



ANALISIS DAN DELINEASI ZONA ALTERASI HIDROTERMAL MENGGUNAKAN CITRA LANDSAT 8 DAN PENDEKATAN STATISTIK THRESHOLD DI KOMPLEKS VULKANIK PATUHA, JAWA BARAT

ANALYSIS AND DELINEATION OF HYDROTHERMAL ALTERATION ZONES USING LANDSAT 8 IMAGES AND A THRESHOLD STATISTICAL APPROACH IN THE PATUHA VOLCANIC COMPLEX, WEST JAVA

Adang Saputra^{1*} dan Dadan Wildan¹

¹Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung

Korespondensi : adangs48@gmail.com

INFO ARTIKEL

ABSTRAK

Kata Kunci:

Panas bumi, Patuha, alterasi hidrotermal, Landsat 8, threshold statistic

Identifikasi zona alterasi hidrotermal merupakan tahapan penting dalam eksplorasi panas bumi dan mineralisasi epiterma. Penelitian ini bertujuan mendelineasi zona alterasi di Kompleks Vulkanik Patuha, Jawa Barat, menggunakan citra Landsat 8 berbasis rasio SWIR1/SWIR2 (Band 6/Band 7) dan pendekatan statistik Mean $\pm$ Standar Deviasi ($\mu \pm \sigma$) untuk menentukan threshold klasifikasi secara objektif. Analisis raster menghasilkan nilai rata-rata (μ) sebesar 2,323 dan standar deviasi (σ) sebesar 0,282 dengan karakter distribusi skewness -1,485 dan kurtosis 3,017. Berdasarkan pendekatan tersebut, zona alterasi diklasifikasikan menjadi empat kelas, yaitu batuan segar, alterasi lemah, alterasi sedang, dan alterasi kuat. Hasil menunjukkan bahwa alterasi sedang mendominasi 53,95% wilayah penelitian, sedangkan alterasi kuat menempati 7,67%. Analisis histogram dan CDF menunjukkan konsistensi antara distribusi empiris piksel dan batas statistik $\mu \pm \sigma$. Hasil penelitian menegaskan bahwa pendekatan threshold

ARTICLE INFO

Keywords:

Geothermal, Patuha,
Hydrothermal alteration,
SWIR, Landsat 8,
Statistical thresholding.

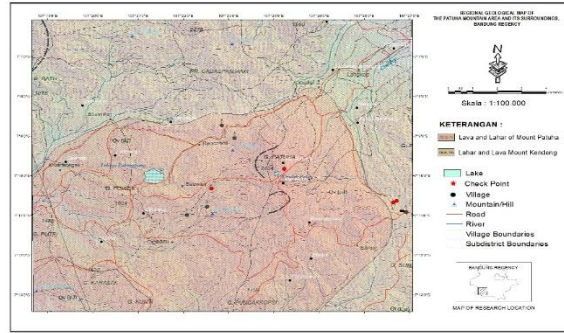
ABSTRACT

The identification of hydrothermal alteration zones constitutes a critical stage in geothermal and epithermal mineral exploration. This study aims to delineate alteration zones within the Gunung Patuha volcanic complex, West Java, Indonesia, using Landsat 8 imagery based on the SWIR1/SWIR2 band ratio (Band 6/Band 7). A statistical Mean $\pm$ Standard Deviation ($\mu \pm \sigma$) approach was applied to determine classification thresholds objectively. Continuous ratio raster analysis produced a mean (μ) value of 2.323 and a standard deviation (σ) of 0.282. The distribution exhibits slight negative skewness (-1.485) and a kurtosis value of 3.017, indicating a leptokurtic pattern. Based on this statistical framework, four alteration classes were defined: fresh rock (<2.041), weak alteration (2.041–2.323), moderate alteration (2.323–2.606), and strong alteration (>2.606). The classification results indicate that moderate alteration dominates 53.95% of the study area ($\pm 11,377$ ha), while strong alteration occupies 7.67% ($\pm 1,618$ ha). Histogram and Cumulative Distribution Function (CDF) analyses demonstrate consistency between the empirical pixel distribution and the statistical $\mu \pm \sigma$ thresholds. These findings confirm that a distribution-based thresholding method is objective, reproducible, and effective for regional-scale mapping of hydrothermal systems in volcanic terrains.

I. PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada zona subduksi aktif yang menghasilkan sistem magmatik dan hidrotermal luas. Kompleks Gunung Patuha di Jawa Barat. Secara geologi (Gambar 1), wilayah ini memiliki karakteristik khas yang menarik minat penulis untuk melakukan penelitian di daerah tersebut. Salah satu ciri utamanya adalah adanya manifestasi panas bumi yang tersebar di berbagai lokasi di kawasan Gunung Patuha, termasuk kemunculan mata air panas, fumarola, dan batuan yang mengalami alterasi hidrotermal. Secara geologi, daerah penelitian tersusun atas batuan vulkanik berumur Tersier hingga Kuartar (M. Koesmono, dkk., 1996).

Sistem hidrotermal yang berkembang menghasilkan alterasi mineral yang dapat dideteksi secara spektral. Alterasi hidrotermal sendiri merupakan proses yang mengubah mineral primer menjadi mineral sekunder yang lebih stabil di kondisi tertentu (Pirajno, 2009). Alterasi hidrotermal dihaikan dari erupsi gunung api yang telah berumur Tersier – Kuartar, biasanya di dominasi batuan dan mineral yang ada pada lapangan panas bumi. (Wohletz dan Heiken, 1992).



Gambar 1. Peta Geologi Regional daerah Penelitian (M. Koesmono, dkk., 1996)

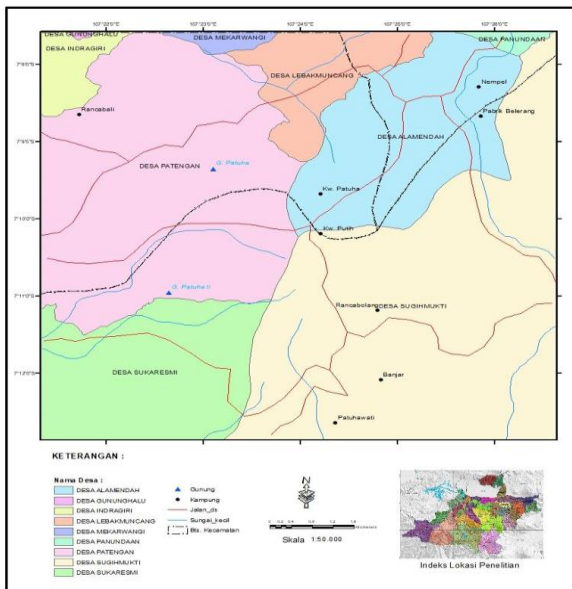
Pada proses alterasi hidrotermal, fluida geotermal bereaksi dengan batuan pada kondisi suhu dan pH tertentu sehingga mengubah mineral primer menjadi mineral sekunder yang lebih stabil. Mineral-mineral primer umum dijumpai pada daerah batuan vulkanik dan mineral alterasinya adalah gelas vulkanik, Ilmenit, Magnetit, Olivin, Piroksen, Amfibol, Plagioklas, K Feldspar, dan Kuarsa, dengan mineral hasil alterasi hidrotermal yang dapat dijumpai antara lain Zeolit, Kristobalit, Kuarsa, Kalsit, Pirit, Hematit, Klorit, Epidot, Albit, Adularia, Illit, Sphene, dan lain-lain. (Wohletz dan Heiken, 1992; Lagat, 2009).

Pendekatan band ratio SWIR banyak digunakan untuk mendeteksi mineral lempung, namun penentuan threshold sering subjektif. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan pendekatan statistik distribusi piksel.

