

Estimasi Ukuran Butir Pasir Menggunakan Citra Sentinel-2 pada Sungai Rejali, Kabupaten Lumajang

Mohammad Naufal Fathoni¹, Danang Sri Hadmoko², Sandy Budi Wibowo³

¹ Magister Sains Penginderaan Jauh, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

² Departemen Geografi Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

³ Departemen Sains Penginderaan Jauh, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Article Info

Article history:

Diterima 15 Juli 2023

Revisi 25 Juli 2023

Diterbitkan 27 Oktober, 2023

Keywords:

Penginderaan Jauh

Lahar Hujan

Ukuran Butir

Grain Size Index

Sentinel-2

ABSTRAK

Lahar hujan merupakan suatu fenomena bencana yang mengancam daerah sekitar gunungapi, namun juga memiliki dampak positif berupa potensi pertambangan yang besar. Berdasarkan hal tersebut perlu adanya pengelolaan dan perencanaan, didukung oleh informasi spasial yang memadai salah satunya adalah ukuran butir. Berkembangnya produk penginderaan jauh dan sistem informasi geografi dapat digunakan sebagai penyedia data spasial ukuran butir. Fokus penelitian ini adalah pemanfaatan Citra Sentinel-2 melalui indeks ukuran butir untuk mengestimasi ukuran butir menggunakan pendekatan empiris. Tahap penelitian terdiri dari pra-pemrosesan citra, pengambilan ukuran butir lapangan, analisis laboratorium, pemodelan empiris, dan identifikasi sebaran ukuran butir. Hasil penelitian menunjukkan indeks ukuran butir berkorelasi terhadap ukuran butir dan dapat digunakan sebagai variabel pemodelan. Ukuran butir pada lokasi penelitian berkisar antara -0.050Φ sampai 11.828Φ . Nilai validitas tergolong baik dikarenakan model memiliki nilai kesalahan estimasi yang setara dengan satu kelas ukuran butir. Distribusi ukuran butir menunjukkan semakin jauh transportasi material diiringi dengan semakin kecilnya ukuran butir.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Corresponding Author:

Mohammad Naufal Fathoni,

Universitas Gadjah Mada, Sekip-Bulaksumur, Yogyakarta, 55281, Indonesia

Email: mohammadnaufal@mail.ugm.ac.id

1. PENDAHULUAN

Fenomena lahar hujan merupakan salah satu bahaya yang dapat terjadi di sekitar daerah gunung api dan bersifat merusak. Tersusun dari material piroklastik dengan berbagai ukuran dengan badan sungai sebagai jalur mobilisasinya [1], pada intensitas tertentu dapat meluap dan menggenangi kawasan di sekitarnya [2]. Kerusakan oleh bencana lahar hujan tercatat sebesar 17% dari beberapa bencana yang ditimbulkan oleh gunungapi berupa kerusakan fasilitas umum, permukiman, harta benda, hingga menimbulkan korban jiwa [3]. Selain kerusakan yang ditimbulkan, endapan material lahar berpotensi sebagai lokasi pertambangan bahan galian C yang tergolong sebagai dampak positif pasca bencana [4].

Beriringan dengan fenomena erupsi Gunungapi Semeru tahun 2021, intensitas bencana lahar hujan menjadi semakin besar dan berdampak pada daerah di sekitarnya. Salah satu jalur aliran lahar aktif pada daerah sekitar Gunungapi Semeru adalah Sungai Rejali. Lokasi tersebut memiliki potensi pertambangan paling besar di Kabupaten Lumajang [5], terutama pasca kejadian erupsi [6]. Hal tersebut perlu diiringi dengan pengelolaan dan perencanaan lokasi pertambangan yang tepat guna mencegah sedimentasi berlebih yang menyebabkan luapan material lahar di kemudian hari [5].

Kebutuhan data spasial untuk perencanaan mutlak diperlukan karena melibatkan objek geografi dalam suatu kawasan. Berkaitan dengan pengelolaan tambang bahan galian C, informasi keruangan berupa sifat fisik lahan seperti distribusi ukuran butir material dapat digunakan sebagai data dasar perencanaan. Secara konvensional, ukuran butir dipetakan dengan kegiatan lapangan dan laboratorium yang membutuhkan waktu dan biaya yang cukup besar seiring bertambahnya luas lokasi kajian [7]. Selain itu, tidak semua lokasi aliran lahar dapat dijangkau dikarenakan kondisi medan yang terjal. Pemantauan ukuran butir juga memerlukan metode yang efisien secara waktu pemrosesan mengingat aliran lahar merupakan wilayah yang dinamis.

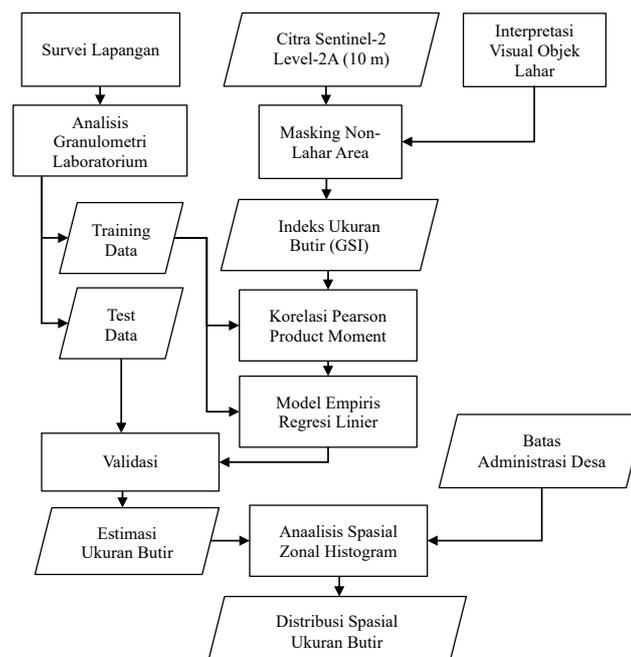
Semakin berkembangnya produk dan teknologi penginderaan jauh akan mendukung perkembangan pemetaan objek geografi ke arah yang lebih spesifik. Menawarkan identifikasi objek berdasarkan pantulan spektral dengan resolusi spasial dan temporal yang beragam, dapat dimanfaatkan untuk berbagai kajian termasuk kebencanaan lahar dan sifat fisiknya [8], [9]. Data yang dihasilkan berjenis raster (*distributed model*) dengan satuan terkecil berupa piksel yang terstruktur serta mendukung pemodelan matematis [10]. Keunggulan lainnya adalah cakupan wilayah kajian yang luas sehingga dapat melakukan proses identifikasi dengan efisien.

