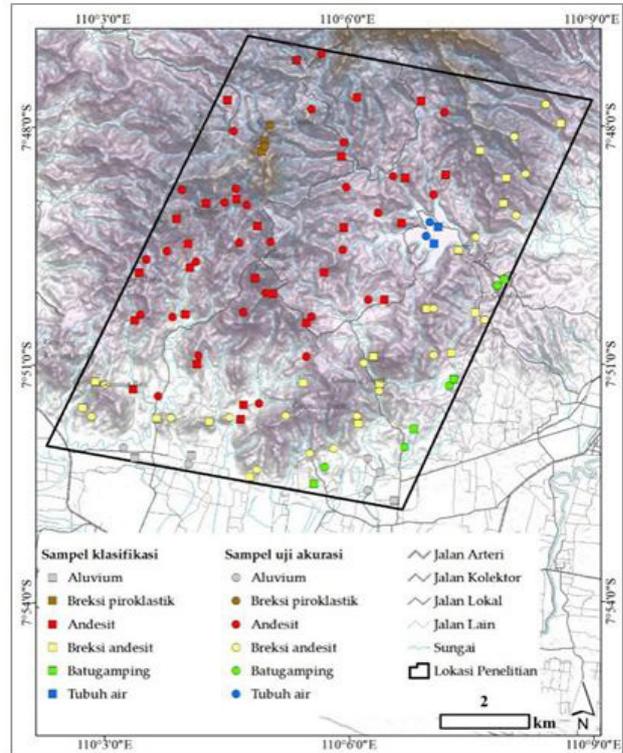
Landsat 8 (ditandai dengan huruf tebal pada Tabel 10) dengan akurasi keseluruhan 60.63% dan koefisien kappa 0.47 mengindikasikan hasil klasifikasi ini masuk dalam kategori kesesuaian menengah. Akurasi paling rendah dihasilkan oleh kombinasi DPC ASTER dengan akurasi keseluruhan hanya 45.97% dengan nilai kappa 0.32 yang masuk dalam tingkat kesesuaian rendah.



Gambar 6 Deliniasi citra PC dan DPC untuk mendapatkan peta tentatif jenis litologi



Gambar 7 Sebaran lokasi sampel observasi litologi dan analisis sayatan tipis dengan background Peta Geologi Lembar Yogyakarta (Rahardjo, dkk., 1995).



Gambar 8 Sebaran sampel klasifikasi dan uji akurasi jenis litologi

Tabel 9 Ringkasan hasil analisis petrografi sayatan tipis batuan

No	Kode sampel	Nama petrografi	Tekstur	Intensitas ubahan	Komposisi																
					Mineral primer										Mineral sekunder						
					Pgl	Px	Hbl	Qz	Fsp	Gls	Fo	Lit	Chl	Cal	Ser	Cm	Cb	Opq	Lm	Zeo	Qz
1	STA002	Andesit homblenda	Porfiritik	Sedang	★	-	★	●	-	-	-	-	-	-	-	★	★	+	-	●	●
2	STA006	Andesit homblenda	Intersertal	Sedang	★	-	★	-	-	-	-	-	★	-	-	-	●	+	-	-	●
3	STA012	Andesit homblenda	Porfiritik	Total	-	-	-	-	-	-	-	-	★	-	●	+	★	+	-	-	+
4	STA021	Andesit	Porfiritik	Total	+	-	-	-	-	-	-	-	★	-	-	★	★	+	-	●	+
5	STA022	Andesit	Porfiritik	Lemah	★	★	-	-	-	+	-	-	●	-	-	●	+	★	-	-	-
6	STA025	Andesit	Intergamular	Sedang	★	★	-	-	-	-	-	-	★	-	-	-	●	+	-	-	+
7a	STA026F	Andesit	Porfiritik	Segar	★	+	-	-	-	★	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
7b	STA026M	Vitric tuff	Klastik	Segar	★	+	-	-	-	★	●	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
8	STA030	Wackestone	Klastik	-	-	-	-	●	-	-	★	-	-	-	-	-	-	-	+	★	●
9a	STA031F	Andesit	Porfiritik	Sedang	★	★	-	-	-	-	-	-	★	-	-	★	-	-	+	-	-
9b	STA031M	Vitric tuff	Klastik	Segar	★	-	★	-	-	★	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
10	STA032	Andesit Homblenda	Porfiritik	Lemah	★	★	+	-	-	★	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-
11	STA033	Packstone	Klastik	-	-	-	-	-	-	★	-	-	-	★	-	-	-	-	★	-	-
12	STA035	Vitric tuff	Klastik	-	-	-	-	●	+	★	-	-	-	-	-	★	-	●	-	-	-
13	STA038	Andesit dasitik	Porfiroafanitik	Sedang	★	-	+	●	-	-	-	-	+	-	★	-	-	●	-	-	-
14	STA041	Andesit homblenda	Porfiritik	Kuat	★	-	●	-	-	-	-	-	★	-	-	-	★	+	-	-	★
15a	STA044F	Andesit homblenda	Afanitik	Lemah	★	-	●	-	-	★	-	-	-	-	-	-	+	●	-	-	-
15b	STA044M	Litric tuff	Klastik	-	-	-	-	●	★	★	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
16	STA050	Wackestone	Klastik	-	-	-	-	-	-	★	-	-	-	-	-	-	-	-	●	★	-
17	STA052	Andesite	Afanitik	Sedang	★	-	-	-	-	★	-	-	-	-	★	-	-	-	●	+	●
18	STA054	Packstone	Klastik	-	-	-	-	-	-	★	-	-	-	★	-	-	-	-	●	★	-

