

# Analisis Kerawanan Erosi dengan Metode *Clustering* dan Pembobotan Berbasis *Google Earth Engine* di Kecamatan Toba, Kalimantan Barat

Firli Nisa Septi<sup>1</sup>, Joko Sampurno<sup>2\*</sup>, Irfana Diah Faryuni<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tanjungpura

\* Email koresponden: [jokosampurno@physics.untan.ac.id](mailto:jokosampurno@physics.untan.ac.id)

Submitted: 2025-09-25 Revisions: 2025-11-19 Accepted: 2026-02-01 Published: 2024-02-06

©2026 Fakultas Geografi UGM dan Ikatan Geograf Indonesia (IGI)

©2026 by the authors. Majalah Geografi Indonesia.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons

Attribution (CC BY SA) <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

**Abstrak.** Erosi tanah merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang signifikan dan perlu mendapat perhatian serius, khususnya di daerah dengan intensitas curah hujan tinggi serta perubahan tata guna lahan akibat aktivitas pertambangan, perkebunan, maupun aktivitas manusia lainnya, seperti yang terjadi di Kecamatan Toba, Kabupaten Sanggau, Kalimantan Barat. Kondisi ini tidak hanya dapat mengancam kelestarian dan fungsi lahan, tetapi juga berpotensi menurunkan kesuburan tanah, mengurangi produktivitas pertanian, serta mengakibatkan degradasi lingkungan yang berdampak langsung maupun tidak langsung bagi masyarakat serta ekosistem sekitarnya. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat kerawanan erosi di Kecamatan Toba dengan memanfaatkan metode *clustering* dan pembobotan berbasis platform *Google Earth Engine* (GEE). Analisis dilakukan dengan lima parameter utama, yaitu kemiringan lereng, tekstur tanah, curah hujan, Indeks vegetasi (NDVI), dan tutupan lahan pada periode 2019–2024. Parameter-parameter ini diklasifikasi ke dalam lima kelas, kemudian dikombinasikan dengan pembobotan untuk menghasilkan peta tingkat kerawanan erosi. Hasil penelitian menunjukkan sebagian besar wilayah Kecamatan Toba berada pada tingkat kerawanan sedang hingga tinggi, dengan luasan masing-masing sebesar 55.898 ha (49,6%) dan 11.950 ha (10,6%). Area dengan kerawanan rendah tercatat seluas 42.331 ha (37,5%) dan area sangat rawan seluas 2.583 ha (2,3%), sedangkan kelas tidak rawan tidak ditemukan. Model peta kerawanan erosi divalidasi menggunakan data titik kejadian longsor sebagai proxy tingkat kerawanan erosi dan menghasilkan tingkat akurasi 98,61%. Dengan demikian, penelitian ini dapat memberikan informasi penting mengenai distribusi spasial tingkat kerawanan erosi dan menjadi acuan strategis bagi pemerintah daerah, peneliti, maupun pihak terkait lainnya dalam perencanaan pengelolaan lahan, penyusunan strategi konservasi tanah, serta upaya mitigasi risiko erosi secara tepat.

**Kata kunci:** *clustering*; erosi; *Google Earth Engine*; pembobotan; Kecamatan Toba

**Abstract.** Soil erosion poses a major threat to environmental sustainability in humid tropical regions that are undergoing rapid land-use changes. The Toba District, Sanggau Regency, West Kalimantan, is particularly vulnerable because of the high rainfall intensity combined with extensive mining activities, plantation expansion, and other anthropogenic disturbances. These pressures accelerate land degradation, reduce soil fertility and agricultural productivity, and threaten the ecosystem services and local livelihoods. This study aimed to spatially assess and map soil erosion vulnerability in the Toba District, supporting sustainable land management and spatial planning efforts. The analysis was conducted using the cloud-based *Google Earth Engine* (GEE) platform, applying an integrated clustering and weighted overlay approach. Five key erosion-controlling parameters were incorporated: slope gradient, soil texture, rainfall intensity, vegetation condition represented by the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and land cover dynamics from 2019 to 2024. Each parameter was classified and weighted according to its relative influence on erosion processes to produce a comprehensive erosion vulnerability map. The results indicate a widespread vulnerability to erosion across the study area. Medium-vulnerability zones dominated, covering 55,898 ha (49.6%), followed by low-vulnerability regions, which accounted for 42,331 ha (37.5%). High- and very-high-vulnerability classes accounted for 11,950 ha (10.6%) and 2,583 ha (2.3%), respectively, with no non-vulnerable areas identified. Validation against historical landslide data as a proxy for erosion vulnerability yielded an overall accuracy of 98.61%. The resulting map provides a robust decision-support tool for prioritizing soil conservation measures and strategies to mitigate erosion risk.

**Keywords:** *clustering*; erosion; *Google Earth Engine*; weighting; Toba District

## PENDAHULUAN

Erosi tanah merupakan permasalahan lingkungan utama di daerah tropis (Sunarto, 2001; Razali, 2013), termasuk Kecamatan Toba, Kabupaten Sanggau, Kalimantan Barat. Tingginya curah hujan dan aktivitas penambangan bauksit mempercepat degradasi lahan serta meningkatkan kerentanan lereng akibat hilangnya vegetasi pelindung (Subowo, 2011; Prasetyo *et al.*, 2025). Kondisi ini menekankan pentingnya pemetaan kerawanan erosi sebagai dasar pengelolaan lahan (Worosuprojo, 2005; Sukristiyanti *et al.*, 2010).

Pemodelan erosi telah dikembangkan melalui pendekatan empiris, semi-empiris, dan fisik. Model empiris seperti USLE (Wischmeier & Smith, 1978), RUSLE (Renard, 1995), dan MUSLE (Williams, 1975) umum digunakan untuk menghitung kehilangan tanah dalam satuan ton/ha/tahun (Rahmad *et al.*, 2017). Namun, ketika data erosi aktual tidak tersedia, pendekatan *erosion vulnerability mapping* berbasis indeks menjadi alternatif yang relevan. Pendekatan ini mengintegrasikan parameter biofisik seperti kemiringan lereng, curah hujan, tanah, vegetasi, dan tutupan lahan untuk

menghasilkan indeks kerawanan (Pourghasemi *et al.*, 2017; Arabameri *et al.*, 2019; Ayele *et al.*, 2022). Metode *clustering* dan pembobotan telah diterapkan dalam berbagai studi kerentanan bencana (Suwardi *et al.*, 2019; Ramayanti *et al.*, 2015), namun penerapannya pada *Google Earth Engine* (GEE) untuk pemetaan kerawanan erosi di kawasan pertambangan bauksit masih terbatas.

