Buletin GAW Bariri (BGB)

p – ISSN : 2721 – 7752 | e – ISSN : 2721 – 9704
Buletin GAW Bariri (BGB) Volume 7 | Nomor 1 | Juni 2026 : 39 – 64
DOI : 10.31172/bgb.v7i1.136
©Author 2026. CC BY – NC Attribution 4.0 Licence

Integrasi RUSLE dan Hodrodinamika untuk Estimasi Laju Erosi di Tambang Andesit Kutogiri Kulon Progo

Integrating RUSLE and Hydrodynamics for Erosion Rate Estimation at the Kutogiri Andesite Mine Kulon Progo

Maulana Nafid Hakim*, Faizal Agung Riyadi, Dila Nur Naningsih, Muh Syauqi Nurur Rasyid

Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral (FTM), Universitas Pembangunan Nasional "Veteran", Jl. SWK 104, Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, 55283

**Email:* 112220219@student.upnyk.ac.id

Naskah Masuk: 8 April 2026 | Naskah Diterima: 14 Juni 2026 | Naskah Terbit: 30 Juni 2026

Abstrak. Aktivitas penambangan andesit di Kutogiri memicu degradasi lahan dan peningkatan suplai sedimen menuju aliran sungai. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi laju erosi secara spasial dan memvalidasi pergerakan transpor sedimen melalui analisis hidrodinamika. Pemodelan erosi dilakukan menggunakan metode *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) berbasis komputasi awan *Google Earth Engine* (GEE), dengan mengintegrasikan data presipitasi NASA GPM IMERG, DEM Nasional, dan citra Sentinel – 2, yang kemudian dikoreksi menggunakan *Sediment Delivery Ratio* (SDR). Validasi lapangan dilakukan pada 18 titik pengamatan yang seluruhnya dievaluasi secara *in situ* menggunakan metode *USDA Guide to Texture by Feel*. Dari jumlah tersebut, 12 titik dilanjutkan untuk uji laboratorium (analisis ayakan, hidrometer, dan berat jenis), sementara 6 titik dievaluasi untuk analisis hidrodinamika menggunakan Diagram Hjulström dan Kurva Shields. Hasil pemodelan menunjukkan total potensi kehilangan tanah mencapai 146.533,29 ton/tahun. Berdasarkan nilai SDR sebesar 37%, diperkirakan sebanyak 54.255,26 ton sedimen aktual tertranspor dan terakumulasi di badan sungai setiap tahunnya. Meskipun material sedimen dasar didominasi oleh partikel dengan berat jenis (G_s 2.58 – 2.65), analisis kurva kritis membuktikan bahwa gaya geser aliran sungai memiliki energi yang cukup untuk melampaui ambang batas gerak awal butiran, sehingga material tersebut secara aktif tertranspor sebagai muatan dasar (*bedload*). Temuan ini mengonfirmasi bahwa tanpa upaya konservasi pada area bukaan tambang, laju suplai sedimen akan mempercepat pendangkalan sungai di zona hilir. Oleh karena itu, direkomendasikan pembangunan kolam pengendapan (*settling pond*) pada area sumber, serta infrastruktur penahan sedimen cekdam di sepanjang alur drainase utama untuk memitigasi risiko luapan banjir.

Kata Kunci: Andesit, Erosi, *Google Earth Engine*, RUSLE, Transpor Sedimen

Abstract. *Andesite mining activities in Kutogiri have triggered land degradation and an increased sediment supply into the river system. This study aims to estimate spatial erosion rates and validate sediment transport movement through hydrodynamic analysis. Erosion modeling was conducted using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) method based on Google Earth Engine (GEE) cloud computing, integrating NASA GPM IMERG precipitation data, National DEM, and Sentinel – 2 imagery, which was subsequently corrected using the Sediment Delivery Ratio (SDR). Field validation was carried out at 18 observation points, all of which were evaluated in situ using the USDA Guide to Texture by Feel method. From this total, 12 points were allocated for laboratory testing (sieve analysis, hydrometer, and specific gravity), while 6 points were evaluated for hydrodynamic analysis using the Hjulström Diagram and Shields Curve.The modeling results indicate a total potential soil loss of 146.533,29 tons/year.*

Based on an SDR value of 37%, it is estimated that 54.255,26 tons of actual sediment are transported and accumulated in the river body annually. Although the bed sediment material is dominated by particles with a high specific gravity (G_s 2.58 – 2.65), critical curve analysis demonstrates that the river current's shear stress possesses sufficient energy to exceed the incipient motion threshold, meaning the particles are actively transported as bedload. Consequently, the construction of settling ponds at the source area and sediment – retaining infrastructure check dams along the main drainage channels is recommended to mitigate the risk of overflow flooding.

Keywords: *Andesit, Erosion, Google Earth Engine, RUSLE, Sediment Transport*

Pendahuluan

Secara global, aktivitas penambangan terbuka (*open – pit mining*) merupakan salah satu pemicu utama perubahan bentang alam, degradasi lahan, dan sedimentasi sungai akibat pengupasan lapisan vegetasi dan tanah penutup[1]. Di tingkat regional, Kawasan Kulon Progo, khususnya pada area Formasi Andesit Tua, memiliki peran dalam menyediakan material batuan untuk kebutuhan infrastruktur nasional [2]. Namun, penambangan terbuka di daerah dengan topografi curam seperti Kutogiri memperparah risiko erosi. Pengupasan lapisan tanah penutup (*overburden*) membuat permukaan tanah kehilangan pelindung vegetasi, sehingga lebih rentan terkikis oleh energi kinetik air hujan. Kondisi ini memicu dua masalah lingkungan utama: peningkatan laju erosi ekstrem di area tambang dan bertambahnya suplai sedimen ke badan sungai di sekitarnya[1].

Selama ini, estimasi tingkat bahaya erosi dalam skala luas umumnya dilakukan dengan menggunakan metode empiris seperti *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE)[3,4]. Untuk mengatasi kelemahan metode empiris yang kerap menghasilkan *overestimation*, hasil erosi dievaluasi menggunakan parameter *Sediment Delivery Ratio* (SDR). Evaluasi ini bertujuan untuk memproyeksikan proporsi massa tanah yang secara aktual lolos ke sistem sungai sebagai sedimen[5]. Berdasarkan prinsip mekanika fluida, tidak semua material dengan berat jenis tinggi dapat dengan mudah diangkut oleh aliran pada kondisi debit normal. Material yang berat berpotensi mengendap lebih cepat dan menyebabkan pendangkalan sungai, yang pada akhirnya dapat memicu banjir luapan di area hilir[6].

Beberapa penelitian sebelumnya telah banyak mengaplikasikan model RUSLE berbasis *cloud computing* pada platform *Google Earth Engine* (GEE) untuk analisis erosi akibat penambangan[7,8]. Meskipun demikian, kajian tersebut umumnya hanya berfokus pada estimasi kuantitatif kehilangan tanah dan nisbah pelepasan sedimen secara spasial, tanpa memvalidasi pergerakan materialnya secara fisik. Penelitian terdahulu mengabaikan karakteristik berat jenis material dan tidak mengonfirmasi secara mekanis apakah sedimen yang tererosi akan terus terbawa oleh arus sungai atau langsung mengendap di titik pelepasannya. Dengan kata lain, masih terdapat kesenjangan antara estimasi angka erosi dan pemahaman tentang perilaku hidrodinamik sedimen di lapangan.