Kelimpahan mineral:

- ★ = Melimpah (>30%) ★ = Sedang (>10-20%) ● = Sangat jarang (<5%)
- ★ = Umum (>20-30%) + = Jarang (5-10%)

- Klasifikasi batuan beku: Streckeisen (1978) ▪ Klasifikasi batuan piroklastik: Fisher (1981) dan Pettijohn (1975)
- Klasifikasi batuan sedimen: Pettijohn (1975) ▪ Klasifikasi batugamping: Dunham (1962)

Notasi singkatan (abbreviation)

- Pgl ; Plagioklas
- Px ; Piroksen
- Hbl ; Hornblenda
- Opq ; Mineral opak
- Cb ; Karbonat
- Cm ; Mineral lempung
- Fsp ; Feldspar
- Chl ; Klorit
- Qz ; Kuarsa
- QzA ; Kuarsa Autigenik
- Lm ; Lumpur Karbonat
- Gls ; Gelas
- Mo ; Mouldic
- Cal ; Kalsit
- Vu ; Vuggy
- Fo ; Foraminifera
- Kmf ; Kumuloporfiritik
- Gmf ; Glomeroporfiritik
- Lit ; Litik
- Ser ; Serisit
- Zeo ; Zeolit

Tabel 10 Indikator statistik akurasi klasifikasi jenis Litologi Citra ASTER, Landsat 8, dan Sentinel-2

Kombinasi saluran	Akurasi (%)	Khat-statistic	Variance of Khat	Z-statistic
PCA ASTER	53,42%	0,38	0,000266	23,57
PCA Landsat 8	60,63%	0,47	0,000266	28,95
PCA Sentinel-2	52,74%	0,39	0,000032	69,40
DPC ASTER	45,97%	0,32	0,000197	22,63
DPC Landsat 8	56,32%	0,42	0,000245	26,53
DPC Sentinel-2	49,61%	0,35	0,000031	63,91

Data DEM SRTM selanjutnya dijadikan sebagai input tambahan pada proses klasifikasi multispektral. DEM yang digunakan telah disesuaikan dan direntangkan nilai *digital number*-nya pada skala 0-1 agar sama dengan nilai reflektan dari citra multispektral. Hasil klasifikasi multispektral dengan tambahan input Palsar DEM berhasil menaikkan nilai overall accuracy, KHAT-statistic (kappa coefficient), dan Z-statistic. Terbukti kisaran akurasi keseluruhan naik

menjadi 61,69% - 74,86% dengan nilai kappa berkisar dari 0,45 – 0,62 (Tabel 11) meskipun angka ini masih dianggap gagal karena dibawah batas yang ditentukan. Nilai Z-statistic secara keseluruhan melampaui nilai kritis Z pada tingkat kepercayaan 99% yaitu 2,58, mengindikasikan bahwa hasil klasifikasi ini lebih baik daripada klasifikasi acak. Kombinasi saluran terbaik masih diberikan oleh PCA Landsat 8 (ditandai dengan huruf tebal pada Tabel 11).