Penelitian ini mengintegrasikan metode *clustering* dan pembobotan untuk memetakan kerawanan erosi di Kecamatan Toba, Kalimantan Barat. Pemetaan kerawanan erosi menggunakan lima parameter utama, yaitu curah hujan, tekstur tanah, kemiringan lereng, NDVI, dan tutupan lahan periode 2019–2024. Proses pemetaan memanfaatkan GEE sebagai *platform* analisis geospasial berbasis komputasi awan (Gorelick *et al.*, 2017). Hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung kebijakan pengelolaan lahan serta upaya mitigasi risiko erosi dan konservasi tanah secara berkelanjutan, terutama dalam menghadapi tantangan yang dapat ditimbulkan oleh kegiatan penambangan bauksit.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menganalisis tingkat kerawanan erosi dan menghitung luas tiap kelas kerawanan di Kecamatan Toba menggunakan pendekatan *clustering* dan pembobotan. Data penginderaan jauh *multi-temporal* digunakan untuk menggambarkan kondisi wilayah secara menyeluruh. Karena data observasi erosi aktual di lapangan tidak tersedia, validasi dilakukan menggunakan titik kejadian longsor sebagai *proxy* indikator spasial ketidakstabilan lahan. Penelitian ini berfokus pada pemetaan kerawanan erosi (*erosion vulnerability*), bukan pada estimasi laju erosi kuantitatif seperti pada model USLE, MUSLE, atau RUSLE.

Penelitian dilakukan di Kecamatan Toba, Kabupaten Sanggau, Provinsi Kalimantan Barat, yang secara geografis terletak pada rentang koordinat 0°15'00" – 0°30'00" LU dan 110°00'00" – 110°15'00" BT. Kecamatan Toba memiliki luas sekitar 1.127,61 km<sup>2</sup>, atau sekitar 8,77% dari

total luas Kabupaten Sanggau. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada tingginya aktivitas pertambangan bauksit dan kerentanan wilayah terhadap degradasi lahan (BPS Kabupaten Sanggau, 2024). Kecamatan Toba terletak di Kabupaten Sanggau, Provinsi Kalimantan Barat, dengan akses utama melalui jalan provinsi yang menghubungkan Sanggau dan Tayan Hilir. Area penelitian dapat dijangkau melalui kombinasi jalan beraspal dan jalan tanah menuju wilayah perbukitan, yang sebagian besar berada dekat dengan kawasan perkebunan dan kawasan aktivitas pertambangan.

Periode data penelitian diambil dari Januari 2019 hingga Desember 2024, dengan kegiatan survei lapangan. Selanjutnya, validasi dilakukan pada bulan Juni dan Juli 2024. Adapun data yang digunakan dalam analisis kerawanan erosi di Kecamatan Toba meliputi beberapa komponen yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Rancangan penelitian mengadopsi pendekatan *spasial-kuantitatif* dengan memanfaatkan integrasi antara penginderaan jauh, dan sistem informasi geografis (SIG). Lima parameter utama erosi yaitu curah hujan, tekstur tanah, kemiringan lereng, NDVI, dan tutupan lahan diproses menggunakan platform GEE untuk menghasilkan peta tematik masing-masing parameter. Metode *clustering* digunakan untuk mengelompokkan wilayah berdasarkan kemiripan karakteristik parameter, sementara teknik pembobotan diterapkan untuk menilai kontribusi relatif setiap parameter terhadap proses erosi (Ramayanti *et al.* 2015). Dengan demikian, metode yang digunakan dalam penelitian ini berada dalam kategori *erosion vulnerability modelling*, yaitu pengelompokan unit spasial berdasarkan kemiripan karakteristik lahan yang secara ilmiah diketahui berpengaruh terhadap proses erosi.

Sasaran penelitian ini difokuskan pada dua hal utama yang saling berkaitan. Pertama, penelitian bertujuan untuk menghasilkan peta zonasi kerawanan erosi yang disajikan dalam lima kelas berdasarkan nilai indeks kerawanan erosi. Kedua, penelitian ini juga ditujukan untuk menghitung luas

Tabel 1. Data Penelitian

No	Data	Jenis	Sumber
1	Data curah hujan bulanan ( <i>OpenLandMap Precipitation Monthly</i> (Hengl & Parente, 2022) Resolution 1 km	Sekunder	Google Earth Engine (GEE) address:OpenLandMap/CLM/CLM_PRECIPITATION_SM2RAIN_M/v01
2	Data tekstur tanah pada kedalaman 0 cm ( <i>OpenLandMap Soil Texture Class</i> (Tomislav Hengl, 2018) Resolution 250 m	Sekunder	Google Earth Engine (GEE) address:OpenLandMap/SOL/SOL_TEXTURE-CLASS_USDATT_M/v02
3	Data elevasi digital NASA SRTM Digital Elevation (Farr <i>et al.</i> 2007) Resolution 250 m	Sekunder	Google Earth Engine (GEE) address:USGS/SRTMGL1_003
4	Data <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI) MODIS/Terra Vegetation Indices (MOD13Q1.061)(Didan 2021) Resolution 1 arc-second (sekitar 30 m)	Sekunder	Google Earth Engine (GEE) address: MODIS/061/MOD13Q1
5	Data tutupan lahan tahunan <i>Copernicus Global Land Cover Layers</i> (CGLS-LC100 Collection 3) Resolution 100 m	Sekunder	Google Earth Engine (GEE) address: COPERNICUS/Landcover/100m/ProbaVC3/Global/2019
6	Data batas administratif Kecamatan Toba dalam format <i>shapefile</i>	Sekunder	portal Indonesia Geospasial. <a href="https://www.indonesia-geospasial.com/">https://www.indonesia-geospasial.com/</a>
7	Data Observasi 72 titik longsor	Primer	Survei lokasi

area pada masing-masing kelas kerawanan erosi. Perhitungan dilakukan dalam dua bentuk, yaitu dalam satuan ha untuk mengetahui besaran wilayah secara fisik serta dalam bentuk persentase terhadap keseluruhan luas wilayah penelitian agar dapat memberikan perbandingan proporsional antar kelas.

Dalam penelitian ini, data spasial digunakan sebagai bahan utama untuk menganalisis kerawanan erosi. Proses pengolahan dilakukan dengan bantuan

platform GEE, di mana data diakses, diproses, dan dianalisis menggunakan kode sederhana dalam bahasa *JavaScript* untuk membantu dalam menganalisis serta memvisualisasikan data citra satelit dan penginderaan jauh dalam skala besar (Tamiminia *et al.* 2020). Selain itu, penelitian melibatkan survei lapangan dengan GPS untuk mencatat koordinat titik longsor atau area yang menunjukkan tanda-tanda erosi, sehingga hasil analisis

Tabel 2. Kelas Curah Hujan (Tri *et al.*, 2024); (Sofia *et al.*, 2023)

Kelas	Rentang Nilai Curah Hujan	Skor	Bobot
Sangat Kering	< 1500 mm	1	
Kering	1500 - 2000 mm	2	
Sedang/Lembab	2000 - 2500 mm	3	3
Basah	2500- 3000 mm	4	
Sangat Basah	>3000 mm	5	

Tabel 3. Kelas Tekstur Tanah (Sofia *et al.*, 2023)

Kelas	Rentang Nilai(soil tex)	Skor	Bobot
Sangat Kasar	$\leq 3$	1	
Sedang	> 3 hingga < 5	2	
Cukup Halus	> 5 hingga < 7	3	5
Halus	> 7 hingga < 9	4	
Sangat Halus	> 9	5	

Tabel 4. Kelas Kemiringan Lereng (Huda *et al.*, 2019); (Sofia *et al.*, 2023)