Variasi ukuran butir pada konsep penginderaan jauh diterjemahkan dalam perbedaan intensitas pantulan spektral. Pantulan spekular (menyerupai cermin) gelombang elektromagnetik akan mendominasi pada ukuran butir material yang lebih halus dikarenakan permukaan yang lebih rata mengakibatkan intensitas pantulan menjadi semakin besar [11]. Lebih lanjut, respons objek terhadap gelombang elektromagnetik juga menghasilkan variasi intensitas yang berbeda sehingga menggambarkan pola pantulan spektral. Perbedaan respons spektral selanjutnya dapat digunakan untuk menonjolkan objek tertentu yang disebut dengan transformasi spektral [12]. Aplikasinya terhadap kajian ukuran butir telah banyak diterapkan oleh beberapa penelitian seperti respons spektral terhadap ukuran butir [13] hingga indeks spektral yang menonjolkan variasi ukuran butir yang disebut *Grain Size Index (GSI)* atau indeks ukuran butir [14].

Salah satu produk penginderaan jauh yang berpotensi digunakan untuk kajian ini adalah Citra Sentinel-2 *Multi Spectral Instrument (MSI)* yang diluncurkan oleh *European Commission's Copernicus Programme*. Merupakan konstalasi dua satelit, Citra Sentinel-2 memiliki resolusi temporal yang tinggi sehingga peluang untuk mendapatkan gambar bebas awan semakin besar [15]. Tersedia 13 kanal spektral dengan resolusi spasial yang aplikatif terhadap survei lapangan juga merupakan keunggulan dari produk Citra Sentinel-2. Ukuran butir dan tekstur sebelumnya telah dikaji oleh peneliti [16] terhadap objek pasir pantai, peneliti [13] terhadap objek gurun pasir dan [17] terhadap objek tekstur tanah. Adapun fokus penelitian ini adalah penerapan indeks ukuran butir (GSI) terhadap objek material lahar pada kawasan Sungai Rejali menggunakan Citra Sentinel-2.

2. METODE

Lokasi penelitian berupa dataran banjir dan wilayah Sungai Rejali yang dipenuhi oleh material piroklastik dan merupakan pusat pertambangan bahan galian C di Kabupaten Lumajang. Secara administratif, mencakup Kecamatan Pronojiwo (Desa Supiturang), Kecamatan Candipuro (Desa Sumberwuluh dan Jugosari), dan Kecamatan Pasirian (Desa Gondosuro, Bades, dan Bago), sedangkan secara astronomis lokasi penelitian terletak pada $- 8^{\circ} 9' 25.52''$ LS hingga $- 8^{\circ} 17' 23.59''$ LS dan $112^{\circ} 58' 48.02''$ BT hingga $113^{\circ} 7' 6.65''$ BT. Penelitian ini dikerjakan melalui empat tahapan utama yang terdiri dari pengumpulan dan pra-pemrosesan data, pengambilan data lapangan, analisis granulometri laboratorium, dan pemodelan empiris yang disertai validasi. Secara ringkas alur penelitian disajikan pada Gambar 1.