Tabel 11 Indikator statistik akurasi klasifikasi jenis litologi citra ASTER, Landsat 8, dan Sentinel-2 + DEM

Kombinasi saluran	Akurasi (%)	Khat-statistic	Variance of Khat	Z-statistic
PCA ASTER+DEM	68.52%	0.55	0.000074	63.35
PCA Landsat 8+DEM	74.86%	0.62	0.000076	70.85
PCA Sentinel-2+DEM	60.58%	0.46	0.000056	62.11
DPC ASTER+DEM	70.63%	0.57	0.000298	32.97
DPC Landsat 8+DEM	70.77%	0.57	0.000316	31.86
DPC Sentinel-2+DEM	61.69%	0.45	0.000046	65.76

Pemilihan peta jenis litologi

Peta klasifikasi jenis litologi yang dipilih adalah hasil klasifikasi dengan nilai *overall accuracy*, kappa coefficient, dan Z-statistic terbaik. Kombinasi PCA Landsat 8 + DEM merupakan input terbaik dalam klasifikasi multispektral jenis litologi. Hal ini ditunjukkan dengan nilai overall accuracy 74.86%, kappa coefficient sebesar 0.62, dan nilai Z-statistic 70.85. Tingkat keberhasilan klasifikasi dengan input PCA Landsat 8 + DEM masuk dalam kategori menengah ($0.4 < \text{kappa} < 0.8$) dengan nilai koefisien kappa sebesar 0.62.

Hasil klasifikasi multispektral tampak *overestimate* untuk jenis litologi batugamping, andesit, dan breksi andesit (Gambar 9A). Litologi batugamping muncul pada area yang berdasarkan observasi lapangan seharusnya memiliki litologi andesit. Jenis litologi andesit dan breksi andesit juga saling misclassification dan muncul pada lokasi yang tidak seharusnya. Perbandingan antara peta litologi hasil klasifikasi multispektral dari citra dan peta geologi regional dapat dilihat pada Gambar 9B.

Berdasarkan perbandingan, perbedaan yang signifikan adalah pada peta litologi hasil klasifikasi multispektral berhasil mendeteksi satu jenis litologi yang tidak terpetakan pada peta geologi regional, yaitu breksi piroklastik. Meski demikian, peta litologi hasil klasifikasi gagal dalam memetakan Formasi Nanggulan dan Formasi Jonggrangan. Kegagalan klasifikasi dalam menangkap anomali perbedaan litologi pada kedua formasi geologi tersebut dikarenakan dua faktor. Faktor pertama kegagalan klasifikasi dalam menangkap jenis litologi pada Formasi Nanggulan dikarenakan lokasi tersebut telah dibangun Waduk Sermo sehingga citra hanya dapat menangkap respon tubuh air. Faktor kedua kegagalan klasifikasi multispektral dalam memetakan Formasi Jonggrangan kemungkinan besar karena faktor tutupan vegetasi yang tinggi serta penghamparan Formasi Jonggrangan pada area penelitian yang kecil (tidak luas) sehingga respon spektralnya tidak tertangkap sensor.

DISKUSI (DISCUSSION)

Metode PCA dan DPC cukup berhasil memetakan perbedaan jenis litologi. Perpaduan citra hasil PCA dan DPC dengan *shaded relief* dari DEM memudahkan interpretasi batas perbedaan jenis litologi. Terbukti satu jenis litologi yakni breksi piroklastis berhasil didelineasi dari kombinasi ini. Dalam pemetaan litologi dengan citra penginderaan jauh, citra PCA dan DPC hanya sebatas dapat digunakan menentukan batas jenis litologi saja, sedangkan dalam menentukan jenis litologi diperlukan data pendukung lain, baik data primer maupun data sekunder.

Terdapat tiga hal yang perlu diperhatikan dalam interpretasi jenis litologi. Pertama bahwa proses interpretasi jenis litologi sangat tergantung *knowledge driven* pengguna (interpreter). Dalam menarik batas satuan dan menentukan jenis litologi bisa sangat subyektif. Pengetahuan dan pengalaman seorang interpreter terhadap kondisi dan fenomena geologi pada lokasi tersebut akan sangat berpengaruh pada hasil interpretasi.

Kedua, sangat penting untuk memiliki referensi yang cukup dalam menentukan jenis litologi suatu daerah. Tidak pernah dilakukan dan dibenarkan melakukan pemetaan jenis litologi secara otomatis dari citra tanpa adanya data pendukung lain. Hasil interpretasi jenis litologi dari citra PC menghasilkan tiga unit anomali satuan litologi yang dikelaskan sebagai litologi dasit. Hasil observasi lapangan dan pengamatan sayatan tipis sampel batuan menunjukkan hasil bahwa dua unit satuan litologi merupakan andesit dan satu unit litologi merupakan breksi piroklastik. Ketiga, dalam pengolahan citra digital untuk pemetaan mineral dan litologi pada vegetasi kerapatan tinggi harus berhati-hati dalam membaca nilai spektral.

Terdapat beberapa kemungkinan mengapa citra Landsat 8 memberikan nilai akurasi terbaik dalam klasifikasi multispektral jenis litologi dibandingkan citra ASTER dan Sentinel-2. Faktor pertama adalah sebaran sampel klasifikasi dan uji akurasi yang

kurang terdistribusi dengan baik, sehingga pada citra Sentinel-2 dan ASTER sampel yang sudah ditentukan kurang mewakili sebaran digital number obyek litologi.