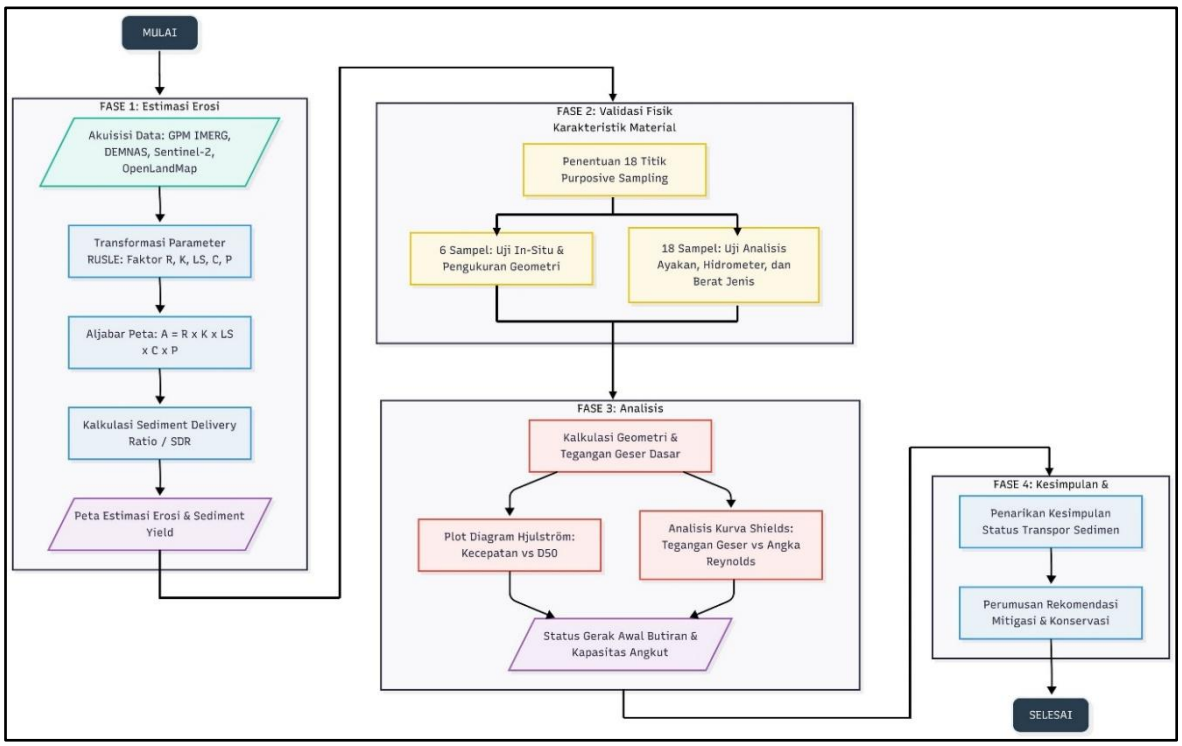
Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya berhenti pada estimasi kuantitatif kehilangan tanah, penelitian ini memberikan validasi fisik melalui analisis hidrodinamika untuk memastikan sedimen hasil erosi tersebut tertranspor oleh sistem sungai atau mengendap di lokasi pelepasan. Estimasi laju erosi spasial dilakukan menggunakan *cloud computing* dengan platform *GEE* agar komputasi lebih efisien[7,8]. Hasil dari estimasi spasial kemudian divalidasi secara fisik menggunakan analisis hidrodinamika sungai melalui pendekatan Diagram Hjulström[9] dan Kurva Shields[10]. Melalui integrasi ini, penelitian bertujuan untuk mengestimasi laju erosi dan sedimentasi secara spasial sekaligus membuktikan secara empiris kapasitas daya angkut aktual sistem sungai terhadap transpor sedimen.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif yang mengintegrasikan pemodelan spasial dengan analisis mekanika fluida. Secara keseluruhan, tahapan penelitian terdiri atas empat fase utama yang divisualisasikan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 1.

Pendekatan ini diawali dengan estimasi laju erosi menggunakan metode RUSLE berbasis komputasi awan (*cloud computing*) pada platform Google Earth Engine[7,8]. Nilai erosi kasar (A) yang diperoleh kemudian dikoreksi menggunakan *Sediment Delivery Ratio* (SDR) model Boyce[11]. Koreksi dilakukan untuk menghitung volume sedimen yang secara aktual berpotensi masuk ke dalam alur Sungai[5]. Kemudian, analisis hidrodinamika dilakukan untuk memvalidasi material erosi tersebut terangkut oleh arus atau justru terendapkan di titik pelepasannya. Analisis ini didasarkan pada perhitungan parameter kecepatan aliran, ukuran rata – rata butir sedimen dasar (D_{50}), dan tegangan geser dasar (τ_0) yang diperoleh dari data geometri saluran (SNI 8066:2015) serta persamaan Manning[12].

Parameter – parameter tersebut kemudian diplot ke dalam Diagram Hjulström[9] dan Kurva Shields[10]. Penggunaan kedua metode ini bertujuan untuk mengevaluasi kecepatan batas pengendapan dan dinamika pergerakan butiran (erosi, transportasi, dan deposisi), serta membandingkan tegangan geser aktual terhadap ambang batas kritisnya[13]. Evaluasi ini dapat menunjukkan dominasi partikel dengan berat jenis tertentu tersebut menghambat proses transpor sedimen, atau partikel tersebut tetap mampu terangkut sebagai muatan dasar yang bergerak (*travelling bedload*)[14].

