

ANALISIS FAULT FRACTURE DENSITY (FFD) PADA ZONA RAWAN BENCANA TANAH LONGSOR KABUPATEN NGAWI

FAULT FRACTURE DENSITY (FFD) ANALYSIS IN LANDSLIDE-PRONE ZONES IN NGAWI REGENCY

Dea Mutiara Jannah^{1,*}, Nugroho Budi Wibowo², Hana Rosyida³, Fathunajah Elsha C.⁴, Salma Khoirunnisa⁵, Indar Mery S. A.⁶, Icha Khaerunnisa⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga
Jl. Laksda Adisucipto Sleman, Gedung Student Center Lt. III No. 3.70

*Email corresponding: deamutiarajannah@gmail.com

Email: 21106020027@student.uin-suka.ac.id

Email: 21106020037@student.uin-suka.ac.id

Email: 21106020046@student.uin-suka.ac.id

Email: 21106020026@student.uin-suka.ac.id

Email: 21106020010@student.uin-suka.ac.id

²BMKG Stasiun Geofisika Sleman, DIY

Email: nugrohobudiwibowo.uinsuka@gmail.com

Cara sitasi: D. M. Jannah, N. B. Wibowo, H. Rosyida, F. Elsha C., S. Khoirunnisa, I. Mery S. A, dan I. Khaerunnisa, "Analisis Fault Fracture Density (Ffd) pada Zona Rawan Bencana Tanah Longsor Kabupaten Ngawi," *Kurvatek*, vol. 10, no. 2, pp. 155-162, 2025. doi: 10.33579/krvtk.v10i2.5796 [Online].

Abstrak — Ngawi merupakan salah satu daerah di provinsi Jawa Timur dengan kawasan yang memiliki variasi topografi berupa dataran rendah dan dataran tinggi, karena letaknya yang berada di lereng Gunung Lawu. Terdapat beberapa daerah di Kabupaten Ngawi yang memiliki potensi rawan bencana tanah longsor, yang kemudian diidentifikasi kesesuaian antara peta rawan tanah longsor yang berasal dari penggabungan parameter curah hujan, kemiringan lereng, dan kondisi geologi. Selanjutnya peta rawan tanah longsor tersebut dibandingkan dengan peta FFD yang dihasilkan dari analisis kelurusan DEM (*Digital Elevation Model*). Peta tanah longsor yang dihasilkan memiliki kesesuaian dengan peta FFD yang dihasilkan, yaitu berada pada kecamatan Sine, kecamatan Ngrambe, kecamatan Jogorogo, dan Kecamatan Kendal.

Kata kunci: FFD, Tanah Longsor, Parameter Curah Hujan, Parameter Kemiringan Lereng, Kondisi Geologi

Abstract — Ngawi is one of the areas in East Java province with an area that has topographic variations in the form of lowlands and highlands, because of its location on the slopes of Mount Lawu. There are several areas in Ngawi Regency that have the potential to be prone to landslides, which were then identified as suitable between the landslide hazard map which was derived from combining rainfall parameters, slope slope and geological conditions. Next, the landslide hazard map was compared with the FFD map produced from DEM (*Digital Elevation Model*) alignment analysis. The resulting landslide map is in accordance with the FFD map produced, namely in Sine sub-district, Ngrambe sub-district, Jogorogo sub-district and Kendal sub-district.

Keywords: FFD, Landslides, Rainfall Parameters, Slope Parameters, Geological Conditions