Dalam menentukan threshold digunakan

metode Mean $\pm$ Standar Deviasi (Std Dev) untuk menghitung rasio Band 6/Band 7, sehingga setiap piksel memiliki nilai rasio. Metode ini banyak digunakan dalam analisis citra seperti Landsat 8 karena objektif dan berbasis statistik distribusi nilai piksel.

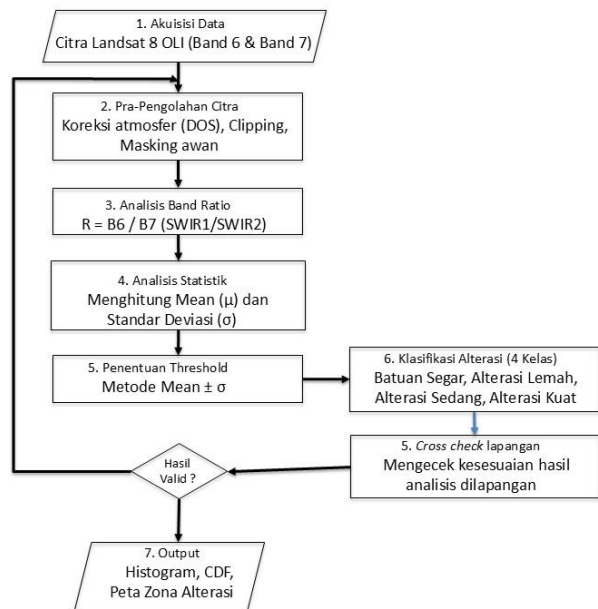
Lokasi penelitian berada di wilayah Kecamatan Ciwidey, yang masuk kedalam Administrasi Kabupaten Bandung, dengan posisi koordinat berada pada 107°21' 20" BT 107°26' 36" dan -7°07' 36" LS- 7°12' 51" LS. Lebih jelasnya lokasi penelitian tersebut dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Lokasi Penelitian di Gunung Kawasan Patuha dan Sekitarnya, Kab. Bandung

II. METODE PENELITIAN

Kegiatan penelitian di atas dapat dilihat pada diagram alir yang disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Dari diagram alir di atas, tahapan penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Akuisisi Data

Penelitian ini menggunakan citra satelit Landsat 8 OLI, khususnya Band 6 (SWIR1) dan Band 7 (SWIR2), karena panjang gelombang SWIR memiliki sensitivitas tinggi terhadap mineral alterasi hidrotermal, seperti kaolinit, illit, smektit, dan alunit. Perbedaan karakteristik reflektansi mineral-mineral tersebut pada spektrum SWIR menjadikan band ini efektif untuk mendeteksi zona alterasi.

2. Pra-Pengolahan Citra

Tahapan ini dilakukan untuk meningkatkan kualitas dan akurasi data sebelum tahap analisis, sebagai berikut :

- a. Koreksi Atmosfer (Metode DOS – Dark Object Subtraction)
Mengurangi pengaruh atmosfer (kabut, aerosol, uap air) agar nilai piksel mendekati reflektansi sebenarnya.
- b. Clipping
Memotong citra sesuai batas wilayah penelitian (Gunung Patuha).
- c. Masking Awan
Menghilangkan piksel awan dan bayangan awan agar tidak mengganggu analisis rasio.

3. Analisis Band Ratio

Band Rasio (R) yang digunakan dalam deliniasi alterasi mineral ini ada dengan $R = \frac{B6}{B7}$ Memanfaatkan B6/B7 dikarenakan Mineral alterasi (khususnya lempung hidrotermal) memiliki reflektansi lebih tinggi di SWIR1 dibanding SWIR2, Nilai rasio tinggi mengindikasikan zona alterasi, Nilai rasio rendah kemungkinan merupakan batuan segar. Hasilnya berupa citra raster rasio.