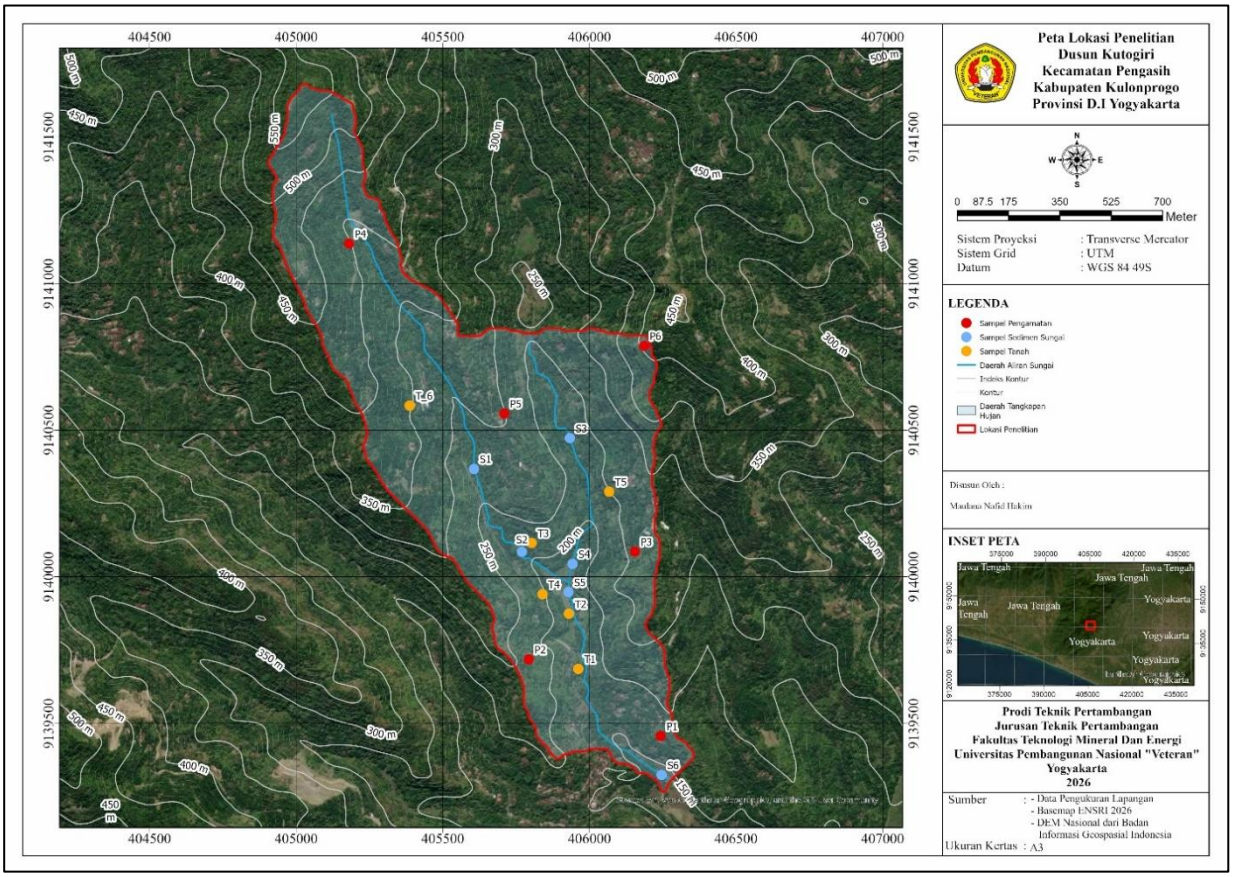


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Lokasi dan Karakteristik Wilayah

Penelitian ini dilaksanakan di area tambang andesit Dusun Kutogiri, Desa Sidomulyo, Kecamatan Pengasih, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Sebaran 18 titik pengambilan sampel tanah dan sedimen yang diobservasi dapat dilihat pada Gambar 2 (Peta Lokasi Penelitian). Penentuan seluruh titik tersebut dilakukan melalui metode *purposive sampling* untuk memastikan representasi spasial yang berdasarkan rute aliran limpasan permukaan.

Secara spasial, zonasi pengamatan dibagi menjadi tiga segmen utama: zona hulu (sebelum area bukaan tambang) yang berfungsi sebagai titik kontrol alami, zona tengah (di dalam area tambang) sebagai sumber utama pelepasan sedimen, dan zona hilir (setelah melewati area tambang) yang menampung akumulasi sedimen. Dari total 18 titik pengamatan tersebut, seluruhnya (18 titik) dievaluasi secara *in situ*. Dari jumlah tersebut, 12 titik digunakan untuk uji laboratorium dan 6 titik untuk analisis hidrodinamika. Data uji (ukuran butir dan berat jenis) dengan pengamatan visual lapangan bertujuan memverifikasi keseragaman material dan dinamika sedimen.



Gambar 2. Peta Lokasi Penelitian

Estimasi Laju Erosi

Estimasi tingkat bahaya erosi berskala luas di wilayah studi dilakukan menggunakan metode empiris *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE). Pemilihan metode ini didasarkan pada efektivitasnya yang telah terbukti secara luas dalam mengestimasi distribusi spasial kehilangan tanah[3,4]. Agar pengolahan *dataset* spasial yang berukuran besar dapat berjalan lebih efisien, proses komputasi dilakukan melalui platform komputasi awan (*cloud computing*) Google Earth Engine (GEE)[7,8]. Bentuk persamaan empiris tersebut dirumuskan pada Persamaan 1.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

Keterangan:
A = estimasi laju erosi tanah tahunan rata – rata (ton/ha/tahun)
R = faktor erosivitas curah hujan tahunan (MJ·mm/ha·jam·tahun)
K = faktor erodibilitas tanah (ton·jam/MJ·mm)
LS = faktor panjang dan kemiringan lereng
C = faktor tutupan dan pengelolaan lahan
P = faktor praktik konservasi atau mekanis

Parameter pemodelan RUSLE diekstraksi secara spasial melalui Google Earth Engine menggunakan *dataset* presipitasi NASA GPM IMERG Monthly v07 untuk analisis curah hujan selama 10 tahun (Faktor *R*), model topografi DEM Nasional 2018 (Faktor *LS*), Citra Sentinel – 2 Surface Reflectance 2025 (Faktor *C* dan *P*), serta peta kelas tekstur tanah OpenLandMap 2018 (Faktor *K*).

Faktor Erosivitas Hujan (R)

Faktor *R* menunjukkan besarnya energi kinetik air hujan yang menyebabkan partikel tanah terlepas. Perhitungan menggunakan pendekatan *Modified Fournier Index* (MFI) karena dinilai akurat dalam mengestimasi energi kinetik hujan berdasarkan data rata – rata curah hujan bulanan dan tahunan[15], sesuai yang dirumuskan pada Persamaan 2.

$$MFI = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{P} \quad (2)$$

Keterangan:
MFI = Modified Fournier Index (mm).
p_i = Rata – rata curah hujan pada bulan ke – i (mm).
P = Rata – rata curah hujan tahunan (mm).

Konversi nilai MFI ≤ 55 menjadi Faktor R dihitung menggunakan Persamaan 3[16].

$$R = 0.07397 \times MFI^{1.847} \quad (3)$$

Adapun untuk nilai MFI > 55, perhitungan Faktor R menggunakan Persamaan 4.

$$R = 95.77 - (6.081 \times MFI) + (0.477 \times MFI^2) \quad (4)$$

Faktor Erodibilitas Tanah (*K*)

Faktor *K* menunjukkan kerentanan alami tanah terhadap erosi. Penentuan nilai *K* dilakukan melalui reklasifikasi spasial terhadap *dataset* OpenLandMap (*Soil Texture Classes*) 2018 pada lapisan permukaan melalui Google Earth Engine. Kode indeks tekstur USDA (1 – 12) dikonversi secara langsung menjadi nilai *K* definitif merujuk pada standar erodibilitas global[17,18]. Rincian konversi tersebut dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Konversi Faktor Erodibilitas Tanah (K)

Kode Kelas	Kelas Tekstur Tanah (USDA)	Nilai K (ton·jam/MJ·mm)
1	*Clay*	0.22
2	*Silty Clay*	0.26
3	*Sandy Clay*	0.14
4	*Clay Loam*	0.30
5	*Silty Clay Loam*	0.32
6	*Sandy Clay Loam*	0.20
7	*Loam*	0.30
8	*Silt Loam*	0.38
9	*Sandy Loam*	0.13
10	*Silt*	0.48
11	*Loamy Sand*	0.04
12	*Sand*	0.02

Faktor Panjang dan Kemiringan Lereng (*LS*)

Faktor *LS* merepresentasikan pengaruh panjang dan kemiringan lereng terhadap kecepatan aliran permukaan. Parameter topografi ini diekstraksi dari *Digital Elevation Model* Nasional (Demnas) 2018

karena resolusi spasialnya (8 m/piksel) merupakan data terbuka paling detail saat ini. Perhitungannya menggunakan persamaan Desmet & Govers[19]. yang terbukti akurat untuk memproses komputasi spasial (GIS) pada lanskap topografi kompleks dan curam[20]. seperti dirumuskan pada Persamaan 5.