I. PENDAHULUAN

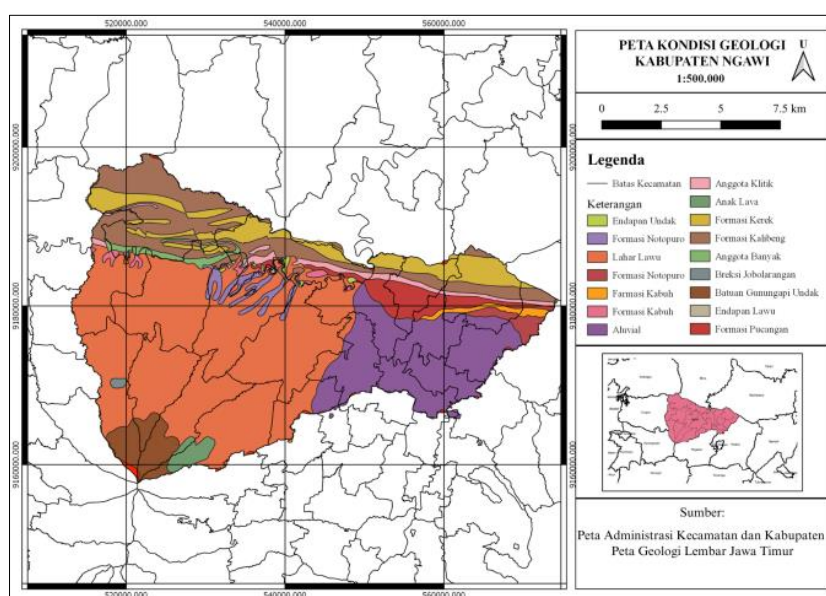
Indonesia merupakan negara yang berada pada titik pertemuan tiga lempeng tektonik, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Indo-Australia. Hal tersebut menyebabkan negara Indonesia memiliki tingkat kerawanan yang tinggi terhadap bencana alam [1]

Menurut Nugroho, dkk tahun 2009, bencana alam merupakan salah satu peristiwa alam yang dapat melanda setiap saat, dimanapun dan kapanpun serta dapat menimbulkan risiko bagi kehidupan manusia [2]. Terdapat beberapa hal yang menyebabkan negara Indonesia rawan terhadap bencana, salah satunya yaitu karena faktor iklim. Indonesia merupakan negara yang beriklim tropis, sehingga menyebabkan negara ini rentan terhadap bencana seperti, banjir, tanah longsor, hingga kekeringan [3].

Salah satu bencana alam geologi yang dapat memakan korban jiwa serta menyebabkan adanya kerugian material yang sangat besar adalah bencana tanah longsor [2]. Tanah longsor merupakan perpindahan material penyusun lereng seperti, bahan rombakan tanah, batuan, ataupun material campuran lainnya yang bergerak keluar lereng [4]. Tanah longsor adalah salah satu bencana alam yang sering terjadi di Indonesia. Bencana ini dapat terjadi karena dipengaruhi beberapa faktor, diantaranya yaitu faktor curah hujan, dan juga faktor kemiringan lereng suatu daerah.

Kabupaten Ngawi merupakan salah satu kabupaten yang berada di provinsi Jawa Timur, dan sebagian daerah kabupaten ini yang posisinya berada di lereng Gunung Lawu. Berdasarkan data BPBD Kabupaten Ngawi, terdapat beberapa desa yang rawan terhadap terjadinya bencana tanah longsor. Daerah rawan bencana tanah longsor tersebut tersebar di beberapa kecamatan, yaitu kecamatan Sine, kecamatan Ngrambe, kecamatan Jogorogo, dan kecamatan 156endal.

Pada peta geologi lembar Jawa Timur, kabupaten Ngawi tersusun atas berbagai formasi batuan. Kawasan penelitian merupakan salah satu daerah yang memiliki potensi akan terjadinya bencana tanah longsor. Hal tersebut dikarenakan kawasan provinsi Jawa Timur termasuk salah satu kawasan yang sebagian besar wilayahnya berupa perbukitan dan pegunungan [5].