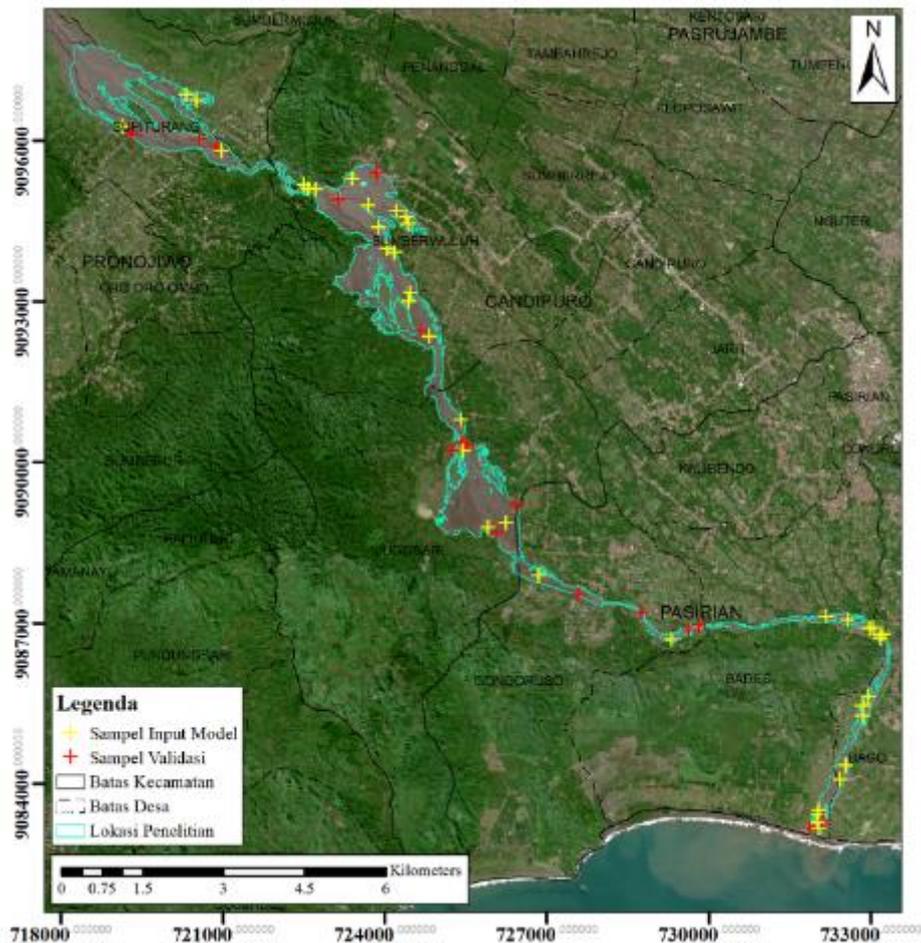


Gambar 1. Diagram alir penelitian

Produk penginderaan jauh yang digunakan adalah Sentinel-2 Level 2A yang merupakan produk siap pakai dimana produk ini telah terkoreksi secara geometrik. Secara spektral, level ini juga telah merepresentasikan pantulan objek di lapangan atau pada tahap koreksi *Bottom of Atmosphere* (BoA). Waktu perekaman citra dipilih pada tanggal 10 Juni 2022 yang menampilkan objek bebas awan. Nilai pantulan spektral objek lahar merupakan objek utama penelitian sehingga pemilihan citra bebas awan merupakan keharusan. Tahap pra-pemrosesan dilanjutkan dengan *masking*/pemotongan area lahar guna meminimalisir nilai kesalahan estimasi yang disebabkan oleh objek lain selain lahar. Kanal spektral yang digunakan, disesuaikan dengan kebutuhan transformasi indeks ukuran butir yang dikemukakan oleh peneliti [14] yang melibatkan kanal biru, hijau, dan merah. Adapun persamaan transformasi indeks ukuran butir/ *Grain Size Index* (GSI) disajikan sebagai berikut:

$$GSI = \frac{\text{Kanal Merah} - \text{Kanal Biru}}{\text{Kanal Merah} + \text{Kanal Hijau} + \text{Kanal Biru}} \quad (1)$$

Sebanyak 56 sampel ukuran butir dikumpulkan pada tahap pengambilan data lapangan yang tersebar di seluruh lokasi kajian (Gambar 2). Guna membangun model empiris, sebanyak 39 sampel digunakan sebagai input model, sedangkan 17 sampel digunakan sebagai validasi model. Kegiatan pengambilan data lapangan terdiri dari plotting lokasi absolut menggunakan GPS *Handheld* dan pengambilan sampel dengan rentang 10-meter sesuai dengan resolusi spasial citra Sentinel-2.



Gambar 2. Lokasi penelitian dan sebaran sampel lapangan

Nilai ukuran butir dengan satuan PHI (Φ) didapatkan dari analisis granulometri laboratorium berdasarkan perhitungan rerata (*mean*). Sebelumnya dilakukan proses pemilahan menggunakan metode ayakan kering (7 level saringan berukuran 10, 18, 35, 60, 120, 230, dan 400 skala Mesh) yang dilanjutkan dengan perhitungan metode grafis [18]. Data penelitian berjenis rasio (memiliki nilai 0 mutlak) agar dapat dimodelkan secara empiris dan tidak dikelaskan menjadi kelas ukuran butir. Pemodelan empiris dibangun dari analisis statistik korelasi dan regresi linier antara 39 ukuran butir dengan 39 nilai piksel indeks GSI. Berdasarkan analisis regresi didapatkan persamaan empiris untuk memprediksi ukuran butir berdasarkan variasi nilai indeks GSI secara

spasial. Uji akurasi model dilakukan berdasarkan 17 sampel secara statistik menggunakan *Standard Error of Estimation (SEE)*. Proses tersebut ditujukan untuk mengetahui selisih standar hasil pemodelan (terutama pemodelan empiris yang menghasilkan luaran data rasio) dengan data aktual yang bersifat independen dan objektif [19]. Distribusi ukuran butir dianalisis secara spasial menggunakan zonal histogram dengan area administrasi desa sebagai ruang pembagiannya. Langkah tersebut dapat menggambarkan sebaran dan dominasi objek kajian dalam suatu wilayah tertentu untuk mendeskripsikan objek melalui sistem informasi geografi [20].

