

## Pemetaan Permeabilitas Magnetik Permukaan Berbasis Citra SAR Polarimetrik dengan Pengukuran *In Situ* di Lapangan Gunung Api

Asep Saepuloh<sup>1\*</sup>, Edo Kharisma Army<sup>2</sup>, Zaki Hilman<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, ITB, Jl. Ganesha No. 10, Bandung, Jawa Barat, Indonesia, 40132

<sup>2</sup> Jurusan Teknik Manufaktur dan Kebumian, ITERA, Jl. Terusan Ryacudu, Lampung, Indonesia. 35365

<sup>3</sup> PT Voith Paper Rolls Indonesia, Jl. Permata V Lot EE-1, Karawang, Jawa Barat, Indonesia. 41361.

**ABSTRAK** Pemetaan parameter fisis berupa permeabilitas magnetik permukaan pada zona lemah yang terkait dengan aktivitas tektonik maupun vulkanik perlu dilakukan seiring dengan meningkatnya aktivitas kegempaan maupun kegunungapian dalam beberapa tahun terakhir. Pendeteksian keberadaan zona lemah umumnya dilakukan berdasarkan parameter kelurusan struktur geologi, reflektansi spektra, dan temperatur permukaan dengan memanfaatkan citra satelit optis. Makalah ini mengolah parameter yang berbeda berupa permeabilitas magnetik permukaan ( $\mu_r$ ), yaitu parameter fisis yang diturunkan dari citra satelit *Polarimetric Synthetic Aperture Radar* (PolSAR) dengan polarisasi penuh (*quad-polarization*) dan diverifikasi dengan pengukuran *in situ*. Parameter  $\mu_r$  permukaan merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan zona lemah jalur fluida termal dari bawah sampai ke permukaan gunung api aktif. Aktivitas hidrotermal mengakibatkan degradasi nilai magnetik batuan di sekitarnya, sehingga ekstraksi nilai permeabilitas magnetik permukaan  $\mu_r$  dianggap sangat efektif untuk mengidentifikasi jalur fluida termal di permukaan. Modifikasi pada metode *dielectric from Polarimetric Synthetic Aperture Radar* (dPSAR) menggunakan citra PolSAR dilakukan untuk mendapatkan parameter permeabilitas magnetik permukaan  $\mu_r$ , yaitu kemampuan permukaan tanah dalam menerima respon medan magnet, disamping permitivitas dielektrik  $\epsilon_r$ . Pengukuran  $\mu_r$  *in situ* di lapangan

menggunakan alat ukur *Ferromaster Magnetic Permeability Meter* dilakukan untuk menganalisis tingkat akurasi  $\mu_r$  dari hasil inversi dPSAR. Berdasarkan uji validasi, nilai koefisien determinasi  $R^2$  yang diperoleh cukup tinggi, yaitu sekitar 0,73 antara  $\mu_r$  hasil dPSAR dan pengukuran lapangan. Selain itu, hasil uji normalitas menunjukkan nilai residual antara keduanya terdistribusi normal. Hal ini mengindikasikan bahwa pendeteksian  $\mu_r$  dengan metode dPSAR memiliki potensi untuk dikembangkan dan diaplikasikan lebih lanjut dalam pemetaan fisis geologi di permukaan.

**Kata kunci:** citra satelit, dpSAR, geologi, permeabilitas magnetik, termal.

**ABSTRACT** *Surface Magnetic Permeability Mapping Using SAR Polarimetric and In Situ Measurement at Volcanic Field.* Physical parameters mapping of surface magnetic permeability in weak zones associated with tectonic and volcanic activity is necessary due to the increasing seismic and volcanic activity in recent years. Typically, weak zones are detected from lineament related geological structures, reflectance spectra, and surface temperature visually on optical satellite images. This paper processed a different physical parameter of surface magnetic permeability ( $\mu_r$ ) derived from the Polarimetric Synthetic Aperture Radar (PolSAR) quad-polarization satellite image which was verified by field measurement. The  $\mu_r$  was used to identify the weak zones connected to the fluid path of the subsurface hydrothermal system of an active volcano. The activity of hydrothermal fluids through the weak zones is responsible for the degradation of the magnetic permeability of the host rocks so that extracting  $\mu_r$  is effective in identifying fluid path at the surface. A modification has been applied to the

---

Naskah masuk : 13 Maret 2020  
Naskah direvisi : 6 Juni 2020  
Naskah diterima : 9 Juni 2020

---

\*Penulis korespondensi.  
Email: saepuloh@gl.itb.ac.id

*dielectric from Polarimetric Synthetic Aperture Radar (dPSAR) method using the PolSAR image by inverting the  $\mu_r$ , in addition to  $\epsilon_r$  parameters, that served as capability of the ground surface responds to the magnetic field. Measurement of  $\mu_r$  in the field using Ferromaster Magnetic Permeability Meter was carried out to analyze the accuracy of the inverted  $\mu_r$  from the dPSAR method. According to the validation test of  $\mu_r$  derived from dPSAR and field measurement, a high coefficient determination  $R^2$  about 0.73 was achieved. In addition, the normality test showed that residual values were distributed normally. Therefore, the  $\mu_r$  inversion using dPSAR method has the potential to be developed and applied for advanced physical surface geological mapping.*