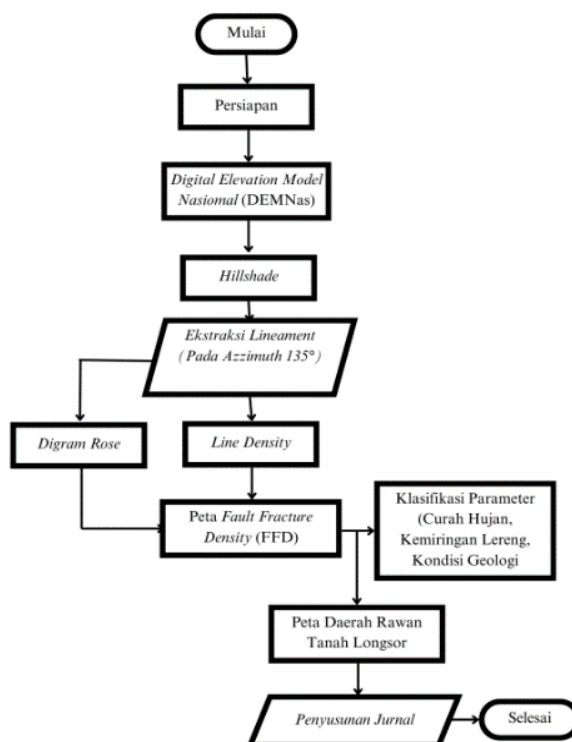


Gambar 1. Peta Geologi Kabupaten Ngawi

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemetaan kawasan yang rawan akan bencana tanah longsor. Selain itu, juga guna mengidentifikasi kesesuaian antara pemetaan kawasan rawan bencana tanah longsor dengan pembuatan *Fault Fracture Density* (FFD) yang dihasilkan dari ekstraksi kelurusan (*lineament*) pada data DEM.

Terdapat beberapa parameter yang digunakan untuk mengidentifikasi kawasan yang memiliki potensi mengalami bencana tanah longsor, yaitu dengan menggunakan parameter curah hujan, kemiringan lereng, dan juga kondisi geologi dengan melihat kekuatan batuan penyusun formasi kawasan penelitian. Hasil identifikasi atau pemetaan tersebut diidentifikasi kesesuaiannya dengan hasil pembuatan *Fault Fracture Density* (FFD). FFD dihasilkan dari analisis pola kelurusan (*lineament*) pada kawasan penelitian dengan menggunakan data DEM (*Digital Elevation Model*). Data DEM ini digunakan untuk menganalisis sebaran kelurusan dan arah dominan kelurusan yang digunakan untuk pembuatan *Rose Diagram*. Kemudian hasil kelurusan pada data DEM tersebut digunakan untuk pembuatan FFD, yang hasilnya akan dibandingkan dengan peta potensi tanah longsor. Daerah dengan nilai FFD yang tinggi akan memiliki potensi bencana tanah longsor, dikarenakan terdapat zona lemah yang diakibatkan oleh struktur geologi pada kawasan tersebut [8].

II. METODE PENELITIAN



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode SIG (Sistem Informasi Geografis). Sistem informasi ini berfungsi untuk menyimpan, memanggil kembali, mengolah, menganalisis, dan menyajikan data yang berupa informasi keruangan (spasial) [5]. Kawasan yang dijadikan objek pada penelitian ini adalah wilayah Kabupaten Ngawi, Jawa Timur. Penelitian ini dilakukan untuk menginterpretasikan tingkat kerawanan bencana tanah longsor di Kabupaten Ngawi.

Dalam penelitian ini menggunakan data sekunder, yaitu berupa studi literatur berdasarkan data penelitian sebelumnya serta beberapa data yang diolah menggunakan aplikasi (*software*), sebagai berikut:

- Data DEM SRTM Kabupaten Ngawi yang diperoleh dari, sumber: <https://www.indonesia-geospasial.com/>
- SHP Kecamatan dan Kabupaten Indonesia, yang diperoleh dari, sumber: <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web>
- Data *Fault Fracture Density* (FFD) dan *Diagram Rose* (*WindRose*) yang diperoleh dari pengolahan data DEM menggunakan aplikasi *Global Mapper 20*, *RockWorks 16*, *QGIS 3.10.10*, dan *Surfer 16*.
- Data curah hujan (mm/bulan) Kabupaten Ngawi yang diperoleh dari, sumber: <https://ngawikab.bps.go.id/>
- SHP Geologi Kabupaten Ngawi yang diperoleh dari, sumber: <https://geologi.esdm.go.id/>

Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan beberapa aplikasi (*software*), diantaranya yaitu *Global Mapper 20*, *RockWorks 16*, *QGIS 3.10.10*, dan *Surfer 16*. Dimana pengolahan data menggunakan *Global Mapper 20* digunakan untuk menganalisis kelurusan (*lineament*) pada data DEM dengan *azimuth* 135°. Aplikasi *RockWorks 16* digunakan untuk membuat *Diagram Rose* (*WindRose*), sedangkan *QGIS 3.10.10* dan *Surfer 16* digunakan untuk pengolahan data parameter, baik parameter intensitas curah hujan, kemiringan lereng, kondisi geologi yang berupa kekuatan batuan, pembuatan *Fault Fracture Density* (FFD), hingga pembuatan peta rawan tanah longsor.

Analisis daerah rawan bencana tanah longsor menggunakan data *Fault Fracture Density* (FFD), yang didukung dengan beberapa parameter diantaranya parameter curah hujan, kemiringan lereng, dan kondisi geologi (kekuatan batuan) pada kawasan penelitian. Berdasarkan ketiga parameter, kemudian dilakukan *overlay* dengan menggunakan *skoring* yang berdasar atas penelitian terdahulu.

Tabel 1. Klasifikasi Intensitas Curah Hujan (mm/bulan) [6]

Klasifikasi	Keterangan	Skor
101 – 200	Sangat Rendah	1
201 – 300	Rendah	2
301 – 400	Sedang	3
401 – 500	Tinggi	4
>500	Sangat Tinggi	5

Tabel diatas merupakan data acuan klasifikasi intensitas curah hujan milik Larasati, dkk pada tahun 2017 yang digunakan pada penelitian ini. Selanjutnya, tabel dibawah ini merupakan data klasifikasi kemiringan lereng oleh Shidik pada tahun 2021 digunakan sebagai acuan pembuatan peta kemiringan lereng di kawasan Kabupaten Ngawi.

Tabel 2. Klasifikasi Kemiringan Lereng (%) [8]

Klasifikasi	Keterangan	Skor
0 – 8	Sangat Rendah	1
8 -15	Rendah	2
15 – 25	Sedang	3
25 – 45	Tinggi	4
>45	Sangat Tinggi	5

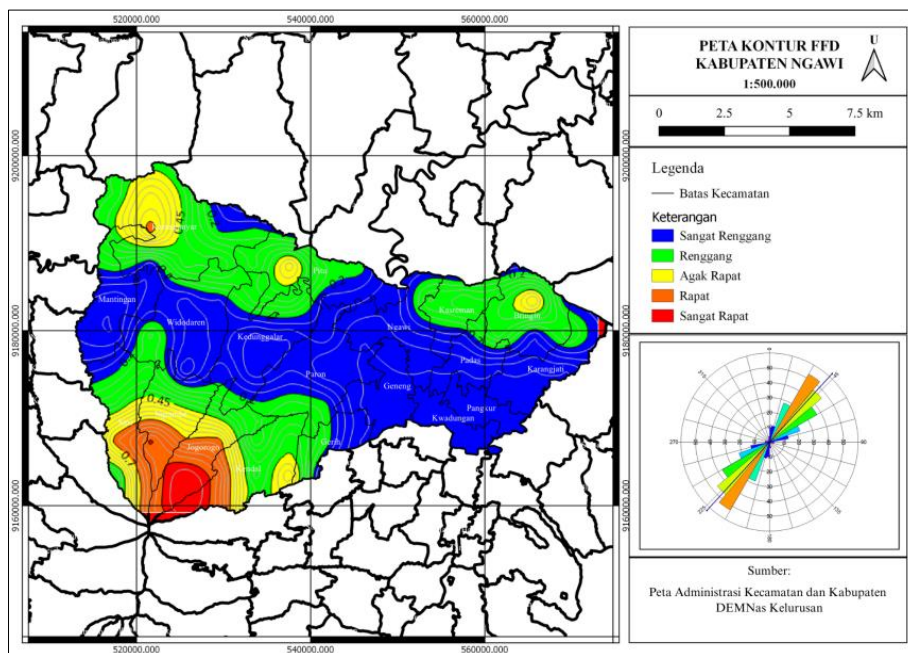
Klasifikasi kondisi geologi berdasarkan kekuatan batuan yang digunakan sebagai acuan pembuatan peta klasifikasi kondisi geologi adalah klasifikasi milik Gunawan pada tahun 2022.