Kelas Kelerengan	Rentang Kelerengan	Skor	Bobot
Datar	(0 — 8%)	1	
Landai	(8 — 15%)	2	
Agak Curam	(15 — 25%)	3	5
Curam	(25 — 40%)	4	
Sangat Curam	(>40%)	5	

Tabel 5. Kelas NDVI (Sofia *et al.*, 2023)

Kelas NDVI	Rentang NDVI	Skor	Bobot
Sangat Baik	NDVI > 0,7	1	
Baik	0,5 < NDVI < 0,7	2	
Sedang	0,3 < NDVI < 0,5	3	2
Buruk	0,1 < NDVI < 0,3	4	
Sangat Buruk	NDVI < 0,1	5	

Tabel 6. Kelas Tutupan Lahan (Sofia *et al.*, 2023)

Kelas	Tutupan Lahan	Skor	Bobot
1	Hutan	1	
2	Hutan produksi, perkebunan	2	
3	Semak, padang rumput	3	2
4	Pertanian, ladang, permukiman	4	
5	Tanah terbuka/lahan kosong	5	

dapat dibandingkan dengan kondisi nyata. Walaupun erosi dan longsor memiliki mekanisme berbeda, namun keduanya sering dipicu oleh faktor serupa seperti curah hujan tinggi, vegetasi rendah, dan lereng terjal (Mangunsukarjo, 1999; Sunarto, 1999). Karena itu, titik longsor tetap dapat memberikan informasi tambahan tentang area yang secara biofisik rentan terhadap erosi (Larsen, dkk., 2010; Masruroh *et al.*, 2016).

Instrumen penelitian berupa kode pemrograman (*script*) yang dikembangkan dalam platform *GEE* untuk memproses data spasial. Metode *clustering* digunakan dalam penelitian ini bertujuan untuk mengelompokkan nilai parameter berdasarkan kesamaan karakteristik fisiknya, sehingga area dengan kondisi biofisik yang serupa dapat digolongkan ke dalam kelas kerawanan yang sama. Pendekatan ini dipilih karena mampu menangkap pola spasial secara data-driven tanpa memerlukan asumsi distribusi awal. *Clustering* telah terbukti efektif dalam pemodelan kerawanan erosi pada penelitian sebelumnya, seperti yang ditunjukkan oleh Suwardi dkk. (2019), serta penelitian lain yang menerapkan metode serupa pada berbagai kondisi lingkungan. Tahapan utama dalam pemrosesan dimulai dengan memanggil seluruh dataset dan memotongnya sesuai batas administrasi Kecamatan Toba. Setiap parameter kemudian diklasifikasikan ke dalam lima kelas (Tabel 2–6) dan dinormalisasi ke skala 0–1 dengan cara membagi skor parameter dengan nilai maksimum 5. Setelah itu, setiap parameter diberikan bobot berdasarkan tingkat pengaruhnya terhadap erosi sesuai Tabel 2–6, di mana semakin besar dampak suatu parameter maka semakin besar bobot yang diberikan (Saputra *et al.*, 2024). Skoring parameter pada penelitian ini mengambil nilai asli dari Sofia *et al.* (2023), yang disesuaikan terhadap literatur *USLE/RUSLE* (Wischmeier & Smith, 1978; Renard, 1995) dan kajian multi-kriteria (Pourghasemi *et al.*, 2017; Arabameri *et al.*, 2019), sehingga selaras dengan mekanisme erosi tanah. Tahap akhir adalah menghitung indeks kerawanan erosi dengan menjumlahkan hasil perkalian antara nilai parameter yang telah dinormalisasi dengan bobotnya, kemudian mengklasifikasikan nilai indeks tersebut ke dalam lima kelas kerawanan menggunakan interval yang seragam.

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan berbasis pengolahan data spasial. Pertama, data curah hujan dari dataset *OpenLandMap Precipitation Monthly* dijumlahkan untuk menghasilkan nilai tahunan, lalu dipotong (*clip*) sesuai dengan batas Kecamatan Toba dan diklasifikasikan ke dalam lima kelas intensitas curah hujan (mm/tahun) berdasarkan Tabel 2. Kedua, pemanggilan data parameter tekstur tanah menggunakan dataset dari *OpenLandMap Soil Texture Class* untuk mendapatkan data tekstur tanah pada kedalaman 0 meter yang kemudian dikategorikan

dalam lima kelas sesuai Tabel 3. Tahap ketiga, parameter kemiringan lereng dihitung dari dataset *NASA SRTM Digital Elevation* yang diolah menjadi peta lereng dalam persen, kemudian dikelompokkan ke dalam lima kelas dari datar hingga sangat curam sesuai Tabel 4. Keempat, indeks vegetasi diperoleh dari *MOD13Q1.061 Terra Vegetation Indices*, dengan nilai *NDVI* yang telah diskalakan dan dipotong sesuai batas wilayah penelitian, lalu diklasifikasikan ke dalam lima kelas berdasarkan Tabel 5. Terakhir, pemanggilan dan *clip* data parameter tutupan lahan yang diperoleh dari *Copernicus Global Land Cover Layers (CGLS-LC100 Collection 3)* tahun 2019 yang mencakup berbagai jenis penggunaan lahan, kemudian diklasifikasikan berdasarkan Tabel 6.

Setelah semua parameter terklasifikasi, dilakukan normalisasi ke dalam skala 0–1 agar setiap faktor memiliki nilai yang sebanding. Tahap berikutnya adalah pembobotan berdasarkan tingkat pengaruh masing-masing parameter terhadap erosi, dengan rincian kemiringan lereng sebesar 5/17, *NDVI* sebesar 5/17, tekstur tanah 3/17, serta curah hujan dan tutupan lahan masing-masing 2/17. Untuk menentukan interval setiap kelas hasil normalisasi, digunakan rumus Interval Tingkat Kelas (ITK) (Todingan, *et al.* 2024) pada persamaan 1.

$$ITK = \frac{\text{Nilai Maksimum} - \text{Nilai Minimum}}{\text{Jumlah Kelas}} \dots\dots\dots (1)$$

Dengan nilai maksimum 1 dan nilai minimum 0 serta jumlah kelas sebanyak 5, diperoleh:

$$ITK = \frac{1-0}{5} = 0,2$$

Sehingga setiap kelas kerawanan erosi memiliki interval sebesar 0,2 pada skala normalisasi 0–1. Hasil pembobotan ini kemudian menghasilkan Indeks Kerawanan Erosi yang digunakan untuk membentuk peta zonasi tingkat erosi di Kecamatan Toba yang dapat dilihat pada Tabel 7. Rentang nilai indeks pada Tabel 7 merepresentasikan tingkat kerawanan relatif, bukan besaran kehilangan tanah. Nilai ini tidak dapat langsung dibandingkan dengan satuan erosi kuantitatif seperti ton/ha/tahun. Kemudian untuk meningkatkan representasi temporal, seluruh data spasial dirata-ratakan dari periode 2019–2024. Model yang digunakan dalam penelitian ini menghasilkan indeks kerawanan erosi berdasarkan kombinasi lima parameter biofisik. Oleh karena itu, hasil akhir berupa peta zonasi tingkat kerawanan, bukan estimasi besaran kehilangan tanah.