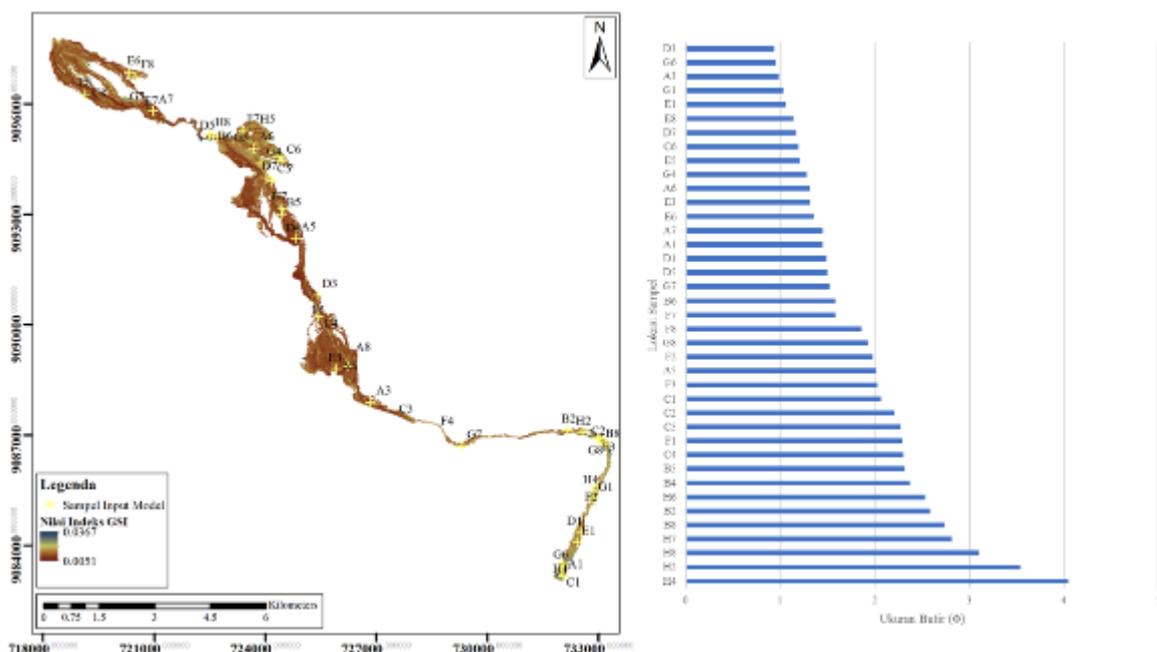
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Estimasi ukuran butir pada penelitian ini didapatkan dari konversi empiris antara nilai indeks ukuran butir GSI dengan sampel ukuran butir aktual lapangan. Sebagai salah satu transformasi spektral dari sensor penginderaan jauh, indeks GSI juga tersaji secara spasial di wilayah kajian Sungai Rejali, Kabupaten Lumajang. Berdasarkan hal tersebut, hasil yang disajikan terdiri dari tiga kategori yaitu hasil transformasi spektral indeks ukuran butir GSI, pemodelan empiris, dan distribusi spasial ukuran butir.

3.1. Indeks ukuran butir (GSI) dataran banjir Sungai Rejali dan ukuran butir aktual

Indeks ukuran butir dihasilkan dari transformasi spektral kanal Biru, Hijau, dan Merah yang seluruhnya merupakan gelombang tampak. Berdasarkan [11], [12], [21], sifat pantulan objek tanah meningkat seiring bertambahnya panjang gelombang khususnya pada panjang gelombang *Short Wave Infrared (SWIR)*, namun dalam beberapa kasus kanal SWIR tidak dapat digunakan karena terserap partikel air. Peneliti [14], membangun indeks GSI menggunakan citra Landsat 7 pada daerah semi-arid untuk mendeteksi penggurunan, berkebalikan dengan kondisi umum, korelasi terbesar yang didapatkan dari hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa sinar tampak berkorelasi besar yang juga dipengaruhi oleh kandungan partikel tanah. Pada kondisi kelembapan yang tinggi seperti material pasir pantai, ukuran butir lebih dapat dibedakan menggunakan kanal tampak jika dibandingkan dengan kanal spektral yang memiliki panjang gelombang lebih besar [16]. Berdasarkan hal tersebut indeks GSI diterapkan untuk mengestimasi ukuran butir pada penelitian ini mengingat aliran lahar memiliki variasi kelembapan oleh aliran sungai.

Indeks ukuran butir yang dihasilkan pada lokasi penelitian berkisar antara 0.0051 – 0.0367. Nilai tersebut masih berupa nilai indeks yang selanjutnya akan dimodelkan secara empiris menjadi ukuran butir berskala Φ . Secara spasial, hasil transformasi spektral indeks GSI disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil transformasi spektral indeks GSI dan ukuran butir sampel yang digunakan untuk membangun model empiris hasil analisis laboratorium

Lokasi yang disimbolkan dengan warna kuning pada Gambar 3 merupakan titik pengambilan sampel lapangan yang digunakan untuk membangun model empiris sebanyak 39 sampel. Berdasarkan analisis granulometri laboratorium, ukuran butir berkisar antara $0.935 \Phi - 4.048 \Phi$. Sebanyak tiga sampel memiliki

ukuran butir yang berkisar antara $0 \Phi - 1 \Phi$, 20 sampel berukuran $1 \Phi - 2 \Phi$, 13 sampel berukuran $2 \Phi - 3 \Phi$, dua sampel berukuran $3 \Phi - 4 \Phi$, dan satu sampel berukuran $4 \Phi - 5 \Phi$. Dominasi ukuran butir sampel yang berukuran $1 \Phi - 3 \Phi$ merupakan salah satu penciri material lahar hujan [22]. Adapun kegiatan pengambilan data lapangan dan analisis laboratorium disajikan pada



Gambar 4.



Gambar 4. (a) Kegiatan pengambilan sampel pasir di lapangan dan (b) analisis granulometri laboratorium ukuran butir

3.2. Model empiris estimasi ukuran butir

Tahap pemodelan empiris merupakan tahap penelitian yang melibatkan kajian penginderaan jauh dan sistem informasi geografi. Lokasi sampel pengambilan data lapangan yang bersinggungan dengan nilai piksel indeks GSI dianalisis secara statistik berdasarkan korelasi dan regresi yang menghasilkan rumus empiris untuk mengubah nilai indeks menjadi nilai ukuran butir. Nilai tersebut divalidasi menggunakan 17 sampel aktual yang berbeda dari sampel yang digunakan untuk membangun model (bersifat independen) agar memberi penilaian terhadap model secara obyektif.