**Keywords:** satellite image, dPSAR, geology, magnetic permeability, thermal.

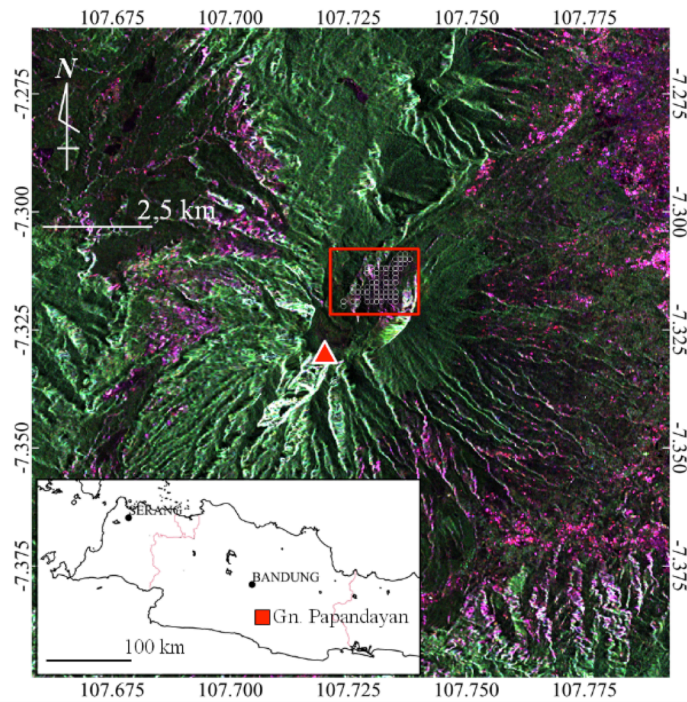
## PENDAHULUAN

Struktur geologi yang ditandai dengan keberadaan sesar, kekar, breksiasi, bidang perlapisan, dan zona hancuran dapat berperan sebagai jalur fluida panas dalam reservoir bertekanan tinggi sekitar 76 MPa untuk sampai ke permukaan bumi (Árpási et al., 2000; Hanano, 2004; Bixley et al., 2009). Fluida panas dari sistem hidrotermal ataupun magmatisme bermigrasi dari reservoir ke permukaan akibat adanya zona lemah yang tampak sebagai manifestasi dari sistem yang ada di bawah permukaan. Zona lemah yang bersifat permeabel akibat keberadaan struktur geologi tersebut dapat mengontrol keberadaan fitur panas bumi di permukaan maupun aktivitas gunung api (Gaffney et al., 2007; Saepuloh et al., 2018). Perpindahan fluida terkait magmatisme melalui zona lemah dengan permeabilitas rekahan tinggi ke dekat permukaan dapat juga dimanifestasikan dengan keberadaan deformasi di permukaan (Gudmundsson and Loetveit, 2005; Saepuloh et al., 2013). Identifikasi zona lemah yang terkait dengan rekahan batuan yang terhubung dengan rekahan-rekahan berskala kecil turut menentukan keberhasilan penentuan permeabilitas suatu reservoir panas bumi (Dezayes et al., 2010). Terlebih untuk lapangan panas bumi yang berada

di rezim tektonik aktif, permeabilitas rekahan sangat mengontrol aliran fluida termal dibandingkan dengan permeabilitas batuan di sekitarnya (Jafari and Babadagli, 2011). Tidak hanya reservoir batuan dasar, permeabilitas rekahan dalam reservoir batuan vulkanik tua berumur Kuartar juga menentukan sirkulasi fluida termal di bawah permukaan (La Felice et al., 2014). Selain mengontrol jalur fluida termal, zona lemah juga berperan dalam mekanisme pembentukan jalur perpindahan magma gunung api aktif dari reservoir dalam ke dangkal (Kilburn and Voight, 1998). Oleh sebab itu, pengidentifikasian zona lemah di lapangan gunung api menggunakan parameter magnetik permukaan dengan metode penginderaan jarak jauh diperlukan, baik untuk keperluan eksplorasi panas bumi maupun keperluan kebencanaan gunung api aktif.

Fisis permukaan yang biasa digunakan untuk mendeteksi zona lemah berbasis data citra satelit umumnya berupa kelurusan struktur geologi (Haeruddin et al., 2016; Saepuloh et al., 2018). Hasil pengecekan lapangan menunjukkan bahwa struktur geologi dengan rezim regangan dan rekahan-rekahan yang menyertainya berperan penting sebagai jalur migrasi fluida ke permukaan (Kurniawahidayati et al., 2017; Kurniawahidayati, 2018).

Spektra reflektansi saluran merah dan inframerah dari cekaman vegetasi di permukaan dapat juga digunakan sebagai indikator dari keberadaan fluida termal yang bermigrasi melalui zona lemah sampai ke lapisan tanah yang ditumbuhi tanaman (Susantoro, 2019). Tetapi, heterogenitas vegetasi yang tumbuh di zona lemah menyebabkan pendeteksian sulit dilakukan untuk semua lokasi. Untuk mengatasi kendala-kendala tersebut, identifikasi kemungkinan keberadaan zona lemah dilakukan menggunakan parameter magnetik permukaan karena parameter ini sensitif terhadap panas dan independen terhadap tingkat kebasahan material (Saepuloh et al., 2017). Sehingga parameter magnetik permukaan tersebut memiliki potensi untuk digunakan di lapangan beriklim tropis dengan tingkat tutupan kanopi vegetasi yang lebat dan kelembapan tanah yang tinggi.



Gambar 1. Lokasi penelitian berlatar komposit citra ALOS-2 PALSAR-2 polarimetri R,G,B=HH, HV, VV berada di Gunung Papandayan, Garut, Jawa Barat yang ditandai dengan segitiga merah dan area pengukuran permabilitas magnetik pada kotak merah.

## METODE DAN DATA CITRA

Nilai kemagnetan permukaan biasanya diperoleh dengan pengukuran langsung di lapangan, tetapi untuk efektivitas, nilai kemagnetan bisa diturunkan dari citra satelit meskipun memerlukan metode yang cukup kompleks, yaitu dengan pemilihan dan pemrosesan citra yang sesuai. Metode *dielectric from Polarimetric Synthetic Aperture Radar* (dPSAR) digunakan untuk menurunkan parameter permeabilitas magnetik  $\mu_r$  selain juga permitivitas dielektrik  $\epsilon_r$  permukaan (Saepuloh *et al.*, 2015). Dalam

makalah ini, parameter  $\mu_r$  dicoba untuk dimasukkan ke dalam proses inversi dPSAR, kemudian hasilnya divalidasi dengan data pengukuran *in situ* di lapangan. Kesesuaian hasil antara nilai  $\mu_r$  dari dPSAR dengan pengukuran *in situ* menggunakan alat ukur permeabilitas magnetik permukaan Ferromaster dinyatakan sebagai koherensi deteksi.