Tabel 7. Kelas Kerawanan Erosi (Todingan, *et al.* 2024)

Kelas Kerawanan Erosi	Rentang Nilai Indeks
Tidak Rawan	≤ 0,20
Kerawanan Rendah	> 0,20 – ≤ 0,40
Kerawanan Sedang	> 0,40 – ≤ 0,60
Kerawanan Tinggi	> 0,60 – ≤ 0,80
Sangat Rawan	> 0,80 – ≤ 1,00

Tahap selanjutnya adalah perhitungan luasan tiap kelas kerawanan erosi menggunakan perangkat lunak QGIS. Perhitungan ini memberikan gambaran mengenai luas wilayah yang masuk ke dalam kategori tidak rawan, kerawanan rendah, sedang, tinggi, dan sangat rawan. Informasi tersebut penting untuk mengetahui besarnya area yang berisiko terhadap erosi tanah di wilayah penelitian.

Karena data observasi erosi aktual di lapangan tidak tersedia, penelitian ini menggunakan titik kejadian longsor sebagai indikator spasial ketidakstabilan lahan. Meskipun longsor bukan representasi langsung dari proses erosi, indikator ini tetap dianggap relevan untuk menunjukkan area dengan kondisi biofisik yang lemah, terutama pada lereng curam dan lahan terbuka. Validasi dilakukan untuk menilai tingkat keakuratan model peta kerawanan erosi dengan membandingkan hasil pemodelan terhadap data kejadian longsor yang diperoleh melalui survei lapangan di Kecamatan Toba. Proses validasi dilakukan melalui *overlay* antara peta kerawanan erosi dan titik lokasi longsor untuk melihat sejauh mana model mampu mengidentifikasi kawasan yang benar-benar rawan erosi, yang selanjutnya dievaluasi secara kuantitatif berdasarkan perhitungan akurasi sebagaimana dijelaskan dalam Persamaan 2 (Mamengko & Rohmala, 2024).

$$\text{Nilai Keakuratan Model Peta (\%)} = \left( \frac{v'}{n_v} \right) \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

Dengan keterangan  $v'$  adalah total titik pada daerah cukup rawan, rawan, dan sangat rawan. Kemudian untuk  $n_v$  adalah jumlah titik validasi.

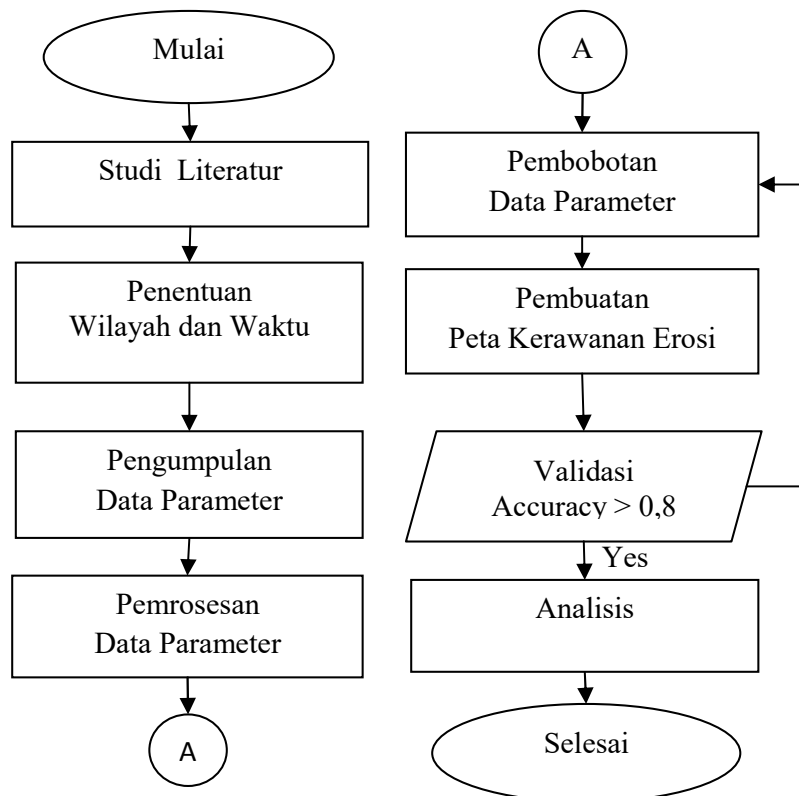
Diagram alir penelitian secara umum digambarkan secara visual pada Gambar 1.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses analisis tingkat kerawanan erosi diawali dengan evaluasi terhadap setiap parameter secara terpisah (kemiringan lereng, tekstur tanah, curah hujan, NDVI, dan tutupan lahan) untuk mendapatkan peta kerawanan parsial masing-masing faktor. Tahap selanjutnya adalah integrasi kelima peta parameter tersebut menggunakan teknik *clustering* dan pembobotan yang ditentukan, menghasilkan peta kerawanan erosi akhir yang mencerminkan sintesis dari semua faktor pemicu. Uraian mendetail tentang klasifikasi dan hasil analisis untuk tiap-tiap parameter dibahas pada bagian di bawah ini.

### Kemiringan Lereng

Analisis kemiringan lereng digunakan untuk memberikan gambaran awal mengenai pola topografi di Kecamatan Toba. Peta kemiringan lereng di Kecamatan Toba yang telah dirata-ratakan berdasarkan data model spasial periode 2019–2024 yang ditampilkan pada Gambar 2 menunjukkan Kecamatan Toba diperkirakan didominasi oleh kelas kemiringan 0–8% (datar) dengan luas sekitar ±80.552 ha, yang mencakup sekitar 71,4% dari total area. Kelas kemiringan landai (8–15%) diperkirakan mencakup ±22.028 ha atau sekitar 19,5%. Kemiringan agak curam (15–25%) diperkirakan mencakup ±7.541 ha atau sekitar 6,7%, sedangkan kelas curam (25–40%) sekitar ±1.749 ha atau sekitar 1,6%. Sedangkan kelas sangat curam (>40%) diperkirakan meliputi ±891 ha atau 0,8% dari keseluruhan wilayah penelitian. Semakin curam dan panjang lereng maka semakin tinggi kecepatan aliran permukaan, sehingga meningkatkan potensi erosi.