4. Analisis Statistik

Dilakukan perhitungan Mean (μ) yang merupakan nilai rata-rata piksel dan Standar

Deviasi (σ) yang merupakan tingkat penyebaran data. Tujuan adalah mengetahui distribusi nilai rasio, dan sebagai dasar penentuan ambang batas klasifikasi

5. Penentuan Threshold (Ambang Batas)

Dari seluruh piksel, kita hitung Mean (μ) yang merupakan rata-rata nilai dan Standar Deviasi (σ) merupakan tingkat penyebaran data. Rumus Statistik untuk Mean dan Standar Deviasi yang digunakan adalah sebagai berikut :

Mean (μ) = $\frac{\sum x_i}{n}$ di mana: x_i = nilai rasio tiap piksel, n = jumlah piksel

Standar Deviasi (σ) = $\sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n}}$

Standar deviasi menunjukkan seberapa jauh data menyebar dari rata-rata. Setelah diperoleh μ dan σ , maka kelas dapat ditentukan, dimana dalam hal ini di klasifikasikan menjadi 4 (empat) kelas sebagai berikut:

Kelas	Rumus	Interpretasi
Sangat rendah	$< \mu - \sigma$	Batuan segar
Rendah	$\mu - \sigma$ s/d μ	Alterasi lemah
Sedang	μ s/d $\mu + \sigma$	Alterasi sedang
Tinggi	$> \mu + \sigma$	Alterasi kuat

6. Klasifikasi (4 Kelas Zona Alterasi)

Hasil raster rasio diklasifikasikan menjadi 4 (empat) kelas sebagai berikut :

1. Batuan Segar
2. Alterasi Lemah
3. Alterasi Sedang
4. Alterasi Kuat

Output berupa peta zonasi alterasi hidrotermal.

7. Validasi

Validasi dilakukan untuk mengecek kesesuaian hasil analisis (Histogram, CDF (Cumulative Distribution Function), dan pemetaan alterasi dari citra dengan metoda Threshold pada Band Rasio yang dihasilkan sudah sesuai dengan kondisi dilapangnya. CDF memvalidasi posisi threshold terhadap distribusi kumulatif piksel. Nilai P16 dan P84 mendekati $\mu \pm \sigma$, menunjukkan konsistensi distribusi empiris dengan teori probabilitas (Ross, 2014). Pendekatan statistik untuk deteksi anomali spektral juga telah diterapkan dalam sistem multi-band (Reed & Yu, 1990).

8. Output (Hasil)

Produk akhir (Output)) yang diperoleh dari analisis dan pemetaan alterasi berupa Peta klasifikasi 4 kelas, Luas tiap zona, Layout lengkap (legenda, skala, koordinat).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

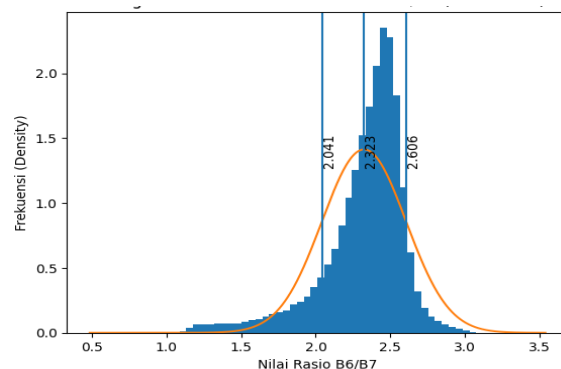
1. Analisis Histogram dan Kurva Normal

Statistik raster kontinu dari citra daerah penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Statistik Deskriptif Citra daerah Penelitian

Parameter	Nilai
Mean (μ)	2,323
Std Dev (σ)	0,282
Varians	0,0797
Skewness	-1,485
Kurtosis	3,017
Minimum	0,626
Maximum	3,399

Nilai threshold: $\mu - \sigma = 2,041$; $\mu = 2,323$; $\mu + \sigma = 2,606$. Pendekatan ini mencakup $\pm 68\%$ populasi piksel dalam rentang $\mu \pm \sigma$, hal ini sejalan dengan konsep klasifikasi berbasis distribusi spektral (Richards, 2013; Jensen, 2015). Lebih jelasnya dari proses di atas dapat dilihat pada histogram dan Kurva Normal dari raster daerah penelitian (Band Rasio B6/B7), seperti terlihat pada Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. Histogram dan Kurva Normal Rasio B6/B7 dari Raster daerah penelitian