Data citra PolSAR yang digunakan berasal dari citra ALOS-2 (*Advanced Land Observing Satellite 2*) PALSAR-2 (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar 2*). ALOS

$$\gamma_{HH}^0 = \frac{(4k^4 h_0^2 \cos^4 \theta_i) |(\mu_r - 1)[(\epsilon_r \mu_r - \sin^2 \theta_i) + \mu_r \sin^2 \theta_i] + \mu_r^2 (\epsilon_r - 1)|^2 W(x, y)}{[\pi(\mu_r \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r \mu_r - \sin^2 \theta_i})^4]} \quad (1)$$

$$\gamma_{VV}^0 = \frac{(4k^4 h_0^2 \cos^4 \theta_i) |(\epsilon_r - 1)[(\epsilon_r \mu_r - \sin^2 \theta_i) + \epsilon_r \sin^2 \theta_i] + \epsilon_r^2 (\mu_r - 1)|^2 W(x, y)}{[\pi(\epsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r \mu_r - \sin^2 \theta_i})^4]} \quad (2)$$

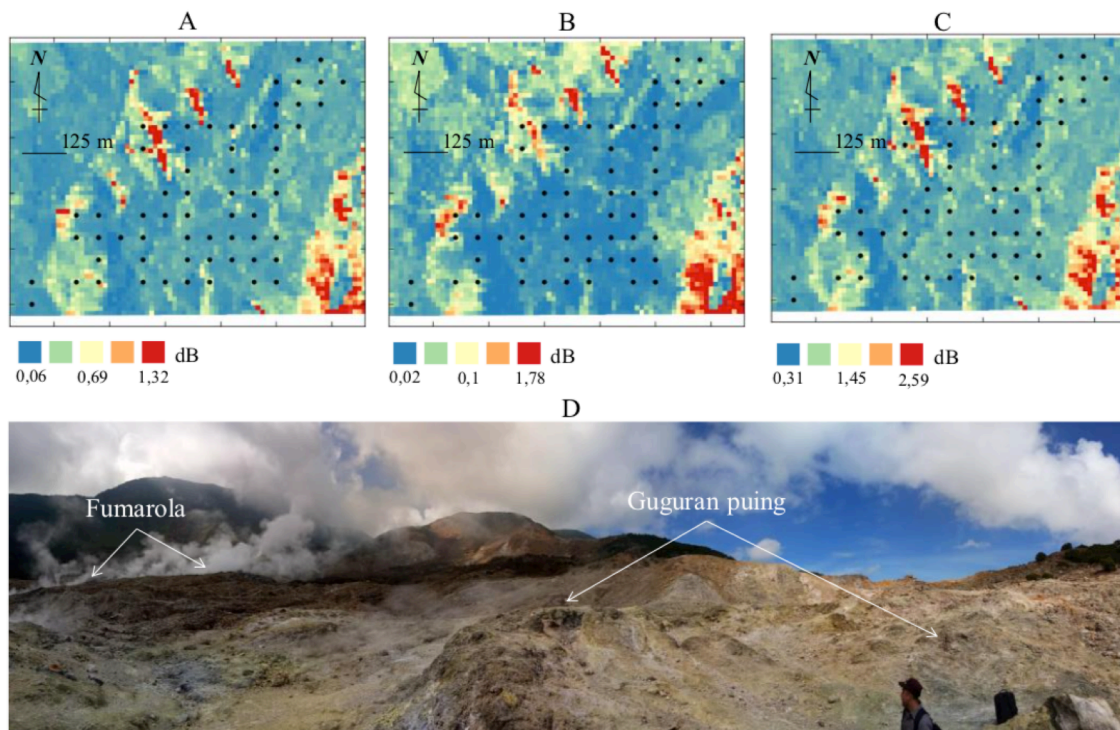
merupakan satelit yang diluncurkan oleh JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*) pada 24 Januari 2006 (Rosenqvist et al., 2014). PALSAR dioperasikan dengan sensor SAR yang terpasang pada satelit ALOS selain dua sensor optis yaitu AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2*) dan PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*). ALOS-2 PALSAR-2 merupakan generasi ke-2 ALOS PALSAR yang mulai beroperasi pada tanggal 24 Mei 2014 (Rosenqvist et al., 2014). Citra ALOS-2 PALSAR-2 digunakan sebagai data utama dalam metode dPSAR karena kemampuan sensor PALSAR yang dioperasikan pada saluran-L (*L-band*) dalam mendeteksi target permukaan tanah yang umumnya tertutup kanopi vegetasi (Saepuloh et al., 2012).

Lokasi penelitian berada di Gunung Papandayan, Kabupaten Garut, Jawa Barat (Gambar 1). Gunung Papandayan merupakan gunung api aktif yang memiliki kawah yang relatif datar seperti Kawah Mas, Kawah Baru, Kawah Nangklak, dan Kawah Manuk sehingga mempermudah pengukuran *in situ* di lapangan. Lokasi

manifestasi panasbumi ini dipilih untuk mengetahui validitas dan akurasi metode dPSAR yang diajukan. Pemilihan lokasi lain bisa dilakukan setelah metode ini terbukti berhasil mendapatkan nilai  $\mu_r$  yang sesuai dengan pengukuran *in situ*.