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^{m} \times \left(0.065 + (0.045 \times s) + (0.0065 \times s^2)\right) \quad (5)$$

Keterangan:
λ = Panjang lereng (m)
s = Kemiringan lereng (%).
m = Eksponen kemiringan lereng
(Nilai: 0.2 untuk $s < 1\%$; 0.3 untuk $s = 1-3\%$; 0.4 untuk $s = 3-5\%$; 0.5 untuk $s \geq 5\%$).

Faktor Tutupan Lahan (C)

Faktor C (rasio kehilangan tanah pada lahan bervegetasi dibanding lahan terbuka) dihitung menggunakan citra satelit Sentinel – 2 melalui indeks NDVI (Kanal *Near – Infrared*/Band 8 dan *Red*/Band 4). NDVI dipilih karena terbukti sensitif dan representatif dalam mendeteksi perubahan tutupan lahan aktual secara *spatiotemporal*. termasuk degradasi vegetasi akibat aktivitas pengupasan lahan di area tambang [7]. Nilai NDVI ini kemudian ditransformasi menjadi Faktor C mengacu pada formulasi Rouse[21] melalui Persamaan 6.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (6)$$

Keterangan:
$NDVI$ = *Normalized Difference Vegetation Index*
NIR = Reflektansi pita infra merah dekat
RED = Reflektansi pita merah

Berdasarkan nilai NDVI tersebut. Faktor C dihitung menggunakan Persamaan 7.

$$C = \exp\left(-2 \times \frac{NDVI}{1 - NDVI}\right) \quad (7)$$

Keterangan:
exp = Fungsi basis logaritma natural
$NDVI$ = Nilai indeks vegetasi hasil

Faktor Praktik Konservasi (P)

Faktor P merupakan rasio kehilangan tanah dengan dan tanpa tindakan konservasi. Mengingat area tambang terbuka umumnya minim intervensi konservasi. laju limpasan air murni dikontrol oleh kondisi topografinya. Oleh karena itu. pembobotan nilai P dievaluasi berdasarkan persentase kemiringan lereng (s) menggunakan klasifikasi menurut Arsyad [3]:

Tabel 2. Nilai Faktor Praktik Konservasi (P)

S	P
8 – 12%	0.60
12 – 16%	0.70
16 – 20%	0.80
>20%	0.90 – 1.00

Sediment Yield

Estimasi total sedimen yang masuk ke sungai (*Sediment Yield*) dihitung dengan mengalikan total erosi spasial dan *Sediment Delivery Ratio* (SDR) (Persamaan 8). Perhitungan SDR menggunakan model empiris Boyce[11]. berbasis luas area (Persamaan 9). Metode ini dipilih karena lebih efisien dan representatif untuk Daerah Tangkapan Hujan (DTH) skala kecil – menengah dengan topografi tambang yang dinamis. dibandingkan metode lain (seperti Roehl atau *sediment routing*) yang menuntut data morfometri kompleks dan historis *run – off* jangka panjang. Model Boyce sejalan dengan prinsip dasar sedimentasi: semakin luas area tangkapan. semakin panjang lintasan limpasan. sehingga peluang pengendapan material tererosi di lereng sebelum mencapai sungai utama menjadi lebih besar[22].

$$SY = A_{total} \times SDR \tag{8}$$

$$SDR = 0.41 \cdot (A_w)^{-0.3} \tag{9}$$

Keterangan:
SY = hasil sedimen (ton/tahun)
A_{total} = total erosi tanah pada area tangkapan hujan (ton/tahun)
SDR = Rasio pelepasan sedimen
A_w = Luas area tangkapan hujan (km²)

Analisis Hidrodinamika dan Transpor Sedimen

Data geometri penampang saluran diukur secara *in situ* menggunakan metode pembagian pias yang mengacu pada SNI 8066:2015[23]. karena morfologi dasar sungai alami yang sangat tidak beraturan. Data geometri tersebut kemudian digunakan untuk menentukan jari – jari hidrolik (R). yakni parameter efisiensi penampang saluran dalam mengalirkan air dan menahan gesekan dasar[12]. Nilai R dihitung melalui Persamaan 10.

$$R = \frac{A}{P} \tag{10}$$

Keterangan:
R = Jari – jari hidrolik (m)
A = Luas penampang basah saluran (m²)
P = Keliling basah saluran (m)

Perhitungan tegangan geser dasar (τ_0) membutuhkan masukan parameter kemiringan dasar saluran atau gradien energi (S). Pengukuran S secara langsung di sungai berbatu sangat rentan terhadap galat akibat turbulensi muka air. Oleh karena itu. estimasi nilai S dilakukan melalui perhitungan mundur (*back – calculation*) menggunakan Persamaan empiris Manning[12] (Persamaan 11).

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \tag{11}$$

Melalui transformasi aljabar. nilai kemiringan energi (S) dapat dideterminasi secara spesifik melalui Persamaan 12.

$$S = \left(\frac{V \cdot n}{R^{2/3}}\right)^2 \tag{12}$$

Keterangan:
V = Kecepatan aliran rata – rata (m/s)
n = Koefisien kekasaran *Manning*
S = Kemiringan dasar saluran (m/m)

Analisis Kurva Hjulström

Pendekatan grafis menggunakan Diagram Hjulström[9] dipilih karena menyajikan hubungan empiris antara kecepatan aliran dan ukuran butir. Pendekatan ini terbukti masih relevan dan efektif digunakan sebagai landasan evaluasi visual awal terhadap ambang batas pergerakan material (*incipient motion*) di saluran terbuka[13]. Nilai kecepatan aliran rata – rata (V) hasil pengukuran lapangan diplotkan terhadap ukuran butir sedimen dasar sungai (D_{50}) dari uji ayakan untuk mengidentifikasi status hidrodinamik partikel. yakni material tersebut cenderung mengalami erosi. transportasi. atau deposisi.