Histogram rasio B6/B7 di atas menunjukkan distribusi mendekati normal, namun dengan kemencengan negatif (skewness -1.485). Hal ini mengindikasikan adanya akumulasi nilai tinggi (zona alterasi sedang–kuat) yang lebih dominan dibanding nilai rendah. Nilai kurtosis > 3 menunjukkan distribusi leptokurtik, yaitu puncak lebih tajam dibanding distribusi normal teoritis.

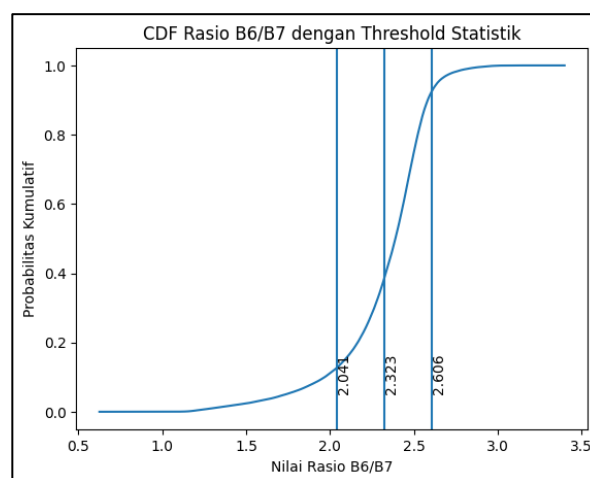
Garis vertikal μ (2,323) pada histogram merepresentasikan nilai rata-rata (*mean*) seluruh populasi piksel yang dihitung dari rasio jumlah total nilai piksel terhadap jumlah data. Nilai ini berperan sebagai pusat distribusi data dan digunakan sebagai acuan dalam penentuan batas klasifikasi alterasi dengan metode *Mean $\pm$ Standar Deviasi* (2.606).

2. Analisis Cumulative Distribution Function (CDF)

CDF menunjukkan kurva sigmoid dengan kemiringan paling tajam pada interval 2,2–2,6, menandakan konsentrasi piksel pada zona alterasi sedang. Persentil penting: $P_{16} \approx 2,106$; Median (P_{50}) $\approx 2,390$; $P_{84} \approx 2,544$. Nilai P_{16} dan P_{84} konsisten dengan $\mu \pm \sigma$, memperkuat validitas pendekatan statistik.

Hasil CFD selanjutnya di overlaykan dengan *Threshold* statistik, sehingga di hasil

grafik seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik CDF Rasio B6/B7 dengan *Threshold* Statistik

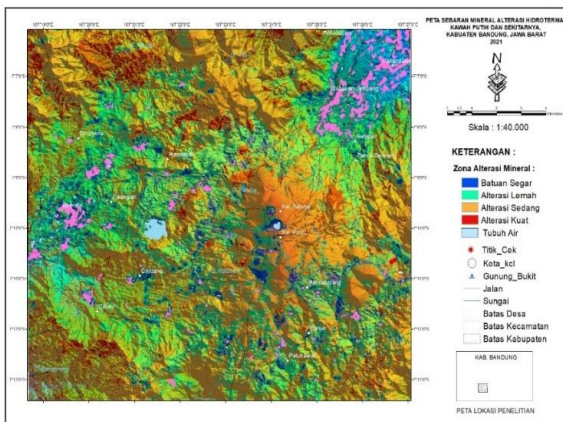
Kurva CDF memperlihatkan distribusi kumulatif nilai rasio B6/B7 yang meningkat tajam pada interval 2,2–2,6, menunjukkan konsentrasi piksel dominan pada zona alterasi sedang. Garis vertikal μ (2,323) berada pada probabilitas kumulatif sekitar 0,39–0,40, mencerminkan distribusi yang sedikit miring ke kiri (negative skewness).