### Teknik Ekstraksi Permeabilitas Magnetik Permukaan

Metode dPSAR merupakan metode yang digunakan untuk menurunkan parameter reflektivitas material menggunakan data citra PolSAR (Saepuloh et al., 2015). Proses inversi dilakukan untuk mendapatkan solusi dari persamaan reflektivitas material dengan model perturbasi hamburan balik sederhana atau *Small Perturbation Model of Backscattering* (SPMB). Model hamburan balik SPMB  $\gamma^0$  dengan tipe polarisasi sejajar dituliskan dalam persamaan (1) dan (2). Variabel  $k$  adalah bilangan gelombang ( $=2\pi/\lambda$ ),  $h_o$  adalah kekasaran permukaan,  $\theta_i$  adalah *local incidence angle*, dan  $W(x,y)$  adalah spektra permukaan sebagai fungsi area  $(x,y)$ . Variabel permitivitas dielektrik  $\epsilon_r$  dan



Gambar 2. Lokasi pengukuran permeabilitas magnetik permukaan dengan latar gambar citra ALOS-2 PALSAR-2 polarimetrik HH (A), HV (B), VV (C), dan kondisi lapangan di Kawah Gunung Papandayan (D).



permeabilitas magnetik  $\mu_r$  merupakan *objective functions* dengan solusi setiap piksel citra menggunakan metode Nelder-Mead Simplex (Nelder and Mead, 1965).

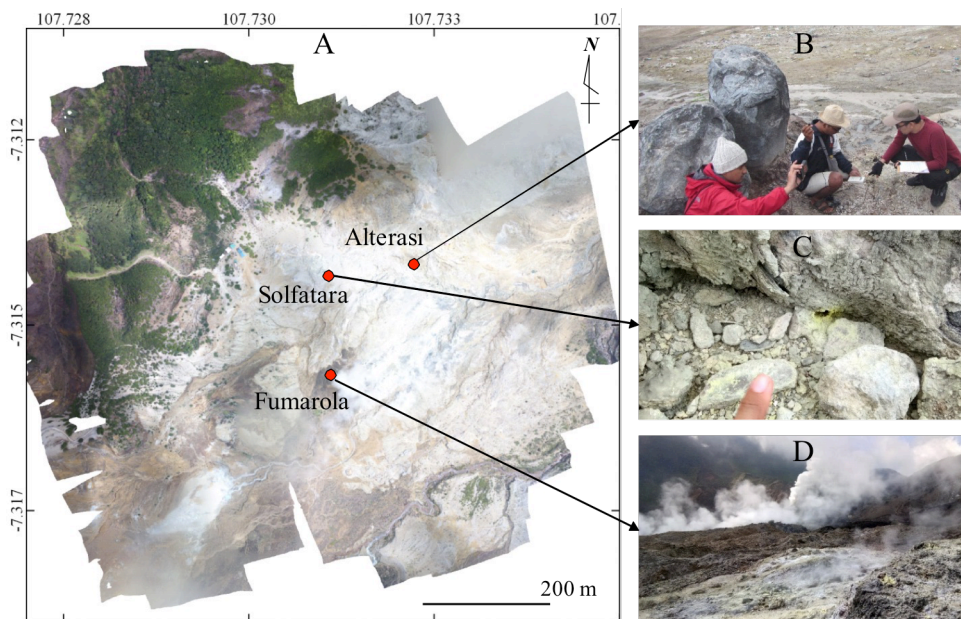
Metode dPSAR memanfaatkan tipe polarisasi hamburan balik HH (Horizontal-Horizontal) dan VV (Vertikal-Vertikal) pada citra SAR. Komponen H dan V merupakan vektor hamburan balik yang diberikan oleh *transmitter* dan diterima oleh *receiver* sensor SAR ke/dari objek di permukaan. Modifikasi dilakukan untuk variabel  $\mu_r$  dimana pada publikasi sebelumnya dijadikan sebagai konstanta dengan nilai 1 (Saepuloh *et al.*, 2015). Persamaan (1) dan (2) dapat mengakomodasi pencarian solusi  $\mu_r$  yang tidak dilakukan pada penelitian sebelumnya karena keterbatasan data lapangan. Pada penelitian ini, solusi  $\mu_r$  digunakan karena alat pengukuran lapangan *Ferromaster Magnetic Permeability Meter* sudah tersedia sehingga pengukuran dapat dilakukan.

Verifikasi lapangan dilakukan untuk mengetahui efektivitas ekstraksi variabel  $\mu_r$  metode dPSAR dengan hasil pengukuran *in situ* menggunakan alat ukur *Ferromaster Magnetic Permeability Meter*. Pengukuran dilakukan di permukaan

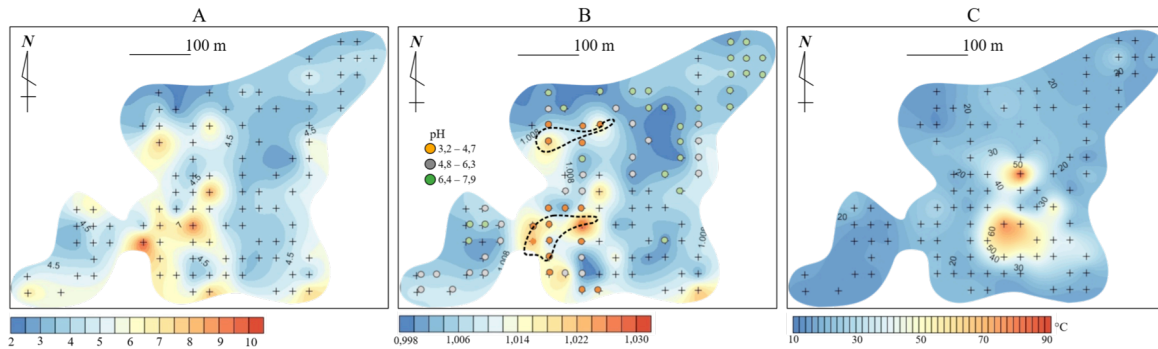
tanah menggunakan metode sampling sistematis dengan interval antar titik ukur 23 meter (Gambar 2A-C). Metode ini digunakan karena lokasi pengukuran cukup homogen secara geologi, yaitu di dataran dasar kawah, berisi material lepas hasil guguran puing (*debris avalanche*) yang teralterasi kuat (Abdurachman and Yamamoto, 2013) sehingga keacakan titik sampel bisa dihindari (Saepuloh, 2019). Kondisi permukaan kawah yang mengalami alterasi kuat dengan keberadaan solfatara dan fumarola di sekitar titik pengukuran lapangan ditunjukkan oleh Gambar 2D. Pengukuran pada 113 titik dilakukan di area kawah yang sebagian besar tertutup oleh batuan alterasi dengan keberadaan lubang fumarola dan solfatara aktif. Selanjutnya, pembuatan peta permeabilitas magnetik permukaan  $\mu_r$  dari hasil dPSAR dan pengukuran *in situ* dilakukan dengan menggunakan metode *Krigging* (Cressie, 1990).