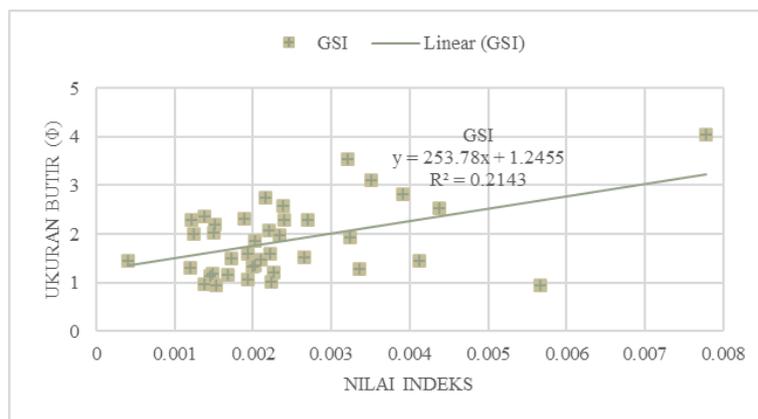
3.2.1. Analisis korelasi dan regresi antara nilai indeks GSI dan ukuran butir

Analisis korelasi ditujukan untuk mengetahui hubungan antara variabel penelitian. Berdasarkan 39 sampel, variabel penelitian dinyatakan berkorelasi secara dua arah jika memiliki nilai korelasi (R) > 0.316 (nilai r tabel) dengan taraf signifikansi ditentukan sebesar 95%. Adapun hasil analisis korelasi disajikan pada Tabel 1.

	GSI	Ukuran Butir
GSI	1	
Ukuran Butir	0.4629	1

Perhitungan korelasi didapatkan nilai sebesar 0.4629, lebih besar dari pada ambang batas (r tabel) yang telah ditentukan. Hal tersebut menandakan adanya hubungan antara nilai indeks spektral terhadap ukuran butir yang dikategorikan sebagai kelas sedang/cukup sehingga dapat digunakan untuk memprediksi ukuran butir menggunakan analisis regresi. Hubungan tersebut bernilai positif dengan artian peningkatan/penurunan nilai indeks GSI beriringan dengan peningkatan/penurunan ukuran butir (Φ). Adapun gambar 5 menyajikan diagram regresi antara ukuran butir dengan nilai indeks GSI.

Analisis regresi pada penelitian ini tergolong analisis regresi sederhana yang melibatkan dua variabel berupa ukuran butir sebagai variabel terikat (y) dan nilai indeks GSI merupakan variabel independen (x). Koefisien regresi didapatkan bernilai 253.78, artinya setiap kenaikan nilai GSI sebesar 0.01 diiringi dengan kenaikan ukuran butir sebesar 2.5378 Φ . Nilai konstanta yang diperoleh sebesar 1.245 Φ yang merupakan nilai awal sebelum terjadi perubahan spektral.



Gambar 5. Diagram regresi antara ukuran butir dan nilai indeks GSI

Berkaitan dengan kemampuan mengestimasi ukuran butir, koefisien determinasi didapatkan sebesar 0.2143 atau 21.43% yang menunjukkan besaran pengaruh ukuran butir terhadap nilai indeks GSI. Hal tersebut menandakan bahwa terdapat faktor lain yang berpengaruh terhadap variasi nilai indeks GSI selain ukuran butir sebesar 78.57%. Faktor tersebut dapat berupa kelembapan tanah, oksida besi, kandungan salinitas tanah, dan bahan organik yang berpengaruh terhadap pola pantulan spektral [11]. Material lahar yang di produksi oleh Gunungapi Semeru didominasi oleh material besi dengan persentase 49.6% berdasarkan hasil penelitian [23], selain itu material lahar yang dekat dengan aliran sungai berpotensi memiliki kadar kelembapan tanah yang tinggi. Rendahnya koefisien determinasi yang didapatkan oleh korelasi indeks GSI lebih dipengaruhi oleh serapan yang besar oleh material besi dan oksida besi jika dibandingkan dengan pengaruh kelembapan tanah. Hal tersebut dikarenakan indeks GSI seluruhnya disusun menggunakan kanal gelombang tampak yang memiliki serapan tinggi terutama oleh partikel oksida besi [21], sedangkan berdasarkan peneliti [16], gelombang tampak terutama kanal biru dan hijau memiliki korelasi yang tinggi terhadap ukuran butir jika memiliki kondisi kelembapan yang tinggi.