Tabel 3. Klasifikasi Kondisi Geologi Kekuatan Batuan [7]

Klasifikasi	Keterangan	Skor
Batuan Sedimen	Rendah	1
Batuan Beku	Tinggi	2

III. HASIL DAN DISKUSI

Lokasi yang diteliti yaitu kawasan kabupaten Ngawi, provinsi Jawa Timur. Wilayah ini memiliki 19 kecamatan, dengan sejumlah kecamatan berada di daerah lereng gunung Lawu yang diindikasikan memiliki potensi bencana tanah longsor. Pengidentifikasian ini dapat digunakan sebagai suatu pendukung adanya mitigasi bencana. Menurut Somantri pada tahun 2014, tahapan mitigasi bencana tanah longsor terdiri dari beberapa tahapan. Dimana tahapan utama yang harus dilakukan adalah tahap pemetaan kawasan [8].

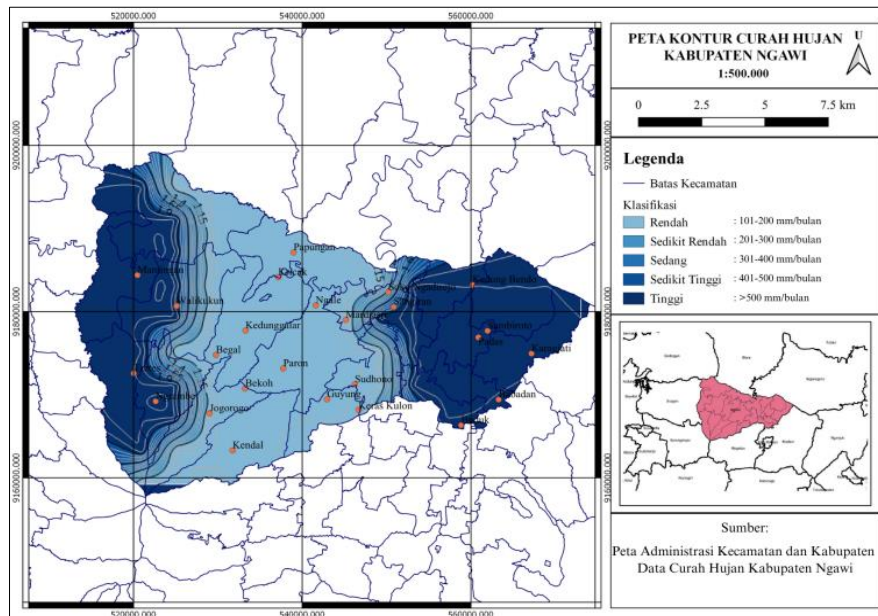
**Gambar 3.** Peta FFD Kabupaten Ngawi

Tabel 4. Distribusi FFD Kabupaten Ngawi

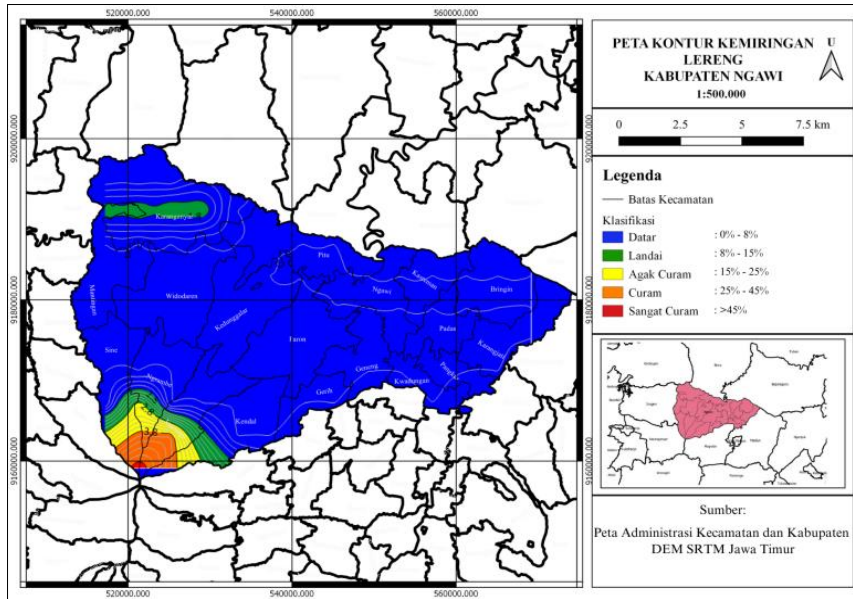
Klasifikasi	Kategori	Kecamatan
0 – 0,2	Sangat Renggang	Mantingan, Kedunggal, Ngawi, Geneng, Padas, Pangkur, Kwadungan
0,2 – 0,45	Rendah	Kasreman, Widodaren, Paron
0,45 – 0,7	Sedang	Sine, Ngrambe, Jogorogo, Kendal, Bringin, Pitu
0,7 – 0,95	Tinggi	Sine, Ngrambe
>0,95	Sangat Rapat	Jogorogo, Kendal

Berdasarkan analisis kelurusan pada data DEM yang telah dilakukan, kemudian menghasilkan peta *Fault Fracture Density* (FFD) untuk kabupaten Ngawi. Hasil FFD pada daerah tersebut selanjutnya diklasifikasi berdasarkan kerapatannya. FFD yang memiliki tingkat sangat rapat berada pada beberapa kecamatan, yaitu kecamatan Sine, Ngrambe, Jogorogo, dan Kendal.