Batas $\mu - \sigma$ (2,041) berada pada probabilitas kumulatif rendah ($\sim 0,13$), sedangkan $\mu + \sigma$ (2,606) berada pada probabilitas kumulatif tinggi ($\sim 0,90$). Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar piksel berada dalam rentang μ hingga $\mu + \sigma$, memperkuat dominasi kelas alterasi sedang.

Kesesuaian posisi $\mu \pm \sigma$ pada CDF menegaskan bahwa pendekatan *Mean $\pm$ Standar Deviasi* konsisten dengan distribusi empiris data raster.

3. Klasifikasi Zona Alterasi

Hasil pengolahan spasial dan statistik zona alterasi dengan pendekatan threshold berbasis Mean $\pm$ Standar Deviasi (Mean $\pm$ σ) dibagi kedalam 4 zona (empat) kelas Zona Alterasi Mineral seperti disajikan pada Gambar 5 di bawah ini untuk sebaran alterasinya. Sedangkan statistik Alterasinya dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini.



Gambar 4. Peta Sebaran Alterasi Mineral Kawasan Gn. Patuha dan sekitarnya

Tabel 2. Kelas Zona Alterasi daerah penelitian

Kls	Rentang Threshold	Interpretasi	Karakter Geologi	Luas (ha)	%
I	<2,041	Batuan segar	Mineral primer dominan, sedikit pelapukan	2.68	12,72
II	2,041–2,323	Alterasi lemah	Awal perubahan mineral, clay minor	5.41	25,67
II I	2,323–2,606	Alterasi sedang	Mineral lempung mulai dominan (illite/kaolinite)	11.38	53,95

I V	>2,606	Alterasi kuat	Zona hidrotermal intens, clay & Fe-oxide tinggi	1.62	7,67
-----	--------	---------------	---	------	------

Total luas: 21.089 ha.

Dari Peta sebaran dan Tabel 2 Alterasi sedang mendominasi wilayah, menunjukkan sistem hidrotermal berkembang luas. Zona alterasi kuat berasosiasi dengan kontrol struktur dan manifestasi permukaan.

Zona alterasi kuat berasosiasi dengan struktur dan manifestasi permukaan. Pola ini konsisten dengan penelitian pemetaan alterasi berbasis Landsat pada sistem hidrotermal lain (Pour & Hashim, 2015; Rajendran et al., 2017).

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis citra satelit dan pengolahan statistik yang dilakukan pada kawasan vulkanik Gunung Patuha, penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan penginderaan jauh menggunakan rasio spektral SWIR1/SWIR2 (Band 6/Band 7) dari citra Landsat 8 mampu mengidentifikasi dan mendelineasi zona alterasi hidrotermal secara efektif pada skala regional. Metode ini memanfaatkan perbedaan karakteristik reflektansi mineral alterasi, khususnya mineral lempung hidrotermal seperti kaolinit, illit, dan smektit yang memiliki respon spektral khas pada panjang gelombang

SWIR, sehingga dapat digunakan sebagai indikator keberadaan sistem hidrotermal di daerah vulkanik.

Pendekatan statistik berbasis Mean $\pm$ Standar Deviasi ($\mu \pm \sigma$) terbukti memberikan dasar klasifikasi yang objektif dalam menentukan ambang batas (threshold) zonasi alterasi. Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa distribusi nilai rasio piksel memiliki rata-rata sebesar 2,323 dengan standar deviasi 0,282 serta memperlihatkan karakter distribusi yang sedikit miring ke kiri dengan nilai skewness negatif dan kurtosis yang bersifat leptokurtik. Pola distribusi ini mengindikasikan dominasi nilai rasio yang relatif tinggi yang berkaitan dengan keberadaan zona alterasi hidrotermal. Validasi menggunakan histogram dan kurva Cumulative Distribution Function (CDF) juga menunjukkan bahwa batas klasifikasi $\mu - \sigma$ dan $\mu + \sigma$ konsisten dengan distribusi empiris piksel, sehingga pendekatan statistik yang digunakan dapat dianggap representatif dalam memisahkan kelas alterasi.