Gambar 1. Diagram Alir

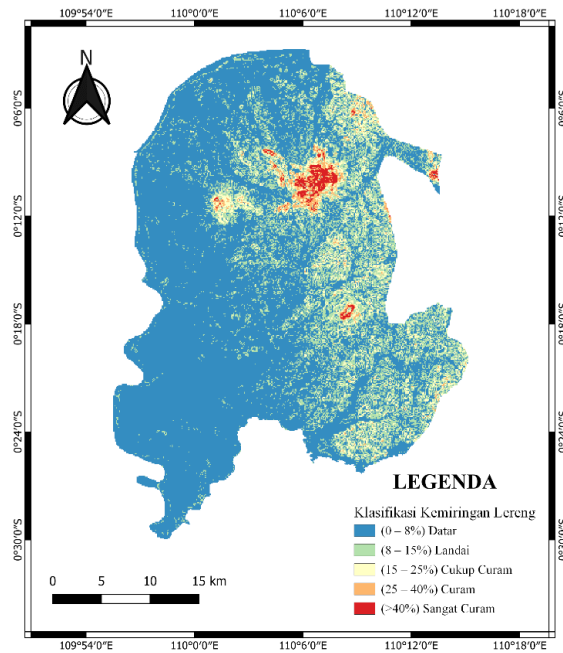
**Tekstur Tanah**

Tekstur tanah merupakan salah satu parameter penting dalam analisis tingkat kerawanan lahan terhadap proses erosi dan degradasi tanah (Halengkara *et al.*, 2012). Tekstur tanah dapat mempengaruhi berbagai aspek terkait daya ikat partikel, tingkat infiltrasi air, serta daya simpan air di suatu daerah, yang masing-masing berkontribusi signifikan dalam menentukan tingkat risiko erosi. Pada Gambar 3 peta klasifikasi tektur tanah di Kecamatan Toba yang telah dirata-ratakan menggunakan data model spasial periode 2019–2024. Wilayah didominasi tekstur cukup halus ±37.970 ha (33,6%) berupa lempung berdebu/lempung liat dengan retensi air tinggi namun rentan erosi di lereng curam. Tekstur halus ±35.129 ha (31,2%) berupa tanah liat yang menahan air tetapi

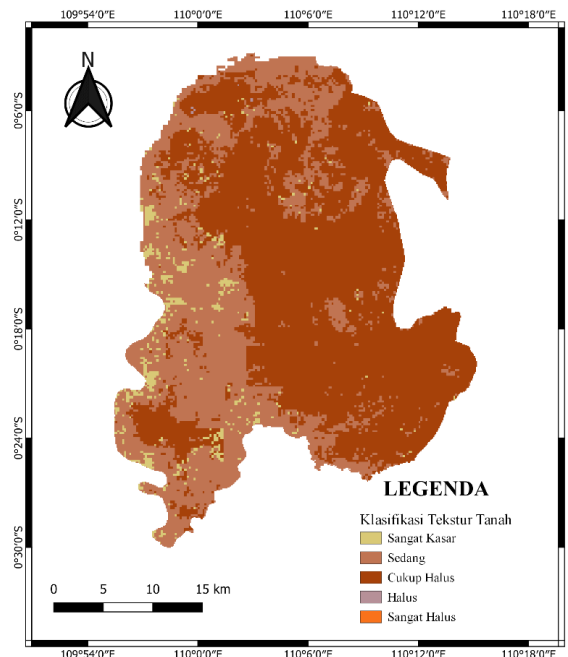
berpotensi padat dan tergenang. Tekstur sedang ±22.343 ha (19,8%) berupa campuran lempung berpasir dan liat berdebu dengan infiltrasi moderat. Tekstur sangat kasar ±17.139 ha (15,2%) berupa tanah berpasir/berkerikil dengan infiltrasi tinggi. Tekstur sangat halus hanya ±180 ha (0,2%) dengan daya ikat air sangat tinggi dan rentan genangan.

**Curah Hujan**

Curah hujan merupakan salah satu parameter yang mempengaruhi tingkat kerawanan lahan terhadap erosi dan degradasi tanah. Intensitas curah hujan yang tinggi dapat meningkatkan energi tumbuk butiran air hujan ke permukaan tanah. Energi ini mampu memecah agregat tanah, melepaskan partikel-partikel halus, dan mempercepat proses pengikisan,



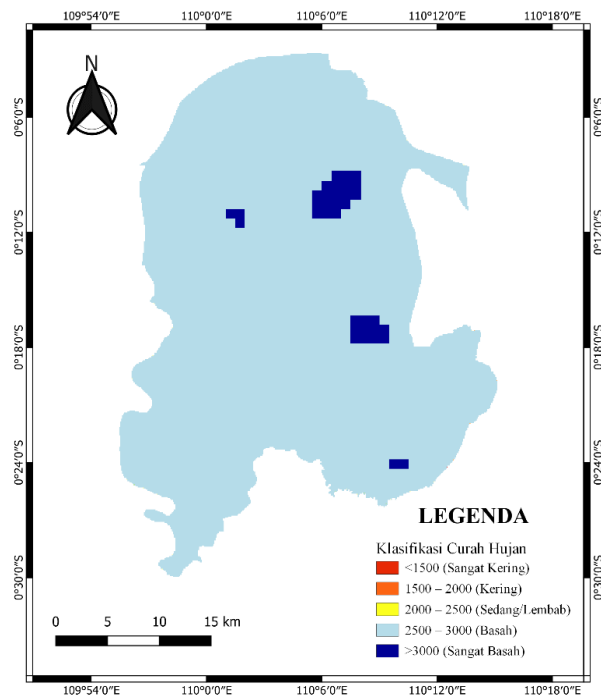
Gambar 2. Peta Klasifikasi Kemiringan Lereng



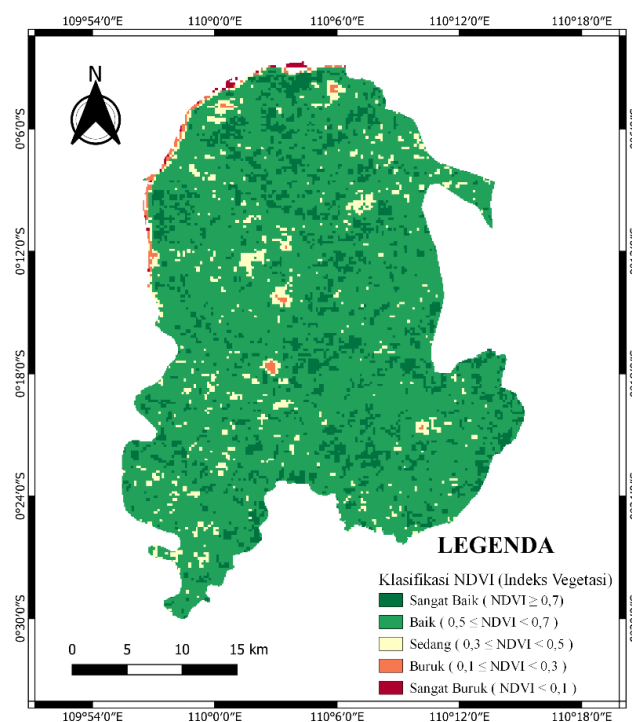
Gambar 3. Peta Klasifikasi Tekstur Tanah

terutama pada lahan yang tidak terlindungi oleh vegetasi (Rahayu *et al.*, 2016). Selain intensitas, distribusi curah hujan secara spasial dan temporal juga dapat berpengaruh terhadap stabilitas tanah. Pada distribusi yang tidak merata dapat menimbulkan ketidakseimbangan neraca air tanah, menyebabkan genangan di satu sisi dan kekeringan di sisi lain. Kondisi ini memperburuk sistem drainase alami dan berkontribusi terhadap meningkatnya aliran permukaan (*run off*), yang pada gilirannya memperbesar potensi erosi dan degradasi tanah. Peta distribusi rata-rata curah hujan 2019–2024 yang dapat dilihat pada Gambar 3 menunjukkan

hampir seluruh Kecamatan Toba tergolong basah dengan curah hujan 2.500–3.000 mm mencakup  $\pm 107.123$  ha (95%), sedangkan kelas sangat basah ( $>3.000$  mm) seluas  $\pm 5.638$  ha (5%). Tidak ada wilayah yang termasuk sangat kering hingga lembab, menandakan dominasi hujan berintensitas tinggi di seluruh wilayah. Pola ini menjadi salah satu faktor risiko utama dalam pengelolaan sumber daya lahan dan konservasi lingkungan, sehingga diperlukan perencanaan yang matang serta penerapan teknologi konservasi yang tepat untuk meminimalkan dampak degradasi.