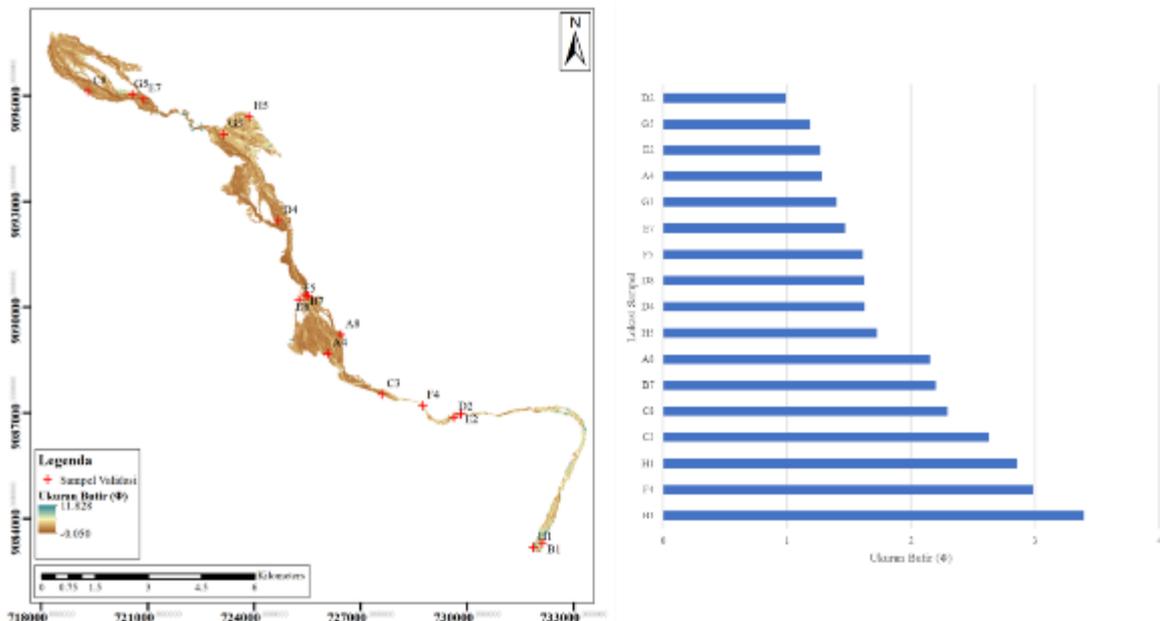
3.2.2. Hasil model empiris dan validasi hasil estimasi ukuran butir

Rumus empiris yang dihasilkan dari analisis regresi diterapkan pada seluruh piksel indeks ukuran butir menghasilkan ukuran butir yang berkisar antara -0.050 Φ sampai 11.828 Φ . Rentang yang besar disebabkan oleh julat yang kecil namun memiliki koefisien regresi yang sangat besar. Selain itu, rentang yang besar belum tentu diiringi dengan frekuensi ukuran butir yang sama. Berdasarkan Gambar 6, ukuran butir di seluruh lokasi kajian memiliki dominasi yang tinggi pada ukuran butir 0 Φ - 3 Φ . Adapun ukuran butir yang bernilai negatif

(berukuran kasar) juga berhasil diidentifikasi oleh indeks ukuran butir. Secara spasial hasil estimasi disajikan pada Gambar 7.

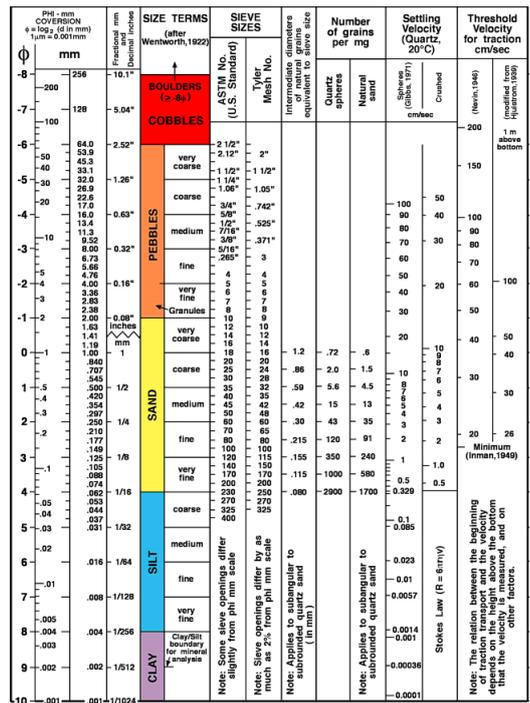


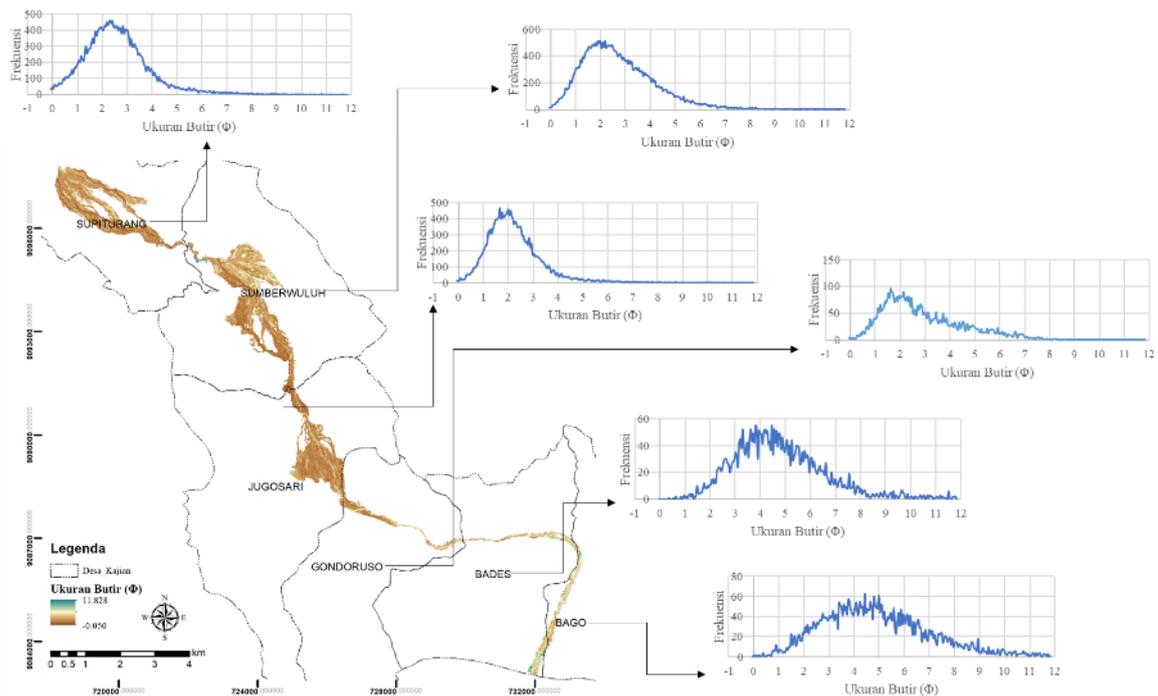
Gambar 6. Distribusi ukuran butir sampel di seluruh lokasi penelitian