Analisis Kurva Shields

Validasi tahap kedua untuk menilai gerak awal butiran (*incipient motion*) dianalisis menggunakan parameter tegangan geser kritis[10]. Pendekatan analitis ini dipilih karena tingginya presisi metode tersebut dalam mengevaluasi batas gaya pendorong aliran dengan memasukkan unsur massa jenis (densitas) material sedimen spesifik[13]. Parameter tegangan geser Shields (θ) dirumuskan menggunakan Persamaan 13:

$$\theta = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho_w)gD} \tag{13}$$

Keterangan:
θ = Parameter tegangan geser Shields
τ_0 = Tegangan geser dasar sungai aktual (N/m²)
ρ_s = Massa jenis partikel (kg/m³)
ρ_w = Massa jenis fluida (kg/m³)
g = Percepatan gravitasi (9.81 m/s²)
D = Diameter butir partikel D_{50} (m)

Untuk menentukan nilai ambang batas kritis (θ_c) dari Kurva Shields. nilai parameter Shields tersebut diplotkan terhadap Angka Reynolds Partikel (*Boundary Reynolds Number*). Angka Reynolds Partikel tersebut dihitung menggunakan Persamaan 14.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_w V D}{\mu} \tag{14}$$

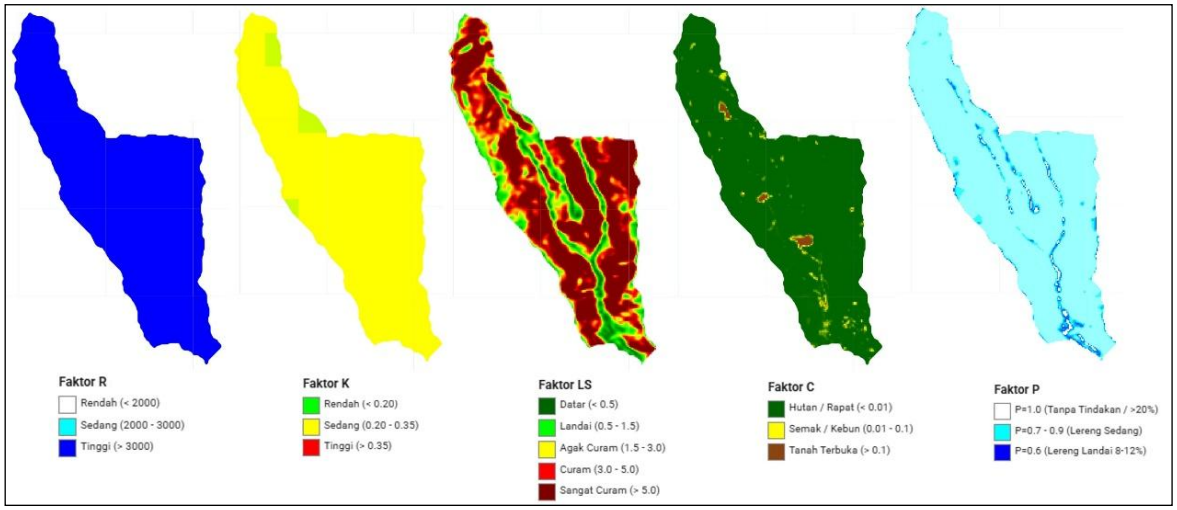
Keterangan:
Re = Angka Reynolds Partikel
ρ_w = Massa jenis fluida (kg/m^3)
V = Kecepatan rata – rata aliran (m/s)
D = Diameter butir partikel (D_{50})
μ = Viskositas fluida (*fluid viscosity*)
ν = Viskositas kinematik fluida (m²/s)

Hasil dan Pembahasan

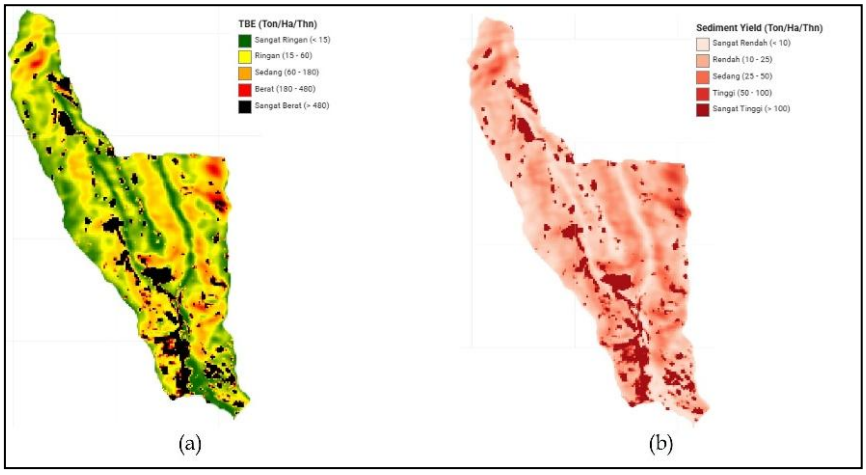
Analisis Laju Erosi (RUSLE) dan Sediment Yield Berbasis *Cloud Computing*

Analisis spasial berbasis Google Earth Engine (GEE) menunjukkan bahwa wilayah Kutogiri memiliki tingkat kerentanan lahan ekstrem dengan estimasi laju erosi mencapai 146.533,29 ton/tahun pada Daerah Tangkapan Hujan (DTH) seluas 140.47 hektar. di mana sebaran parameter pemodelannya dipetakan pada Gambar 3. Faktor erosivitas hujan (R) sebesar 44.259,68 MJ.mm/ha.jam.tahun menjadi penggerak

utama. yang dihitung menggunakan data 10 tahun untuk menghasilkan nilai *baseline* yang stabil[24]. Tingginya faktor erodibilitas (K) 0.270 – 0.300 dan topografi (LS) 37.664 mengonfirmasi kerentanan tanah pelapukan breksi pada lereng curam[25]. yang dampaknya diperparah oleh hilangnya vegetasi (Faktor C) serta minimnya konservasi (Faktor P) di area tambang. Kondisi ini menempatkan wilayah tersebut dalam klasifikasi Tingkat Bahaya Erosi (TBE) Sangat Berat menurut Perdirjen BPDASPS No. P.4/V – SET/2013 sebagaimana divisualisasikan pada Gambar 4(a). sekaligus memperkuat argumen bahwa tambang terbuka memicu lonjakan degradasi lahan[1]. Selanjutnya. parameter *Sediment Delivery Ratio* (SDR) sebesar 0.37 diterapkan untuk mereduksi *overestimation*[5]. Angka ini mengonfirmasi bahwa 37% dari total erosi (54.255,26 ton/tahun) berpotensi masuk ke sungai sebagai sedimen. Visualisasi akumulasi hasil sedimen tersebut ditunjukkan pada Gambar 4(b).



Gambar 3. Peta distribusi spasial faktor RUSLE



Gambar 4. Peta Tingkat Bahaya Erosi (a) dan *Sediment Yield* (b)

Karakteristik Fisik Tanah

Berdasarkan validasi fisik secara *in situ* melalui metode *Texture by Feel*[26] yang didukung hasil uji laboratorium pada Tabel 4. area sumber erosi pada perbukitan (T4. T5. dan T6) terbukti memiliki kandungan lempung yang hingga mencapai 33.49%. Melalui pengeplotan pada Segitiga Tekstur USDA. material ini diklasifikasikan sebagai *clay loam*. Kesesuaian data lapangan dan laboratorium berhasil memvalidasi akurasi dataset satelit *OpenLandMap*. sekaligus mempertegas temuan Ayuningtyas[25] bahwa lapisan tanah penutup di kawasan Kulon Progo rentan terdispersi oleh energi kinetik air hujan.