Gambar 4. Peta Klasifikasi Curah Hujan



Gambar 5. Peta Klasifikasi NDVI

## NDVI

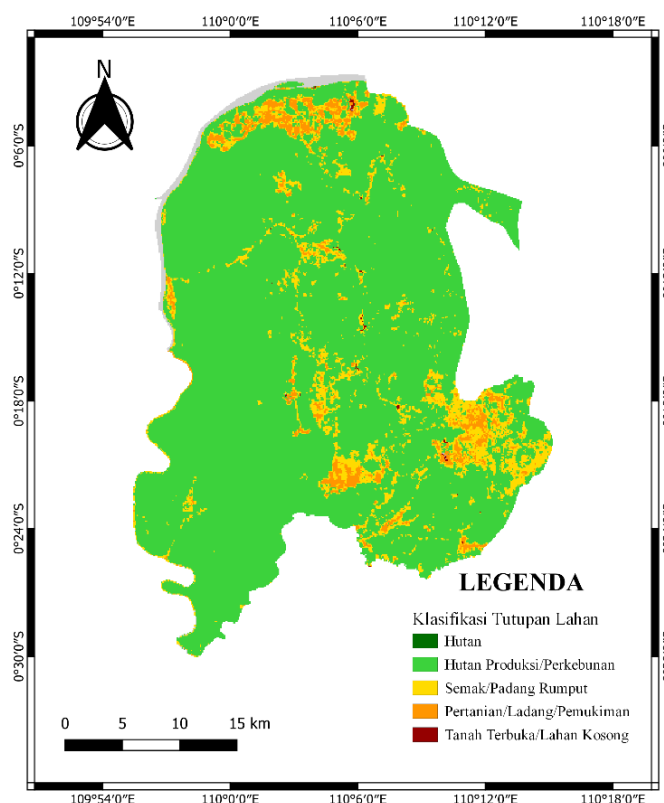
Indeks Vegetasi atau NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) merupakan salah satu parameter kunci yang digunakan untuk mengukur tingkat kerapatan, kesehatan, dan kualitas vegetasi di suatu wilayah. Nilai NDVI yang tinggi umumnya mengindikasikan bahwa area tersebut didominasi oleh tutupan vegetasi yang lebat, sehat, dan tumbuh dengan baik, sedangkan nilai NDVI yang rendah dapat mencerminkan lahan dengan tutupan vegetasi yang jarang, terbuka, gundul, atau bahkan area yang telah mengalami degradasi atau kerusakan. Dalam penelitian ini, NDVI digunakan sebagai salah satu parameter untuk mengidentifikasi tingkat kerawanan erosi dengan memperhitungkan daya proteksi vegetasi terhadap laju aliran air dan pengikisan tanah. Peta klasifikasi NDVI rata-rata 2019–2024 yang dapat dilihat pada Gambar 5 menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Kecamatan Toba didominasi oleh kelas baik ( $0,5 < \text{NDVI} < 0,7$ ), dengan luasan mencapai sekitar 54.556 ha atau 48,4% dari total wilayah, ini mengindikasikan tutupan vegetasi yang masih lebat dan sehat, yang berperan penting dalam menjaga kestabilan tanah serta mengurangi resiko erosi. Kelas sangat baik ( $\text{NDVI} \geq 0,7$ ) mencakup sekitar 54.251 ha atau 48,1%, menunjukkan kondisi vegetasi yang sangat mendukung proses konservasi lahan secara alami. Kelas sedang ( $0,3 < \text{NDVI} < 0,5$ ) diperkirakan seluas 3.005 ha atau 2,7%, yang bisa mempresentasikan wilayah dengan penutupan vegetasi sedang atau mulai terdegradasi. Adapun kelas buruk ( $0,1 < \text{NDVI} < 0,3$ ) mencakup wilayah seluas 641 ha atau 0,6%, dan kelas sangat buruk ( $\text{NDVI} < 0,1$ ) mencakup luasan sekitar 308 ha atau 0,3% menunjukkan area dengan tutupan vegetasi sangat rendah dan tingkat kerentanan erosi yang tinggi. Hasil ini menunjukkan dominasi vegetasi sehat yang berperan dalam menjaga stabilitas lahan, meskipun area dengan vegetasi rendah tetap memiliki kerentanan erosi tinggi.

## Tutupan Lahan

Tutupan lahan berperan penting dalam konservasi tanah dan pengendalian erosi karena tiap kelas memiliki kemampuan berbeda dalam menahan hujan, meresapkan air, dan mengurangi limpasan. Peta klasifikasi tutupan lahan rata-rata tahun 2019–2024 pada Gambar 6 diperkirakan wilayah Kecamatan Toba didominasi hutan produksi/perkebunan (kelas 2)  $\pm 59.933$  ha (53,11%) berupa tanaman homogen seperti kelapa sawit dan karet. Area semak/padang rumput (kelas 3)  $\pm 43.156$  ha (38,30%) rentan erosi di lereng curam. Pertanian, ladang, dan permukiman (kelas 4)  $\pm 6.755$  ha (6%) berisiko tinggi akibat aktivitas manusia. Tanah terbuka/lahan kosong (kelas 5)  $\pm 2.300$  ha (2,04%) sangat rawan erosi karena minim vegetasi, biasanya lahan kritis/bekas tambang. Hutan alami (kelas 1)  $\pm 617$  ha (0,55%).

## Analisis Kerawanan Erosi

Kerawanan erosi tanah muncul sebagai hasil interaksi berbagai faktor biofisik lahan, meliputi kemiringan lereng, curah hujan, jenis tanah, indeks vegetasi, dan tutupan lahan. Peta klasifikasi kerawanan erosi pada Gambar 7 membagi wilayah penelitian ke dalam lima kelas, yaitu tidak rawan, rendah, sedang, tinggi, dan sangat rawan. Hasil *clustering* menunjukkan bahwa kelas sedang merupakan kelompok terbesar, mencakup 55.898 ha (49,6%), diikuti oleh kelas rendah seluas 42.331 ha (37,5%). Kelas tinggi dan sangat rawan masing-masing mencakup 11.950 ha (10,6%) dan 2.583 ha (2,3%). Tidak ditemukan area yang masuk dalam kategori tidak rawan. Distribusi spasial dari hasil *clustering* ini kemudian divisualisasikan pada peta kerawanan akhir (Gambar 7), yang menampilkan pola kerawanan tertinggi berada pada wilayah dengan lereng terjal dan tutupan vegetasi rendah.