Identifikasi able n rawan tanah longsor di kabupaten Ngawi dimodelkan dengan menggunakan beberapa parameter, yaitu parameter curah hujan, parameter kemiringan lereng, dan parameter kondisi geologi yang berupa ketahanan batuan. Parameter-parameter tersebut telah diklasifikasikan berdasarkan able klasifikasi (Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3), yang kemudian menghasilkan peta parameter sebagai berikut:

**Gambar 4.** Peta Intensitas Curah Hujan Kabupaten Ngawi

Guna mengetahui suatu kawasan berpotensi rawan terjadi tanah longsor, maka dibutuhkan nilai intensitas curah pada wilayah yang diteliti. Parameter curah hujan ini diklasifikasikan berdasarkan intensitas terjadinya dalam mm per bulan. Parameter curah hujan ini menggunakan data intensitas curah hujan pada setiap stasiun pengamat, dan data yang didapatkan berupa data curah hujan setiap bulan. Selanjutnya data-data tersebut dijadikan sebagai data intensitas curah hujan rerata bulanan. Data tersebut dipetakan dan dibagi menjadi lima kelas, yaitu dari yang memiliki curah hujan sangat tinggi hingga sangat rendah. Intensitas curah hujan ini dianggap berpengaruh terhadap potensi kawasan rawan bencana tanah longsor karena suatu wilayah yang memiliki elevasi yang tinggi akan mudah terjadi bencana tanah longsor apabila dikenai hujan dengan intensitas yang tinggi pula. Berdasarkan peta yang dihasilkan, diperoleh bahwa kawasan penelitian memiliki nilai curah hujan yang tidak jauh berbeda antara kecamatan satu dengan yang lainnya.