### Permeabilitas Magnetik dan Verifikasi Lapangan

Hasil inversi dPSAR menghasilkan dua parameter dan diolah dalam bentuk peta  $\epsilon_r$  dan  $\mu_r$ . Selain itu, peta kekasaran permukaan  $h_0$



Gambar 3. Foto udara sebagian Kawah Papandayan (A), menunjukkan pengukuran permeabilitas magnetik permukaan menggunakan *Ferromaster Magnetic Permeability Meter* pada batuan teralterasi (B), solfatara (C), dan fumarola (D).

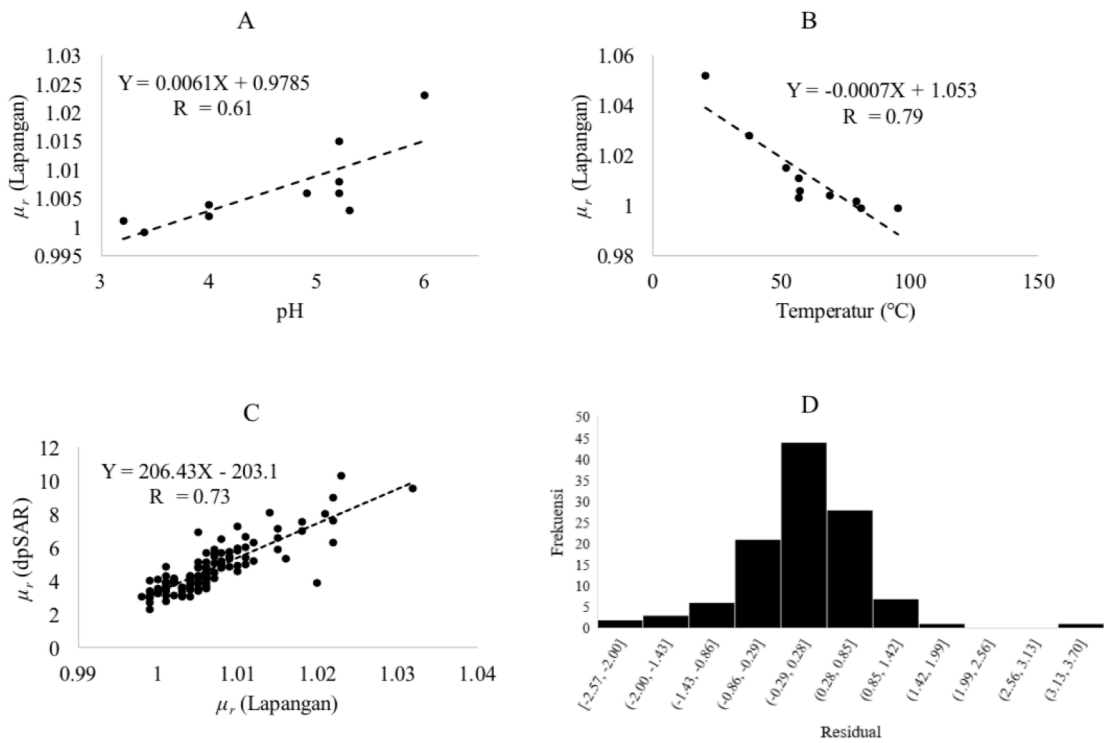


Gambar 4. Peta sebaran nilai permeabilitas magnetik permukaan hasil dPSAR (A), pengukuran permeabilitas magnetik dan pH permukaan *in situ* (B), dan pengukuran temperatur permukaan (C) ditunjukkan oleh skala warna biru ke merah untuk nilai rendah ke tinggi dengan titik ukur ditandai dengan “+”. Poligon hitam putus-putus adalah zona basah atau berair.

sebagai salah satu parameter input dPSAR dihitung dari model polarisasi silang HV dan VH (Campbell and Garvin, 1993; Saepuloh *et al.*, 2016). Dalam makalah ini, pembahasan difokuskan untuk mengetahui koherensi parameter  $\mu_r$  yang diperoleh dengan metode dPSAR terhadap nilai sebenarnya di lapangan. Pengukuran permeabilitas magnetik dilakukan secara *in situ* menggunakan *Ferromaster Magnetic Permeability Meter*, parameter keasaman diukur menggunakan pH meter, dan temperatur menggunakan termometer tanah Fluke 52 II (Gambar 3A s.d. 3D). Sebaran nilai  $\mu_r$  dan temperatur permukaan di lokasi penelitian ditunjukkan oleh Gambar 4. Rentang nilai  $\mu_r$  yang diperoleh dari dPSAR berada pada rentang 2 (biru) hingga 10,5 (merah) untuk nilai minimum dan maksimum (Gambar 4A). Sedangkan rentang nilai  $\mu_r$  hasil pengukuran lapangan menunjukkan rentang 0,99 (biru) hingga 1,03 (merah) untuk nilai minimum dan maksimum (Gambar 4B). Pengukuran pH *in situ* ditandai dengan bulatan berwarna yang ditampal pada gambar tersebut. Rentang yang pendek untuk nilai  $\mu_r$  lapangan ditentukan oleh spesifikasi *Ferromaster Magnetic Permeability Meter* pada rentang 1 sampai 2. Walaupun ada perbedaan skala antara dPSAR dan *Ferromaster*, pola sebaran nilai  $\mu_r$  keduanya memiliki kesamaan. Anomali  $\mu_r$  tinggi dan rendah berada di zona yang sama di sisi Barat dan Timur. Anomali  $\mu_r$  rendah berada pada zona temperatur permukaan tinggi hasil pengukuran lapangan