Gambar 7. Hasil model empiris dan ukuran butir sampel yang digunakan untuk membangun model empiris hasil analisis laboratorium

Ukuran butir yang digunakan sebagai validasi model memiliki rentang ukuran butir $0.987 \Phi - 3.319 \Phi$. Sebanyak satu sampel berukuran $0 \Phi - 1 \Phi$, sembilan sampel berukuran $1 \Phi - 2 \Phi$, enam sampel berukuran $2 \Phi - 3 \Phi$, dan satu sampel berukuran $3 \Phi - 4 \Phi$. Hasil validasi antara piksel hasil estimasi dengan 17 sampel independen berdasarkan nilai kesalahan standar estimasi (*Standard Error of Estimation*) sebesar 0.728. Berdasarkan nilai tersebut, hasil model berpotensi memiliki kesalahan dalam estimasi ukuran butir sebesar 0.728Φ lebih kecil/besar. Tidak ada klasifikasi yang berkaitan dengan nilai standar error yang menyatakan selisih rerata pemodelan, namun semakin kecil nilai kesalahan standar diartikan sebagai semakin tingginya nilai validitas dari model yang dihasilkan. Peneliti [24], menjelaskan setiap ukuran butir berdasarkan satuan Φ dengan rentang sebesar 1Φ di setiap kelas ukuran butir, sehingga nilai selisih hasil pemodelan menunjukkan ukuran butir hanya berpotensi memiliki kesalahan sebesar satu kelas ukuran butir (Gambar 8).





Gambar 9. Distribusi spasial ukuran butir hasil estimasi

Ukuran butir pada Desa Gondosuro berkisar antara $0 \Phi - 7 \Phi$ dimana telah terdapat ukuran butir yang lebih halus (nilai Φ yang besar), pada kawasan tersebut puncak distribusi ukuran butir terdapat pada ukuran $1 \Phi - 3 \Phi$. Desa Bades dan Bago merupakan daerah hilir Sungai Rejali, rentang ukuran butir pada kedua desa tersebut berkisar antara $1 \Phi - 10 \Phi$ yang menunjukkan pergeseran kurva mengarah didominasi material yang lebih halus. Lokasi tersebut juga ditandai dengan sedikitnya frekuensi ukuran butir kasar ($0 \Phi - 1 \Phi$) dan memiliki puncak frekuensi ukuran butir yang berkisar antara $3 \Phi - 7 \Phi$. Informasi spasial terkait sebaran ukuran butir yang telah dihasilkan selanjutnya dapat digunakan sebagai data pendukung perencanaan wilayah yang berkaitan dengan kegiatan kebencanaan dan pertambangan.

4. KESIMPULAN

Penggunaan media penginderaan jauh yang diiringi oleh kegiatan lapangan mampu menghasilkan data ukuran butir dengan cakupan wilayah kajian yang luas. Hal tersebut dibuktikan dari temuan penelitian yang mengestimasi ukuran butir berdasarkan pendekatan empiris antara data lapangan dan indeks spektral citra. Berdasarkan hasil estimasi, material lahar pada Sungai Rejali memiliki ukuran butir yang bervariasi. Hasil tersebut memiliki nilai kesalahan standar atau potensi error yang setara dengan satu kelas ukuran butir. Meskipun telah menghasilkan model estimasi yang tergolong baik, model empiris masih terkendala koefisien determinasi yang kecil berkaitan dengan ukuran butir sehingga perlu adanya penambahan variabel yang berpengaruh terhadap respons spektral lahar agar mendapatkan koefisien determinasi yang lebih baik serta diharapkan dapat meningkatkan akurasi hasil pemodelan. Secara spasial, distribusi ukuran butir dapat diidentifikasi menggunakan sistem informasi geografi yang menghasilkan informasi dasar untuk mendukung perencanaan wilayah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Naskah ini merupakan salah satu hasil penelitian tugas akhir program studi Magister Penginderaan Jauh, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada yang didanai oleh program Rekognisi Tugas Akhir (RTA) 2023, Direktorat Penelitian UGM. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu seluruh tahap penelitian khususnya kepada para dosen pembimbing.

REFERENSI

- [1] S. B. Wibowo, P. M. Togatorop, T. Hanindhya, B. S. Widartono, and R. I. Rosyadi, "Spatial Model of Runoff Flowing into the Newly Formed Lake at Sinabung Volcano," *Geographia Technica*, pp. 68–78, May 2023, doi: 10.21163/GT_2023.182.05.