Tabel 3. Karakterisasi Tekstur Tanah Menggunakan Metode *Texture by Feel*

Titik Sampel	Visual dan Perabaan	Uji Fisik	Kelas Tekstur
T1. S1. S3. S4. S5	Butiran tunggal. tidak kohesif. ambyar.	Bola: Gagal mempertahankan bentuk.	*Sand*
T3	Kasar dengan sedikit daya ikat.	Bola: Terbentuk. Pita: Gagal.	*Loamy Sand*
T2. S2	Cukup kohesif. terasa dominan kasar.	Pita: Lemah (< 2.5 cm). Gosok: Sangat kasar	*Sandy Loam*
S6	Kohesif. sensasi perabaan merata.	Pita: Lemah (< 2.5 cm). Gosok: Seimbang (kasar – halus tidak dominan).	*Loam*
T4. T5. T6	Padat. cukup lengket/plastis.	Pita: Sedang (2.5 – 5 cm). Gosok: Seimbang (kasar – halus tidak dominan).	*Clay Loam*
P1. P2. P3. P2. P5. P6	Sangat padat. plastis. lengket.	Pita: Kuat (> 5 cm). Gosok: Sangat kasar akibat pasir.	*Sandy Clay*

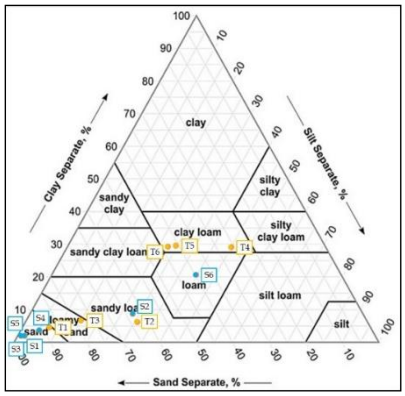
Sifat lempung yang mudah terdispersi hujan memicu laju erosi yang ekstrem pada area bukaan tambang. Hal ini memperkuat postulat Ramli [1] mengenai dampak destruktif aktivitas penambangan terbuka yang menyebabkan tanah kehilangan perlindungan vegetasi sehingga menjadi lebih rentan terkikis. Hasil pengujian distribusi butir yang dirangkum pada Tabel 4 menunjukkan karakteristik material yang mendasari tingginya tingkat erodibilitas tersebut.

Tabel 4. Hasil Pengujian Distribusi Butir Tanah

Parameter	T1	T2	T3	T4	T5	T6	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Kerikil (%)	5.47	17.00	17.57	1.43	2.57	4.82	36.10	4.29	32.62	46.63	42.30	16.64
Pasir (%)	87.81	62.71	77.90	23.59	38.46	40.93	96.12	62.40	97.09	91.04	97.12	38.16
Lanau (%)	7.24	30.28	14.66	42.92	27.52	25.40	1.88	27.71	0.91	4.97	0.89	38.17
Lempung (%)	4.95	7.01	7.44	33.49	34.02	33.66	2.00	9.89	2.00	3.99	1.99	23.67
Berat Jenis	2.55	2.59	2.62	2.72	2.46	2.54	2.65	2.58	2.65	2.63	2.61	2.62
Kelas Tekstur	*Sand*	*Gravelly Sandy Loam*	*Gravelly Loamy Sand*	*Clay Loam*	*Clay Loam*	*Clay Loam*	*Very Gravelly Sand*	*Sandy Loam*	*Gravelly Sand*	*Very Gravelly Sand*	*Very Gravelly Sand*	*Gravelly Loam*

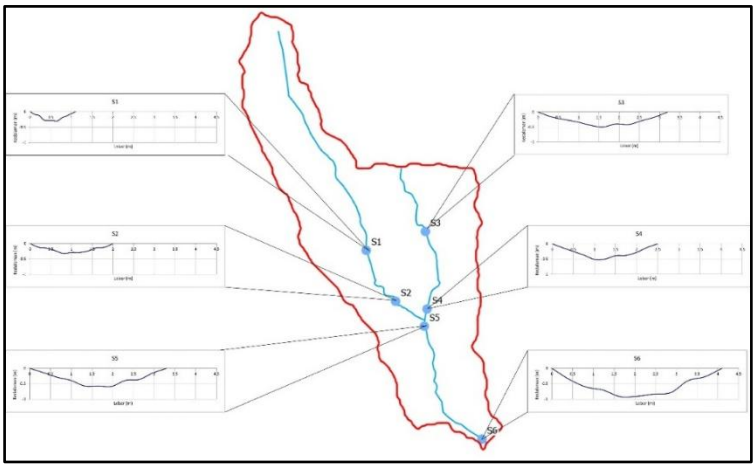
Sumber : Persentase fraksi kerikil (> 2 mm) dihitung terhadap berat total sampel secara keseluruhan. Persentase fraksi pasir. lanau. dan lempung dihitung sepenuhnya dari total fraksi tanah halus (< 2 mm).

Analisis hidrodinamika menunjukkan adanya akumulasi fraksi halus (23.67% lempung) pada zona deposisi terjauh di alur sungai (titik S6). Kehadiran partikel halus di titik hilir ini menjadi bukti terjadinya mekanisme transpor muatan dasar yang terus bergerak (*travelling bedload*). sebagaimana dikonseptualisasikan oleh Piton dan Recking [14]. Temuan ini membuktikan bahwa sedimen hasil erosi tidak mengendap di titik pelepasan. melainkan terus membebani arus utama sungai hingga ke zona hilir.



Gambar 5. Segitiga Tekstur USDA[27]