yang ditandai dengan simbol “+” (Gambar 4C). Hubungan antara  $\mu_r$ , pH, dan temperatur permukaan tanah secara eksplisit ditunjukkan oleh Gambar 5A dan B. Pengukuran tanah pada lokasi yang sama menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai  $\mu_r$  maka semakin tinggi pH-nya (Gambar 5A). Korelasi sebaliknya terjadi untuk nilai  $\mu_r$  yang semakin rendah untuk temperatur semakin tinggi (Gambar 5B). Uji koherensi antara  $\mu_r$  hasil metode dPSAR dan pengukuran *in situ* di lapangan ditunjukkan oleh koefisien determinasi  $R^2$  dari plot silang dua variabel tersebut, yaitu sebesar 0,73 (Gambar 5C). Sebaran data menunjukkan hubungan linear yang cukup tinggi dari jumlah pasangan data sebanyak 113. Tingkat keakuratan model regresi dihitung menggunakan pengujian Kolmogorov-Smirnov (KS) berdasarkan distribusi nilai residualnya (Hassani and Silva, 2015). Nilai residual merupakan nilai simpangan yang menyatakan besarnya selisih antara nilai pengamatan aktual dengan nilai yang diperoleh dari model persamaan. Nilai residual yang terdistribusi normal memberikan estimasi koefisien yang baik dalam model regresi. Pengujian KS dilakukan dengan mengukur perbandingan data empiris dengan data berdistribusi normal teoretis yang memiliki nilai rata-rata dan standar deviasi yang serupa dengan data empiris yang ditulis sebagai berikut:

$$D_{n=x} = \text{Max}_x |F_n(x) - F(x)| \quad (3)$$



Gambar 5. Plot silang antara  $\mu_r$  hasil pengukuran lapangan terhadap pH (A), temperatur (B), dan  $\mu_r$  hasil dpSAR menunjukkan regresi linear dengan nilai koefisien determinasi  $R^2$  0,73 (C) dengan histogram nilai residual menunjukkan distribusi normal dengan frekuensi terbanyak pada nilai sekitar 0 (D).

dimana  $D_n$  adalah nilai deviasi maksimum untuk sejumlah data  $n$ ,  $F_n(x)$  adalah distribusi frekuensi kumulatif sampel, dan  $F(x)$  distribusi frekuensi kumulatif teoretis.

Untuk tingkat kepercayaan sebesar 95% dan nilai signifikansi 0,05 dalam tabel KS, diperoleh nilai kritis sebesar 0,13 untuk 113 data yang digunakan. Nilai  $D_n$  yang diperoleh dalam pengujian KS sekitar 0,15 sudah mendekati nilai kritis. Meskipun dalam kondisi ideal nilai  $D_n$  berada lebih rendah dari nilai kritis, hasil verifikasi lapangan menunjukkan nilai residual yang terdistribusi normal (Gambar 5D). Hal ini mengindikasikan bahwa parameter  $\mu_r$  yang diperoleh dengan metode dPSAR cukup koheren dengan kondisi kemagnetan sebenarnya di permukaan tanah. Peningkatan algoritma dPSAR diperlukan untuk mendapatkan nilai  $D_n$  yang lebih rendah dari nilai kritis.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Zona lemah yang dapat berperan sebagai media fluida termal bawah permukaan migrasi ke permukaan dicirikan dengan keberadaan manifestasi panasbumi. Fluida termal yang kontak dengan batuan di sekitarnya menyebabkan degradasi mineral-mineral magnetik menjadi non-magnetik seperti misalnya mineral lempung (Cassidy and Jol, 2009). Berdasarkan observasi lapangan dan foto udara menggunakan *drone* (Gambar 3A), hampir seluruh dasar Kawah Papandayan mengalami alterasi yang ditandai oleh kehadiran lempung berwarna terang (Gambar 3B), fumarola (Gambar 3C), dan endapan sulfur di sekitar keluarnya solfatara (Gambar 3D). Berdasarkan penelitian sebelumnya, daerah kawah aktif Papandayan mengalami alterasi tipe argilik lanjut dari hasil interaksi fluida asam dengan batuan. Pendeteksian permeabilitas magnetik