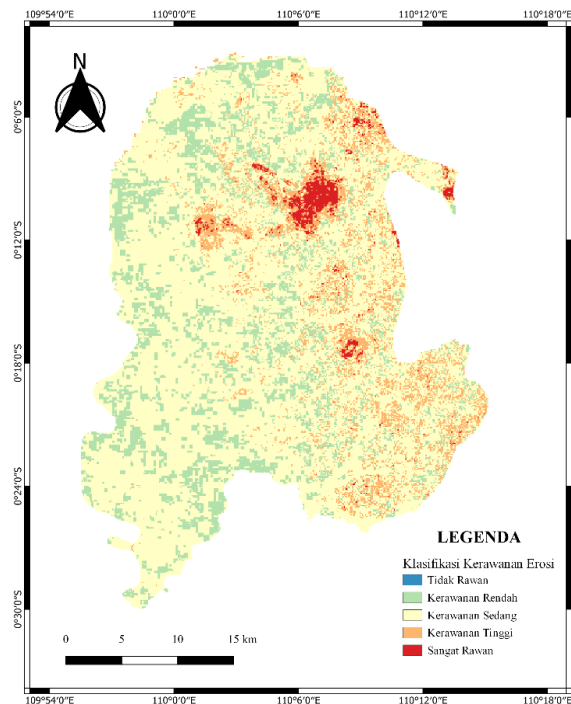


Gambar 6. Peta Klasifikasi Tutupan Lahan

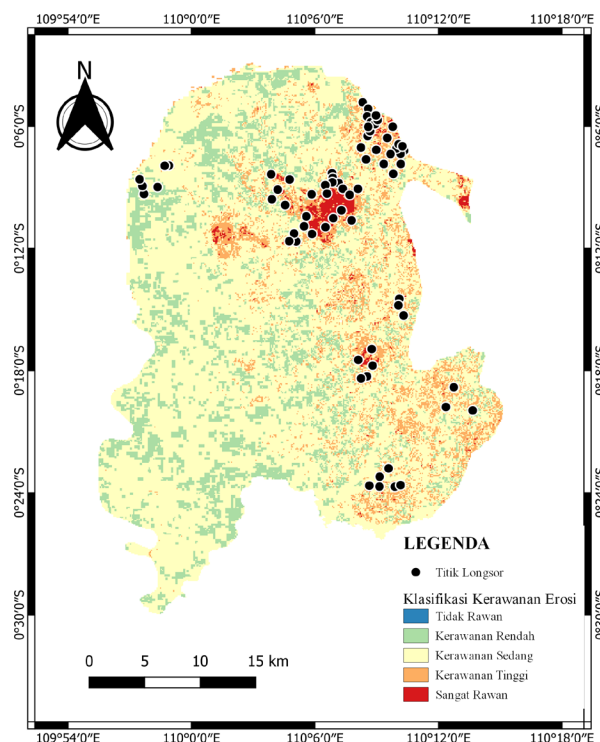
### Validasi Peta Kerawanan Erosi

Karena ketiadaan data erosi, maka data kejadian longsor digunakan sebagai proxy untuk validasi. Data kejadian longsor tidak memvalidasi secara langsung terhadap proses erosi, melainkan sebagai indikator tambahan untuk melihat kesesuaian spasial area yang memiliki kondisi biofisik tidak stabil. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil klasifikasi model dengan data titik longsor lapangan di Kecamatan Toba, di mana titik longsor digunakan sebagai *ground truth* dan di *overlay* dengan peta kerawanan untuk

menghitung akurasi menggunakan Persamaan 2 (Mamengko & Rohmala, 2024). Hasilnya validasi model peta kerawanan erosi menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, sebagaimana terlihat dari kesesuaiannya dengan titik-titik kejadian longsor di Kecamatan Toba yang dapat dilihat pada Gambar 8, di mana dari 72 titik longsor, sebanyak 71 titik berada pada zona cukup rentan hingga sangat rentan, sementara 1 titik berada di area aman. Dengan demikian, peta kerawanan erosi yang dihasilkan memiliki tingkat kesesuaian spasial sebesar 98,61% dan dapat dikategorikan sangat baik.



Gambar 7. Peta Klasifikasi Kerawanan Erosi



Gambar 8. Peta Kerawanan Erosi Terhadap Titik Validasi Kejadian Longsor

Survei lapangan dilakukan untuk memverifikasi keberadaan titik kejadian longsor pada lokasi yang diindikasikan sebagai area rawan erosi. Koordinat setiap titik dicatat menggunakan GPS, sedangkan kondisi lapangan didokumentasikan melalui observasi visual dan pengambilan foto (lampiran).

Meski demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, seperti metode pembobotan yang masih sederhana, keterbatasan resolusi dan kualitas data GEE, serta pendekatan *clustering* yang digunakan tidak mempertimbangkan dinamika temporal seperti perubahan tutupan lahan musiman atau kejadian hujan ekstrem yang dapat mempengaruhi tingkat erosi. Selain itu, tidak adanya validasi menggunakan data erosi aktual di lapangan membuat hasil pemetaan bersifat indikatif. Keterbatasan ini penting untuk dipertimbangkan dan dapat menjadi dasar pengembangan penelitian selanjutnya.

## KESIMPULAN

Pada penelitian ini dihasilkan peta erosi kerawanan di Kecamatan Toba dengan akurasi 98,61%, yang mencakup lima kelas kerawanan. Hasil analisis menunjukkan tidak ada wilayah yang termasuk kelas tidak rawan. Kelas kerawanan rendah mencakup 42.331 ha (37,54%), kerawanan sedang 55.898 ha (49,58%), kerawanan tinggi 11.950 ha (10,60%), dan sangat rawan 2.583 ha (2,28%). Dengan demikian, sebagian besar wilayah berada pada tingkat kerawanan sedang hingga tinggi. Parameter yang paling mempengaruhi erosi kerawanan adalah kemiringan lereng dan kondisi vegetasi (NDVI), yang memiliki bobot tertinggi dalam model. Kerawanan sedang hingga tinggi umumnya muncul pada area berlereng miring-curam, vegetasi jarang, dan jenis tanah halus yang mudah tererosi saat curah hujan tinggi. Sedangkan kelas sangat rawan terutama berada di lereng sangat curam dengan tutupan lahan terbuka di bagian tengah hingga timur laut Kecamatan Toba. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi topografi, vegetasi, dan penggunaan lahan menjadi pengendali utama erosi kerawanan. Informasi ini dapat dimanfaatkan untuk perencanaan pengelolaan wilayah, dengan prioritas konservasi diarahkan pada kawasan berlereng curam dan bervegetasi rendah, terutama pada kelas tinggi dan sangat rawan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT ANTAM UBPB Tayan atas dukungan, izin, serta fasilitas yang diberikan selama proses penelitian ini berlangsung. Bantuan data dan informasi yang diperoleh sangat berharga dalam menyelesaikan penelitian ini.

## KONTRIBUSI PENULIS

Penulis pertama bertanggung jawab atas perancangan metode penelitian, analisis data, interpretasi hasil penelitian, serta penyusunan naskah publikasi. Penulis kedua berperan dalam coding program dan review naskah publikasi. Penulis Ketiga analisis data dan interpretasi hasil penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

Arabameri, A., Pradhan, B., Rezaei, K., & Conoscenti, C. (2019). Gully erosion vulnerability mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis techniques. *Catena*, 180, 282–297.