Hidrodinamika dan Transpor Sedimen

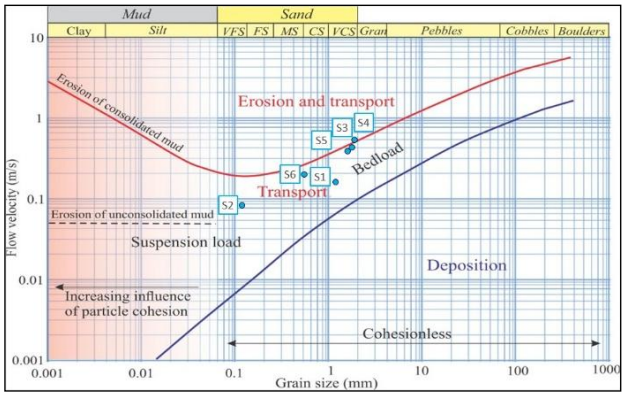


Gambar 6. Distribusi titik uji dan geometri penampang saluran sungai

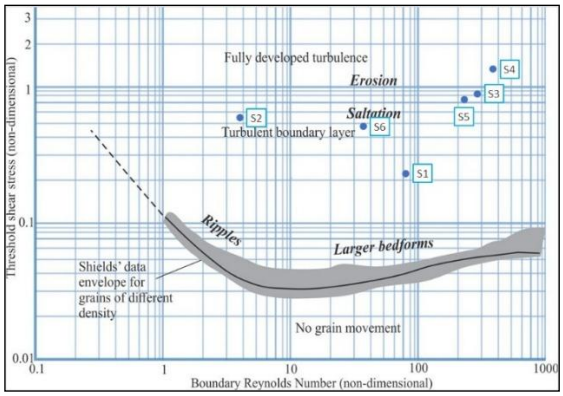
Analisis hidrodinamika pada enam titik pengamatan (S1 – S6) dilakukan untuk mengidentifikasi status mekanis sedimen dasar (ambang batas pergerakan partikel). dengan distribusi lokasi dan profil geometri salurannya dapat dilihat pada Gambar 6. Berdasarkan parameter kecepatan dan D_{50} (Tabel 4). plot Diagram Hjulström (Gambar 7) mengonfirmasi bahwa mayoritas titik (S1. S3. S5. S6) berada di zona transportasi dominan *bedload*. Temuan ini sejalan dengan penelitian Piton & Recking[14] yang membuktikan terjadinya mekanisme *travelling bedload* akibat gaya seret aliran. Sampel terhalus S2 (0.12 mm) berada di ambang batas *suspension load*. sedangkan S4 masuk ke zona erosi aktif yang memicu degradasi dasar sungai akibat gaya angkat turbulensi. Kondisi ini didukung oleh Trevisson dan Eiff[28] yang menyatakan bahwa aliran superkritis secara aktif menghasilkan gaya angkat (*lift force*) turbulensi. Gaya ini mampu mencabut sedimen berukuran halus (*fine – sediment erosion*) dari ikatan dasar alur yang stabil.

Tabel 5. Parameter diagram Hjulström

Sampel	D50 (mm)	Kecepatan Aliran (m/s)	Batas Kecepatan Deposisi (m/s)
S1	1.20	0.1650	≤ 0.0600
S2	0.12	0.0850	≤ 0.0075
S3	1.80	0.4437	≤ 0.0800
S4	1.90	0.5520	≤ 0.0950
S5	1.60	0.4008	≤ 0.0750
S6	0.55	0.2040	≤ 0.0330



Gambar 7. Diagram Hjulström[29]



Gambar 8. Kurva Shields[29]

Pemetaan tegangan geser Shields (θ) terhadap Angka Reynolds Partikel (Re_*) menunjukkan seluruh sampel melampaui kurva batas kritis pergerakan butiran. Titik S3. S4. dan S5 menempati posisi tertinggi pada zona erosi dan saltasi dengan profil turbulensi berkembang penuh. sementara S1. S2. dan S6 berada

pada zona pembentukan bentuk dasar (*bedforms*) di lapisan batas turbulen. Secara matematis. tegangan geser dasar aktual (τ_0) terbukti jauh melampaui ambang batas kritisnya (τ_c) seperti yang dirincikan pada Tabel 5 dan divisualisasikan pada Gambar 8. Meskipun material sedimen memiliki berat jenis (G_s 2.58 – 2.65). kombinasi gaya seret dan gaya angkat (*lift*) dari arus utama terbukti dominan memicu pergerakan partikel secara konstan. Temuan ini konsisten dengan Chen[13] yang membuktikan bahwa pada gradien energi tinggi. tegangan geser dasar mampu melampaui efek tahanan friksi dari massa jenis sedimen.

Tabel 6. Parameter hidrodinamika kurva Shields

Sampel	D50 (m)	τ0 (N/m2)	Parameter Shields (θ)	Angka Reynolds (Re)	Kondisi Kritis
S1	0.00120	4.3157	0.22764	78.8328	≤ 0.040
S2	0.00012	1.0823	0.58095	3.94778	≤ 0.038
S3	0.00180	25.3744	0.87006	286.7280	≤ 0.051
S4	0.00190	39.8531	1.30928	379.301	≤ 0.053
S5	0.00160	19.8258	0.78558	225.286	≤ 0.050
S6	0.00055	4.3908	0.50094	36.4446	≤ 0.035

Berdasarkan observasi lapangan. deposisi sedimen secara dominan hanya ditemukan di area bantaran sungai. Tingginya gaya gesek batas (*boundary friction*) pada tebing saluran menciptakan zona berenergi rendah yang meredam kecepatan aliran lateral. sehingga sedimen jatuh dari suspensinya. Mekanisme ini selaras dengan Zhang[30]. di mana friksi tepi saluran mendegradasi kapasitas angkut. Hal ini mempertegas bahwa mayoritas sedimen tambang di Kutogiri akan terus terangkut membebani arus utama dan terakumulasi ketika kecepatan aliran turun di bawah batas deposisi (Tabel 4).

Secara kuantitatif. estimasi pelepasan sedimen divalidasi melalui nilai *Sediment Delivery Ratio* (SDR) sebesar 0.37. Angka ini menunjukkan bahwa sekitar 54.255,26 ton sedimen berpotensi masuk ke sistem sungai setiap tahunnya. Penggunaan nilai SDR ini untuk mengoreksi perkiraan berlebih (*overestimation*) dari model empiris RUSLE [5]. Kondisi ini perlu mendapat perhatian karena sedimen tersebut terbukti terus bergerak di dasar sungai sebagai *travelling bedload*[14]. Tumpukan sedimen yang tidak terkendali di area hilir dapat menyebabkan pendangkalan sungai dan meningkatkan risiko banjir luapan[6]. Oleh karena itu. diperlukan penanganan teknis melalui optimalisasi ukuran kolam pengendapan (*settling pond*) di area tambang dan pembuatan dam penahan (*check dam*) pada saluran drainase utama.

Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan. terkonfirmasi bahwa aktivitas penambangan di Kutogiri memicu erosi sebesar 146.533.29 ton/tahun. Meskipun material sedimen didominasi oleh partikel dengan berat jenis (G_s 2.58 – 2.65). hasil analisis membuktikan bahwa energi arus sungai tetap mampu melampaui ambang kritis pergerakan melalui mekanisme *travelling bedload*. Kajian ini mengintegrasikan pemodelan spasial RUSLE dan SDR berbasis *cloud computing* dengan validasi hidrodinamika menggunakan Diagram Hjulström dan Kurva Shields. Pendekatan ini berhasil menjawab kelemahan studi terdahulu yang sering kali hanya berhenti pada estimasi angka kehilangan tanah. Kajian ini secara empiris mendeterminasi status mekanis mengenai daya angkut sedimen untuk memastikan material hasil erosi terangkut sebagai beban transpor (*bedload*) atau mengalami deposisi permanen di dasar saluran. Berdasarkan data bahwa 37% dari total erosi masuk ke sistem sungai. strategi pengelolaan lingkungan harus bertransformasi dari sekadar penataan lahan menjadi kombinasi teknis antara optimalisasi kolam pengendapan dan pembangunan cekdam. Upaya teknis ini diperlukan untuk mereduksi energi aliran guna mencegah sedimentasi persisten yang berisiko mendangkalkan sungai dan memicu banjir luapan di kawasan hilir.