Hasil klasifikasi spasial menunjukkan bahwa zona alterasi sedang merupakan kelas yang paling dominan dengan luasan sekitar 53,95% dari total wilayah penelitian yang mengindikasikan bahwa sistem hidrotermal di kawasan Gunung Patuha berkembang cukup luas. Sementara itu, zona alterasi kuat

menempati sekitar 7,67% wilayah dan umumnya berasosiasi dengan kontrol struktur geologi serta manifestasi panas bumi di permukaan seperti fumarola dan area kawah. Sebaran zona alterasi yang dihasilkan menunjukkan keterkaitan yang baik dengan karakter geologi kawasan vulkanik serta potensi sistem panas bumi yang berkembang di daerah tersebut.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa metode threshold berbasis distribusi statistik piksel pada citra Landsat 8 merupakan pendekatan yang objektif, replikatif dan efisien untuk pemetaan awal zona alterasi hidrotermal. Integrasi analisis spektral dan statistik memberikan kerangka interpretasi yang kuat dalam mendukung kegiatan eksplorasi panas bumi maupun mineralisasi hidrotermal, khususnya pada wilayah vulkanik yang luas dan sulit dijangkau melalui survei lapangan secara langsung. Pendekatan ini juga memiliki potensi untuk diterapkan pada wilayah prospek panas bumi lainnya di Indonesia guna meningkatkan efisiensi tahap eksplorasi awal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada Dewan Editor dan Reviewer Jurnal *Applied Geo-mining and*

Metallurgy atas kesempatan, arahan serta masukan konstruktif yang sangat membantu dalam penyempurnaan naskah ini.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada United States Geological Survey (USGS) yang telah menyediakan data citra satelit Landsat 8 secara terbuka dan gratis, sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik. Ketersediaan data penginderaan jauh yang andal dan berkelanjutan sangat mendukung pengembangan penelitian geosains di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Browne, P. R. L. (1970). Hydrothermal Minerals as an Aid in Investigating Geothermal Field. *Journal of Geothermics*, 2(1), 564-570.
- Browne, P. R. L. (1998). Hydrothermal Alteration. Geothermal Institute: The University of Auckland.
- Crosta, A. P., & Moore, J. M. (1989). Enhancement of Landsat TM data for regional alteration mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 10(4-5), 915-924.
- Koesmono, M., Kusnama, dan Suwarna, N. (1996). *Peta Geologi Lembar Sindangbarang dan Bandarwaru, Jawa, Skala 1:100.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Direktorat Jenderal Geologi dan Sumberdaya Mineral, Departemen Pertambangan dan Energi, Bandung, Jawa Barat.
- Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer.
- Jensen, J. R. (2015). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4th ed.). Pearson.
- Lagat, J. (2009). *Hydrothermal Alteration Mineralogy in Geothermal Fields with Case Examples from Olkaria Domes Geothermal Field, Kenya*. Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, organized by UNU-GTP, KenGen and GDC, Lake Naivasha, Kenya.
- Pour, A. B., & Hashim, M. (2015). Hydrothermal alteration mapping using Landsat-8 data. *Ore Geology Reviews*, 65, 1-10.
- Rajendran, S., et al. (2017). Hydrothermal alteration mapping using remote sensing techniques. *Journal of African Earth Sciences*, 128, 60-72.
- Reed, I. S., & Yu, X. (1990). Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal*

Processing, 38(10), 1760–1770.

Richards, J. A. (2013). *Remote sensing digital image analysis* (5th ed.). Springer.

Ross, S. M. (2014). *Introduction to probability and statistics for engineers and scientists* (5th ed.). Academic

Press.

Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14(3–4), 157–183.

Wohletz, K., & Heiken, G. (1992). *Volcanology and Geothermal Energy*. University of California Press.