permukaan secara spasial berperan dalam identifikasi permeabilitas rekahan di permukaan. Metode ekstraksi nilai permeabilitas magnetik  $\mu_r$  menggunakan metode dPSAR yang divalidasi dengan pengukuran *in situ* di lapangan menunjukkan koherensi. Observasi geologi di lokasi pengukuran menunjukkan bahwa variasi nilai permeabilitas magnetik dikontrol oleh tingkat alterasi, temperatur permukaan, dan pH. Keberadaan alterasi batuan sebagai manifestasi sistem panasbumi di bawah permukaan mengindikasikan adanya kontak antara fluida termal dengan batuan yang pernah terjadi baik pada masa lampau maupun saat ini (Gianelli and Teklemariam, 1993). Mineral dalam batuan yang mengalami kontak dengan fluida termal umumnya mengalami perubahan kimia dengan membentuk mineral ubahan seperti mineral lempung dan menurunkan nilai kemagnetan dari mineral asalnya (Townley et al., 2007). Keberadaan mineral-mineral non-magnetik akibat proses demagnetisasi batuan terdeteksi di permukaan dengan  $\mu_r$  yang sangat rendah. Parameter  $\mu_r$  yang diperoleh dari metode dPSAR yang diverifikasi oleh pengukuran *in situ* di lapangan terhadap lokasi manifestasi permukaan menunjukkan fenomena penurunan nilai magnetik permukaan ini. Fenomena nilai  $\mu_r$  yang rendah akibat proses demagnetisasi batuan oleh fluida termal juga didukung oleh hasil pengukuran temperatur permukaan dan pH. Lokasi dengan nilai  $\mu_r$  yang rendah memiliki panas permukaan yang tinggi dengan pH yang rendah. Pengecualian terjadi untuk lokasi kolam-kolam dan sungai air panas dimana nilai  $\mu_r$  tinggi berada pada pH rendah seperti ditunjukkan oleh garis putus-putus pada Gambar 4B. Secara umum untuk permukaan tanah dan batuan, semakin rendah nilai  $\mu_r$  maka semakin rendah pH (Gambar 5A), tetapi temperatur permukannya semakin tinggi (Gambar 5B). Hal ini mengindikasikan bahwa fluida termal dengan tingkat keasaman yang tinggi telah menyebabkan proses demagnetisasi batuan sangat intensif. Koefisien determinasi  $R^2$  yang cukup tinggi antara nilai  $\mu_r$  hasil dPSAR dengan pengukuran *in situ* lapangan sebesar 0,73 mengindikasikan potensi data citra PolSAR untuk pemetaan nilai  $\mu_r$  permukaan secara luas (Gambar 5C).

Keberhasilan menentukan nilai anomali  $\mu_r$  rendah yang berasosiasi dengan zona lemah tidak hanya sebagai indikator keberadaan sistem panasbumi, tetapi bisa juga sebagai indikator dalam mitigasi kebencanaan gunung api. Keberadaan zona lemah terkait dengan intrusi dan pembentukan *cryptodome* menjadi faktor terjadinya letusan Gunung St. Helens di Amerika Serikat pada tahun 1980 dan Gunung Bezymianny di Rusia pada tahun 1956 (Donnadieu et al., 2001). Penelitian lain di Gunung Campi Flegrei (Italia) menunjukkan bahwa keberadaan zona lemah akibat adanya kekar dan sesar mengontrol pembentukan tubuh gunung api, seperti sumbat lava, skoria, dan kerucut tufa (Vitale and Isaia, 2014). Penelitian lebih lanjut untuk memahami kontrol zona lemah terhadap peningkatan aktivitas gunung api perlu dilakukan pada tahap selanjutnya.

## KESIMPULAN

Nilai permeabilitas magnetik  $\mu_r$  permukaan hasil metode dPSAR dan pengukuran *in situ* lapangan menunjukkan koherensi yang cukup tinggi dengan koefisien determinasi  $R^2$  sekitar 0,73. Koherensi yang cukup tinggi mengindikasikan bahwa metode dPSAR memiliki potensi untuk digunakan dalam pemetaan fisis permukaan terkait dengan interaksi fluida panasbumi dengan batuan sekitar. Hasil metode dPSAR dan pengukuran *in situ* lapangan untuk permukaan tanah dan batuan menunjukkan bahwa semakin rendah nilai  $\mu_r$  maka semakin tinggi keasaman dan temperatur permukannya. Perubahan kimia mineral penyusun batuan akibat kontak dengan fluida termal menyebabkan penurunan nilai  $\mu_r$  batuan secara ekstrim dari orde puluhan menjadi orde satuan bahkan mendekati 0. Kondisi berbeda untuk permukaan air asam dimana nilai  $\mu_r$  menjadi tinggi akibat reflektivitas yang mempengaruhi nilai hamburan balik menjadi tinggi. Metode dPSAR yang lebih lanjut dapat digunakan untuk pemetaan zona lemah akibat keberadaan permeabilitas rekahan, baik untuk keperluan eksplorasi panasbumi maupun untuk kebencanaan gunung api.



## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh riset skema Magister Ristekdikti, multidisiplin ITB, dan didukung BAGUS-SATREPS untuk peralatan pendukung selama observasi lapangan. Data ALOS-2 PALSAR-2 *quad-polarization* disediakan oleh JAXA di bawah koordinasi riset dengan PVMBG.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdurrachman, M., Yamamoto, M., 2013. Geochemical variation of Quaternary volcanic rocks in Papandayan area, West Java, Indonesia: Arole of crustal component. *J. Geol. Soc. Thailand* 40–57.
- Árpási, M., Lorberer, Á., Pap, S., 2000. High pressure and temperature (geopressed) Geothermal reservoirs in Hungary, in: *World Geothermal Congress. Kyushu - Tohoku, Japan*.
- Bixley, P.F., Clotworthy, A.W., Mannington, W.I., 2009. Evolution of the Wairakei geothermal reservoir during 50 years of production. *Geothermics* 38, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.12.007>
- Cassidy, N. J., dan Jol, H. M., 2009. Electrical and magnetic properties of rocks, soils and fluids, Elsevier, Kidlington, UK, 2.
- Campbell, B.A., Garvin, J.B., 1993. Lava flow topographic measurements for radar data interpretation. *Geophysical research letters* 20, 831–834.
- Cressie, N., 1990. The origins of kriging. *Mathematical geology* 22, 239–252.
- Dezayes, C., Genter, A., Valley, B., 2010. Structure of the low permeable naturally fractured geothermal reservoir at Soultz. *Comptes Rendus Geoscience* 342, 517–530. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.10.002>
- Donnadieu, F., Merle, O., Besson, J.-C., 2001. Volcanic edifice stability during cryptodome intrusion. *Bulletin of Volcanology* 63, 61–72. <https://doi.org/10.1007/s004450000122>
- Gaffney, E.S., Damjanac, B., Valentine, G.A., 2007. Localization of volcanic activity: 2. Effects of pre-existing structure. *Earth and Planetary Science Letters* 263, 323–338.
- Gianelli, G., Teklemariam, M., 1993. Water-rock interaction processes in the Aluto-Langano geothermal field (Ethiopia). *Journal of volcanology and geothermal research* 56, 429–445. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(93\)90007-E](https://doi.org/10.1016/0377-0273(93)90007-E)
- Gudmundsson, A., Loetveit, I.F., 2005. Dyke emplacement in a layered and faulted rift zone. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 144, 311–327.
- Haeruddin, H., Saepuloh, A., Heriawan, M.N., Kubo, T., 2016. Identification of linear features at geothermal field based on Segment Tracing Algorithm (STA) of the ALOS PALSAR data, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. p. 012003.
- Hanano, M., 2004. Contribution of fractures to formation and production of geothermal resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8, 223–236. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.10.007>
- Hassani, H., Silva, E., 2015. A Kolmogorov-Smirnov based test for comparing the predictive accuracy of two sets of forecasts. *Econometrics* 3, 590–609. <https://doi.org/10.3390/econometrics3030590>
- Jafari, A., Babadagli, T., 2011. Effective fracture network permeability of geothermal reservoirs. *Geothermics* 40, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.10.003>
- Kilburn, C.R., Voight, B., 1998. Slow rock fracture as eruption precursor at Soufriere Hills volcano, Montserrat. *Geophysical Research Letters* 25, 3665–3668. <https://doi.org/10.1029/98GL01609>