Faktor kedua adalah aspek resolusi spasial citra. Apabila ditinjau dari aspek resolusi spasial, citra Landsat 8 memiliki resolusi spasial dan spektral paling rendah. Resolusi spasial Landsat 8 adalah 30 meter, sedangkan ASTER memiliki resolusi spasial 15 meter (VNIR) dan 30 meter (SWIR). Sentinel-2 memiliki resolusi spasial paling baik yakni 10 meter (VNIR) dan 20 meter (SWIR). Dengan resolusi spasial paling kecil, jumlah piksel pada seluruh area penelitian juga lebih sedikit sehingga berimbas pada perhitungan *confusion matrix*, dimana pembagi perhitungan lebih kecil.

KESIMPULAN

Enam jenis litologi (andesit, andesit basaltik, breksi andesit, breksi piroklastik, batugamping, dan

aluvium) dapat dideteksi dengan citra multispektral ASTER, Landsat 8, dan Sentinel-2. Akurasi terbaik dalam memetakan jenis litologi diberikan oleh kombinasi PCA saluran VNIR+SWIR citra Landsat 8+SRTM DEM dengan nilai *overall accuracy* sebesar 74.86% dan *kappa coefficient* 0,62. Data DEM secara signifikan berpengaruh meningkatkan nilai *overall accuracy* dan *kappa coefficient* klasifikasi multispektral. Dari perbandingan ketiga citra multispektral, citra Landsat 8 memiliki akurasi paling baik untuk jenis litologi di daerah penelitian. Secara umum tingkat akurasi pemetaan jenis litologi pada penelitian ini berada pada level menengah.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada kepada Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral atas bantuan yang diberikan baik dalam bentuk biaya, waktu, dan fasilitas yang disediakan dalam mendukung penelitian ini.

ACUAN (REFERENCES)

- Bachri, I.; Hakdaoui, M.; Raji, M.; Benbouziane, A.; Mhamdi, H.S., 2022, Identification of Lithology Using Sentinel-2A Through an Ensemble of Machine Learning Algorithms. *Int. J. Appl. Geospatial Res.* 2022, 13, 1–17.
- Bentahar, I., & Raji, M., 2020. Comparison of Landsat OLI, ASTER, and Sentinel 2A data in lithological mapping: A Case study of Rich area (Central High Atlas, Morocco). *Advances in Space Research.*
- Bronto, S., Budiadi, Ev., dan Hartono, H.G., 2004a, Permasalahan Geologi Gunungapi di Indonesia, *Majalah Geologi Indonesia*, 9, h.91-105.
- Congalton, R.G. and Green, K., 1999. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices, *Lewis Publishers, Boca Raton, FL*, 137 pp.
- Gasmi, A., Gomez, C., Zouari, H., Masse, A., 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*, vol 9:753
- Harjanto, A., 2008, Magmatisme dan mineralisasi di daerah Kulon Progo dan sekitarnya Jawa Tengah, Disertasi Doktor, *Institut Teknologi Bandung*, Bandung
- Haselwimmer, C.E., Riley, T.R. & Liu, J.G. In press., 2010, Lithologic mapping in the Oscar II Coast area, Graham Land, Antarctic Peninsula using ASTER data, *International Journal of Remote Sensing*.
- Kamel, M. Youssef, M., Hassan, M., Bagash, F., 2016, Utilization of ETM+ Landsat data in Geologic Mapping of Wadi Ghadir-Gabal Zabara area, Central Eastern Desert, Egypt, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 19: 343-360.
- Lehmann, E.L. and Casella, G., 1998, Theory of Point Estimation. 2nd Edition, *Springer*. New York.
- 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, & Rosidi, H.M.D., 1995, Peta Geologi Lembar Yogyakarta, Jawa, *Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi*, Bandung
- Shirmard, H.; Farahbakhsh, E.; Müller, R.D.; Chandra, R., 2022, A review of machine learning in processing remote sensing data for mineral exploration. *Remote Sens. Enviro*, 268, 112750.
- 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).

- Van Der Werff, H.M.A. and Van Der Meer, F.D., 2016. Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI Provide Data Continuity for Geological Remote Sensing, *Remote Sens.* 2016, 8, 883; doi:10.3390/rs8110883
- Wicaksono, P. & 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.
- Yao K, Idrees MO, Pradhan B, 2015, Mapping surface geologic formation under vegetation using landsat 8: Case study of gua musang gold field, Malaysia. *26th GRSG Annual Conference Challenges in Geological Remote Sensing.*