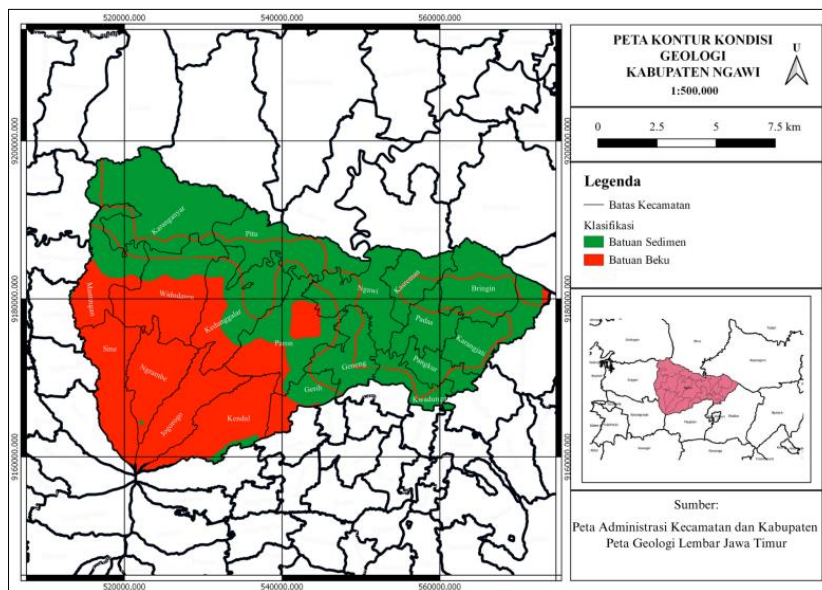


Gambar 5. Peta Kemiringan Lereng Kabupaten Ngawi

Tabel 5. Distribusi Kemiringan Lereng Kabupaten Ngawi

Klasifikasi (%)	Kategori	Skor	Kecamatan
0 – 8	Datar	1	Walikukun, Ngawi, Mantingan, Gerih, Kedunggalar, Padas, Geneng, Pitu, Paron, Padas, Kwadungan
8 -15	Landai	2	-
15 – 25	Agak Curam	3	Sine, Ngrambe, Jogorogo, Kendal
25 – 45	Curam	4	Sine, Ngrambe, Jogorogo, Kendal
>45	Sangat Curam	5	Sine, Ngrambe, Jogorogo, Kendal

Parameter selanjutnya yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi daerah yang berpotensi mengalami bencana tanah longsor yaitu parameter kemiringan lereng. Peta kemiringan lereng ini dihasilkan dari pengolahan data DEM dengan mengatur *slope* pada kawasan penelitian. Selanjutnya hasilnya diklasifikasi menjadi lima kelas, yang diinterpretasikan ke dalam lima warna yang berbeda. Dari peta kemiringan lereng didapatkan bahwa kemiringan lereng yang sangat curam berada di wilayah kecamatan Sine, Ngrambe, dan Jogorogo yang ditandai dengan warna merah.