Saran

Penelitian ini selanjutnya direkomendasikan untuk memetakan zona pengendapan sedimen di Sungai utama. Hasil pemetaan ini dapat difokuskan pada area pendangkalan kritis yang berguna untuk normalisasi Sungai dan mitigasi bencana.

Ucapan Terimakasih

Kami menyampaikan terima kasih kepada segenap civitas akademik Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta sebagai peneyelenggara Pendidikan Tinggi.

Daftar Pustaka

[1] M. Ramli. Purwanto. M. Thamrin. Maemuna. and M. Asrafil. "Analysis of soil erosion on mine area." in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2020. p. 12052.

[2] W. Winarti. E. Sukiyah. I. Syafri. and A. A. Nur. "Tectonic control of the Nanggulan formation based on morphometric analysis in Kulon Progo. Indonesia." *Indones. J. Geosci.*. vol. 9. no. 2. pp. 147 – 157. 2022.

[3] I. Andriyani. S. Wahyuningsih. and R. S. Arumsari. "Penentuan tingkat bahaya erosi di wilayah DAS Bedadung Kabupaten Jember." *J. Ilm. Rekayasa Pertan. Dan Biosist.*. vol. 8. no. 1. pp. 1 – 11. 2020.

[4] A. Handique. P. Dey. and S. K. Patnaik. "Application of Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model for the estimation of soil erosion and prioritization of erosion – prone areas in Majuli Island. Assam. India.." *J. Appl. Nat. Sci.*. vol. 15. no. 4. 2023.

[5] A. Ansari. G. Tayfur. and S. Mohammadi. "Assessment of soil erosion and sediment delivery ratio in the Arghandab Catchment. Kandahar Province. Afghanistan by using GIS – based RUSLE method." *Geomatics. Nat. Hazards Risk*. vol. 15. no. 1. p. 2384602. 2024.

[6] W. Handayani. U. E. Chigbu. I. Rudiarto. and I. H. S. Putri. "Urbanization and Increasing flood risk in the Northern Coast of Central Java—Indonesia: An assessment towards better land use policy and flood management." *Land*. vol. 9. no. 10. p. 343. 2020.

[7] S. Demir and İ. Dursun. "Assessment of pre – and post – fire erosion using the RUSLE equation in a watershed affected by the forest fire on Google Earth Engine: the study of Manavgat River Basin." *Nat. Hazards*. vol. 120. no. 3. pp. 2499 – 2527. 2024.

[8] R. Imawan and A. P. R. Pinem. "Pemetaan Laju Erosi Menggunakan Metode RUSLE dan Google Earth Engine Pada DAS Serayu." *J. JTIK (Jurnal Teknol. Inf. dan Komunikasi)*. vol. 8. no. 3. pp. 726 – 733. 2024.

[9] F. Hjulström. "Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris." 1935. *The Geological institution of the University of Upsala*.

[10] A. Shields. "Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung." *Mitteilungen der Preuss. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*. vol. 26. p. 5. 1936.

[11] R. C. Boyce. "With sediment – delivery ratios." *ARS – s.*. vol. 40. p. 61. 1974.

[12] V. Te Chow. *Open channel hydraulics*. 1959.

[13] K. Chen. Y. Lin. J. Liu. Z. He. and L. Jia. "Combined effects of massive reclamation and dredging on the variations in hydrodynamic and sediment transport in Lingdingyang Estuary. China." *Front. Earth Sci.*. vol. 18. no. 1. pp. 127 – 147. 2024.

[14] G. Piton and A. Recking. "The concept of travelling bedload and its consequences for bedload computation in mountain streams." *Earth Surf. Process. Landforms*. vol. 42. no. 10. pp. 1505 – 1519. 2017.

[15] H. M. J. Arnoldus. "An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation.." 1980.

[16] K. G. Renard and J. R. Freimund. "Using monthly precipitation data to estimate the R – factor in the revised USLE." *J. Hydrol.*. vol. 157. no. 1 – 4. pp. 287 – 306. 1994.
[17] P. Borrelli *et al.*. "Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015 – 2070)." *Proc. Natl. Acad. Sci.*. vol. 117. no. 36. pp. 21994 – 22001. 2020.
[18] T. Hengl *et al.*. "SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning." *PLoS One*. vol. 12. no. 2. p. e0169748. 2017.
[19] P. J. J. Desmet and G. Govers. "A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units." *J. soil water Conserv.*. vol. 51. no. 5. pp. 427 – 433. 1996.
[20] N. Badavath. S. Sahoo. and R. Samal. "Unveiling Meghalaya topography: slope length gradient (LS) factor estimation for insightful soil erosion evaluation." *J. Eng. Appl. Sci.*. vol. 71. no. 1. p. 174. 2024.
[21] N. El Assaoui. C. E. Bouiss. and A. Sadok. "Assessment of water erosion by integrating RUSLE model. GIS and remote sensing – Case of Tamdrost Watershed (Morocco)." *Ecol. Eng. Environ. Technol.*. vol. 24. 2023.
[22] J. Inyele. "Prioritization of soil erosion prone areas based on morphometric and land use/cover parameters in river Thiririka Watershed. Kiambu County Kenya." 2024. *SCHOOL OF PURE AND APPLIED SCIENCES. KENYATTA UNIVERSITY*.
[23] "Tata cara pengukuran debit aliran sungai dan saluran terbuka menggunakan alat ukur arus dan pelampung.." SNI 8066:2015. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta. Indonesia. 2015.
[24] H. Priyono and A. Munawar. "Erosion Hazard Analysis Using the RUSLE Model in the Upper Opak Sub Watershed: Analisis Bahaya Erosi Menggunakan Model RUSLE di Daerah Aliran Sungai Opak Hulu." *J. TANAH DAN AIR (Soil Water Journal)*. vol. 22. no. 2. pp. 24 – 34. 2025.
[25] E. A. Ayuningtyas. A. F. N. Ilma. and R. B. Yudha. "Pemetaan erodibilitas tanah dan korelasinya terhadap karakteristik tanah di DAS Serang. Kulonprogo." *J. Nas. Teknol. Terap.*. vol. 2. no. 1. pp. 37 – 46. 2018.
[26] U. S. D. of Agriculture. "Guide to Texture by Feel." 1999.
[27] D. G. Groenendyk. T. P. A. Ferre. K. R. Thorp. and A. K. Rice. "Hydrologic – process – based soil texture classifications for improved visualization of landscape function." *PLoS One*. vol. 10. no. 6. p. e0131299. 2015.
[28] M. Trevisson and O. Eiff. "Fine-Sediment Erosion and Sediment-Ribbon Morphodynamics in Coarse-Grained Immobile Beds." *Water Resour. Res.*. vol. 58. no. 11. p. e2021WR031837. 2022.
[29] B. Ricketts. "Fluid flow: Shields and Hjulström diagrams." Geological Digressions. Accessed: Jan. 01. 2026. [Online]. Available: https://www.geological – digressions.com/fluid – flow – shields – and – hjulstrom – diagrams/
[30] J. Zhang *et al.*. "An Analytical Solution to Predict the Distribution of Streamwise Flow Velocity in an Ecological River with Submerged Vegetation." *Water*. vol. 14. no. 21. p. 3562. 2022.