- Kurniawahidayati, B., 2018. Karakteristik struktur permeabel pada citra satelit ALOS PALSAR berdasarkan integrasi studi kelurusan dengan metode modified Segment Tracing Algorithm (mSTA) dan studi lapangan di lapangan panas bumi Darajat. ITB.
- Kurniawahidayati, B., Nugroho, I.A., Mulyana, R.S., Saepuloh, A., 2017. Preliminary study of near surface detections at geothermal field using optic and SAR imageries. Presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, p. 012019.
- La Felice, S., Montanari, D., Battaglia, S., Bertini, G., Gianelli, G., 2014. Fracture permeability and water-rock interaction in a shallow volcanic groundwater reservoir and the concern of its interaction with the deep geothermal reservoir of Mt. Amiata, Italy. *Journal of volcanology and geothermal research* 284, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.07.017>
- Mazot, A., Bernard, A., Fischer, T., Inguaggiato, S., Sutawidjaja, I.S., 2008. Chemical evolution of thermal waters and changes in the hydrothermal system of Papandayan volcano (West Java, Indonesia) after the November 2002 eruption. *Journal of volcanology and geothermal research* 178, 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.022>
- Nelder, J. A., dan Mead, R., 1965. A simplex method for function minimization, *The computer journal*, 7(4), 308–313.
- Rosenqvist, A., Shimada, M., Suzuki, S., Ohgushi, F., Tadono, T., Watanabe, M., Tsuzuku, K., Watanabe, T., Kamijo, S., Aoki, E., 2014. Operational performance of the ALOS global systematic acquisition strategy and observation plans for ALOS-2 PALSAR-2. *Remote Sensing of Environment* 155, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.011>
- Saepuloh, A., 2019. Prinsip dan aplikasi penginderaan jauh geologi gunung api pendekatan fisis dan observasi geologi lapangan, 1st ed. ITB Press, Bandung, Indonesia.
- Saepuloh, A., Bakker, E., Suminar, W., 2017. The significance of SAR remote sensing in volcano-geology for hazard and resource potential mapping, in: *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, p. 070005. <https://doi.org/10.1063/1.4987093>
- Saepuloh, A., Haeruddin, H., Heriawan, M.N., Kubo, T., Koike, K., Malik, D., 2018. Application of lineament density extracted from dual orbit of Synthetic Aperture Radar (SAR) images to detecting fluids paths in the Wayang Windu geothermal field (West Java, Indonesia), in: *Geothermics*. pp. 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.11.010>
- Saepuloh, A., Koike, K., Heriawan, M.N., Kubo, T., 2016. Quantifying surface roughness to detect geothermal manifestations from Polarimetric Synthetic Aperture Radar (PolSAR) data, in: *Proceedings of the 41th Annual Stanford Geothermal Workshop*, Stanford University, California.
- Saepuloh, A., Koike, K., Omura, M., 2012. Applying Bayesian Decision Classification to Pi-SAR polarimetric data for detailed extraction of the geomorphologic and structural features of an active volcano. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 9, 554–558. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2174611>
- Saepuloh, A., Koike, K., Urai, M., Sumantyo, J.T.S., 2015. Identifying surface materials on an active volcano by deriving dielectric permittivity from polarimetric SAR data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 12, 1620–1624. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2415871>

- Saepuloh, A., Urai, M., Aisyah, N., Sunarta, Widiwijayanti, C., Subandriyo, Jousset, P., 2013. Interpretation of ground surface changes prior to the 2010 large eruption of Merapi volcano using ALOS/PALSAR, ASTER TIR and gas emission data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Merapi eruption 261, 130–143. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.05.001>
- Susantoro, T.M., 2019. Model Geobiokimia Permukaan Lapangan Migas Berbasis Penginderaan Jauh dan Geologi di Cekungan Sedimen Produksi Hidrokarbon Jawa Barat Utara (PhD Theses). Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Townley, B., Roperch, P., Oliveros, V., Tassara, A., Arriagada, C., 2007. Hydrothermal alteration and magnetic properties of rocks in the Carolina de Michilla stratabound copper district, northern Chile. *Mineralium Deposita* 42, 771–789. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0134-6>
- Vitale, S., Isaia, R., 2014. Fractures and faults in volcanic rocks (Campi Flegrei, southern Italy): insight into volcano-tectonic processes. *International Journal of Earth Sciences* 103, 801–819. <https://doi.org/10.1007/s00531-013-0979-0>