Ayele, G. T., Seka, A. M., Taddese, H., Jemberrie, M. A., Ndehedehe, C. E., Demissie, S. S., ... & Melesse, A. M. (2022). Relationship

of attributes of soil and topography with land cover change in the Rift Valley Basin of Ethiopia. *Remote Sensing*, 14(14), 3257.

- Badan Pusat Statistik Kabupaten Sanggau. (2024). Kecamatan Toba dalam angka 2024. Website Badan Pusat Statistik Kabupaten Sanggau diakses pada tanggal 3 Januari 2025, dari <https://sanggaukab.bps.go.id/id/publication/2024/09/26/c0b85d9281a0691545ebd183/kecamatan-toba-dalam-angka-2024.html>.
- Buchhorn, M., Smets, B., Bertels, L., Roo, B. D., Lesiv, M., Tsendbazar, N.-E., Herold, M., & Fritz, S. (2020). *Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: Collection 3: Epoch 2017: Globe* (Versi V3.0.1).
- Didan, K. (2021). *MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061* [Dataset]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. E. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.
- Halengkara, L., Gunawan, T. & Purnama, S. 2012. Analisis Kerusakan Lahan untuk Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Melalui Integrasi Teknik Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis. *Majalah Geografi Indonesia*, 26(2), 149-173.
- Hengl, T. (2018). *Kelas tekstur tanah (sistem USDA) untuk 6 kedalaman tanah (0, 10, 30, 60, 100, dan 200 cm) pada 250 m* (Versi v02).
- Hengl, T., & Parente, L. (2022). *Monthly precipitation in mm at 1 km resolution (multisource average) based on SM2RAIN-ASCAT 2007–2021, CHELSA Climate and WorldClim* (0.3).
- Indonesia Geospasial. (2025, 3 Januari). *Sistem informasi geografi dan penginderaan jauh*. Diakses dari <https://www.indonesia-geospasial.com/>.
- Julianto, F. D., Putri, D. P. D., & Safi'i, H. H. (2020). Analisis perubahan vegetasi dengan data Sentinel-2 menggunakan Google Earth Engine. *Jurnal Penginderaan Jauh dan Pengolahan Data Citra Digital Indonesia*, 2(2), 13–18.
- Larsen, I. J., Montgomery, D. R., & Korup, O. (2010). Landslide erosion controlled by hillslope material. *Nature Geoscience*, 3(4), 247–251.
- Mamengko, D. V., & Rohmala, F. K. (2024). Analisis ancaman banjir Kota Sorong, Papua Barat. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 25(2), 73–82.
- Mangunsukarjo, K. Kajian Geomorfologi untuk Perencanaan Penggunaan Lahan di Daerah Aliran Sungai Oyo, Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta. *Majalah Geografi Indonesia*, 13(2), 1-11.
- Masruroh, H., Sartohadi, J. & Setiawan, A. 2016. Membangun Metode Identifikasi Longsir Berbasis Foto Udara Format Kecil di DAS Bompon, Magelang, Jawa Tengah. *Majalah Geografi Indonesia*, 30(2), 169-181.
- Pourghasemi, H. R., Yousefi, S., Kornejady, A., & Cerdà, A. (2017). Performance assessment of individual and ensemble data-mining techniques for gully erosion modeling. *Science of the Total Environment*, 609, 764–775. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.198>
- Prasetyo, M. H., Baderan, D. W. K., & Hamidu, M. S. (2025). Dampak Kerusakan Lingkungan Akibat Eksploitasi Sumber Daya Mineral dari Kegiatan Pertambangan. *Hidroponik: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Teknologi Dalam Ilmu Tanaman*, 2(2), 01-11.
- Rahayu, N. L. D., Sudarmadji, Faida, L. R. W. 2016. Pengaruh Vegetasi Kawasan Sabuk Hijau (Green Belt) Waduk Sermo Kulonprogo

- terhadap Kenampakan Hasil Proses Erosi dan Pemanfaatan oleh Masyarakat. *Majalah Geografi Indonesia*, 30(1), 76-87.
- Rahmad, R., Nurman, A. & Wirda, M. A. 2017. Integrasi Model SWAT dan SIG dalam Upaya Menekan Laju Erosi DAS Deli, Sumatera Utara. *Majalah Geografi Indonesia*, 31(1), 46-55.
- Ramayanti, L. A., Yuwono, B. D., & Awaluddin, M. (2015). Pemetaan tingkat lahan kritis dengan menggunakan penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografi (Studi Kasus: Kabupaten Blora). *Jurnal Geodesi Undip*, 4(2), 200–207.
- Razali, R. 2010. Studi Bahaya Erosi Tanah dengan Metode Pemetaan Cepat (*Rapid Mapping*) di Sub DAS Cimanuk Hulu. *Majalah Geografi Indonesia*, 28(2), 149-168.
- Renard, K. G. (1995). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook 703.
- Saputra, J., Sukarna, R. M., Junaedi, A., & Rizal, M. (2024). Kajian Tingkat Kerawanan Erosi Tanah Berbasis Spasial dan Survei Lapangan di Kecamatan Tewah Kabupaten Gunung Mas Provinsi Kalimantan Tengah. *Jurnal Hutan Tropika–Vol*, 19(2), 326-337.
- Sofia, G., Rezki, A., & Yuherman, Y. (2023). Pemetaan lahan kritis di Kabupaten Dharmasraya menggunakan sistem informasi geografis. *Journal on Education*, 5(4), 17596–17604. <https://doi.org/10.31004/joe.v5i4.4303>.
- Subowo, G. (2011). Penambahan sistem terbuka ramah lingkungan dan upaya reklamasi pascatambang untuk memperbaiki kualitas sumberdaya lahan dan hayati tanah. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 5(2).
- Sukristiyanti, Hartono, Sutono. 2010. Evaluasi Potensi Erosi Tanah Menggunakan Teknologi Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis di DAS Bodri Hulu. *Majalah Geografi Indonesia*. 24(2), 142-156.
- Sunarto. 1999. Sistem Pengelolaan Wilayah Pantai Berdasarkan Tingkat Kerawanan Bencana Marin di Pantai Utara Jawa Tengah. *Majalah Geografi Indonesia*, 16(2), 69-86.
- Sunarto. 2001. Konservasi Pantai Teluk Kupang Nusa Tenggara Timur. *Majalah Geografi Indonesia*, 15(1), 85-100.
- Suwardi, A. M., Susetyo, B., & Hermawan, E. (2019, Oktober). Analisa spasial clustering zonasi rawan bencana tanah longsor wilayah Bogor Selatan berbasis WebGIS. *Seminar Nasional Teknologi Informasi*, 2, 182–190.
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 164, 152-170.
- Todingan, M. P., Sinolungan, M., Kamagi, Y. E., & Lengkong, J. (2014, Februari). Pemetaan daerah rawan longsor di wilayah Sub DAS Tondano dengan Sistem Informasi Geografis. *Cocos*, 4(2).
- Williams, J. R. (1975). Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, 244–252.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning* (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Worosuprojo, S. 2005. Bahaya Erosi Permukaan di Daerah Aliran Sungai Oyo Kabupaten Gunungkidul Propvinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. *Majalah Geografi Indonesia*, 19(1), 89-102.