- [2] A. Realita, M. N. Fahmi, T. Prastowo, and M. Madlazim, "Detection of Lahar Flow Direction from Semeru Eruption on 4 December 2021 using Gravity Method," *JPSE (Journal of Physical Science and Engineering)*, vol. 7, no. 2, pp. 75–85, Oct. 2022, doi: 10.17977/um024v7i22022p075.
- [3] J. C. Thouret, S. Antoine, C. Magill, and C. Ollier, "Lahars and debris flows: Characteristics and impacts," *Earth Sci Rev*, vol. 201, no. April 2019, 2020, doi: 10.1016/j.earscirev.2019.103003.
- [4] S. Bachri, J. Stötter, M. Monreal, and J. Sartohadi, "The calamity of eruptions, or an eruption of benefits? Mt. Bromo human-volcano system a case study of an open-risk perception," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 15, no. 2, pp. 277–290, 2015, doi: 10.5194/nhess-15-277-2015.
- [5] A. V. Mirantieno, "Dampak Pertambangan Pasir dan Kesesuaian Fungsi Kawasan DAS Rejali, Kabupaten Lumajang," Skripsi, Universitas Brawijaya, Malang, 2014. Accessed: Jun. 10, 2023. [Online]. Available: <http://repository.ub.ac.id/id/eprint/142514>
- [6] L. Y. Irawan *et al.*, "Mapping the Semeru lahar-flood hazard of Supiturang Village using the analytical hierarchy process (AHP) method," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 1180, no. 1, p. 012012, May 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1180/1/012012.
- [7] V. Baumann, C. Bonadonna, S. Cuomo, M. Moscariello, M. Pistolesi, and A. Gattuso, "Mapping the susceptibility of syn-eruptive rain-triggered lahars at Vulcano island (Italy) combining field characterization and numerical modelling", doi: 10.5194/nhess-2019-77.
- [8] K. E. Joyce, S. Samsonov, V. Manville, R. Jongens, A. Graettinger, and S. J. Cronin, "Remote sensing data types and techniques for lahar path detection: A case study at Mt Ruapehu, New Zealand," *Remote Sens Environ*, vol. 113, no. 8, pp. 1778–1786, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.rse.2009.04.001.
- [9] S. S. Rijal, "Identifikasi Material Piroklastik Pasca Erupsi Gunung Kelud menggunakan Citra Hyperspektral," *Jurnal Penginderaan Jauh dan Pengolahan Data Citra Digital*, vol. 17, no. 1, pp. 1–9, 2020, doi: 10.30536/j.pjpdcd.2020.v17.a.
- [10] P. Danoedoro, *Pengantar Penginderaan Jauh Digital*. Yogyakarta: Andi Publisher, 2012.
- [11] J. R. Jensen, *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective second edition*, vol. 1. 2014.
- [12] J. B. Campbell and R. H. Wynne, *Introduction to Remote Sensing Fifth Edition*, vol. 5. New York: The Guilford Press, 2011.
- [13] G. S. Okin and T. H. Painter, "Effect of grain size on remotely sensed spectral reflectance of sandy desert surfaces," *Remote Sens Environ*, vol. 89, no. 3, pp. 272–280, Feb. 2004, doi: 10.1016/j.rse.2003.10.008.
- [14] Jieying Xiao, Yanjun Shen, T. Ryutaro, and W. Bayaer, "Detection of land desertification and topsoil grain size using remote sensing," in *Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05.*, IEEE, 2005, pp. 198–201. doi: 10.1109/IGARSS.2005.1526141.
- [15] F. D. Van der Meer, H. M. A. van der Werff, and F. J. A. van Ruitenbeek, "Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications," *Remote Sens Environ*, vol. 148, pp. 124–133, May 2014, doi: 10.1016/j.rse.2014.03.022.
- [16] D. J. Leu, "Visible and Near-Infrared Reflectance of Beach Sands: A Study on the Spectral Reflectance Grain Size Relationship," *Remote Sens Environ*, vol. 6, pp. 169–182, 1977.
- [17] C. Gomez, S. Dharumarajan, J. B. Féret, P. Lagacherie, L. Ruiz, and M. Sekhar, "Use of sentinel-2 time-series images for classification and uncertainty analysis of inherent biophysical property: Case of soil texture mapping," *Remote Sens (Basel)*, vol. 11, no. 5, Mar. 2019, doi: 10.3390/rs11050565.
- [18] R. L. Folk and W. C. Ward, "Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters," *Journal of Sedimentary Research*, vol. 27, no. 1, pp. 3–26, Mar. 1957, doi: 10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D.
- [19] M. N. Fathoni, P. Wicaksono, and S. Bachri, "Estimated change in the percentage of vegetation cover after the eruption of Mount Agung, Bali in 2017," *SPIE-Intl Soc Optical Eng*, Dec. 2021, p. 15. doi: 10.1117/12.2617334.
- [20] S. M. Razali and M. Lion, "Eucalyptus forest plantation assessment of vegetation health using satellite remote sensing techniques," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2021. doi: 10.1088/1755-1315/918/1/012041.
- [21] A. R. Huete, "Remote Sensing for Environmental Monitoring," in *Environmental Monitoring and Characterization*, USA: Elsevier, 2004, pp. 183–206. doi: 10.1016/B978-0-12-064477-3.50013-8.
- [22] S. Makris, I. Manzella, P. Cole, and M. Roverato, "Grain size distribution and sedimentology in volcanic mass-wasting flows: implications for propagation and mobility," *International Journal of Earth Sciences*, vol. 109, no. 8, pp. 2679–2695, Nov. 2020, doi: 10.1007/s00531-020-01907-8.

- [23] Muh. A. A. J, A. P. Putra, and E. A. P. Putra, "Analisis Kandungan Mineral Pasir Besi Pantai Selatan Kabupaten Lumajang Hasil Separasi Magnetik," *Jurnal Teknologi Kimia Mineral*, vol. 1, no. 2, pp. 70–75, 2022, Accessed: Jun. 02, 2023. [Online]. Available: <https://journal.atim.ac.id/index.php/jtkm/article/download/273/201>
- [24] C. K. Wentworth, "A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments," *J Geol*, vol. 30, no. 5, pp. 377–392, Aug. 1922, [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/30063207>