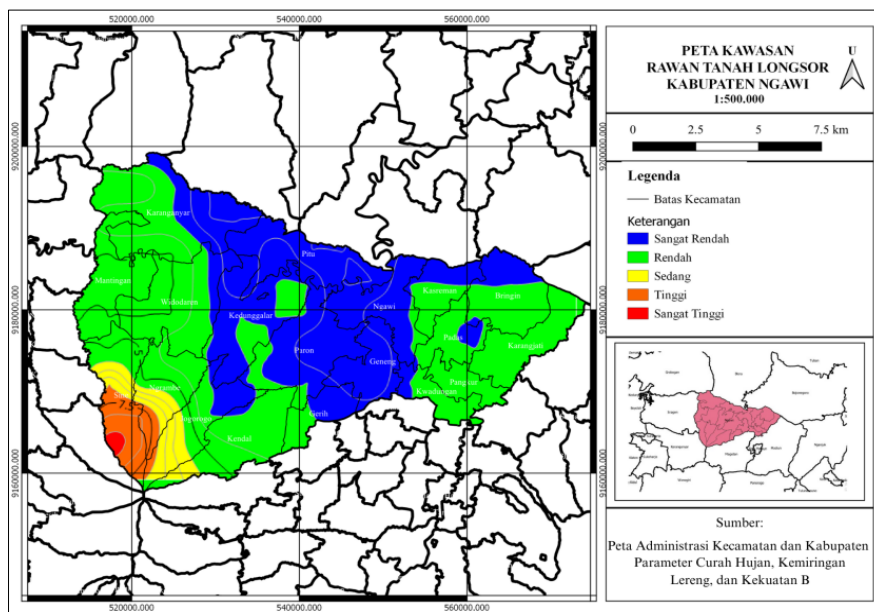
Gambar 6. Peta Kondisi Geologi Kabupaten Ngawi

Tabel 4. Distribusi Kondisi Geologi Kabupaten Ngawi

Kategori	Kecamatan
Batuan Sedimen	Paron, Geneng, Kwadungan, Pitu, Bringin, Ngawi, Padas, Karangjati, Gerih
Batuan Beku	Sine, Ngrambe, Jogorogo, Kendal, Mantingan, Walikukun, Kedunggalar, Paron

Kerawanan suatu wilayah terhadap terjadinya bencana tanah longsor juga dipengaruhi oleh kondisi geologi setempat. Jika dihubungkan dengan kondisi kemiringan lereng, ketika suatu batuan memiliki nilai kekuatan tinggi namun berada di daerah dengan elevasi tinggi dan berada di kawasan yang sangat curam, maka batuan tersebut akan tetap memiliki potensi terjadinya bencana tanah longsor. Berdasarkan peta kondisi geologi kekuatan batuan tersebut, dapat dilihat bahwa klasifikasi batuan hanya dibagi menjadi dua yaitu batuan sedimen yang memiliki warna hijau dengan skor 1 yang memiliki arti bahwa batuan tersebut memiliki kekuatan batuan yang rendah, dan batuan beku yang ditunjukkan oleh warna merah memiliki skor 2 yang berarti bahwa batuan tersebut memiliki kekuatan batuan yang tinggi.

Hasil dari penggabungan ketiga parameter tersebut, menghasilkan model peta daerah rawan tanah longsor seperti berikut ini.



Gambar 7. Peta Rawan Tanah Longsor Kabupaten Ngawi

Tabel 4. Distribusi Daerah Rawan Tanah Longsor Kabupaten Ngawi

Klasifikasi	Kategori	Kecamatan
0 - 4	Sangat Rendah	Ngawi, Kwadungan, Pitu, Paron, Kedunggalar
4 - 5	Rendah	Mantingan, Walikukun, Padas, Kasreman, Pangkur, Kwadungan, Bringin
5 - 6	Sedang	Sine, Ngrambe, Jogorogo, Kendal
6 - 7	Tinggi	Sine, Ngrambe, Jogorogo, Kendal
7 - 8	Sangat Tinggi	Sine

Berdasarkan pemodelan kawasan bencana tanah longsor, diketahui bahwa daerah yang memiliki potensi tanah longsor tinggi berada pada kecamatan Sine, kecamatan Ngrambe, dan kecamatan Jogorogo. Dari analisis *Fault Fracture Density* (FFD) menunjukkan bahwa FFD yang tinggi juga berada pada daerah yang sama. Sehingga diperoleh bahwa terdapat kesesuaian antara daerah yang berpotensi tanah longsor tinggi dengan daerah yang memiliki FFD yang sangat rapat.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa dari analisis kelurusan pada data DEM didapatkan hasil FFD dengan kriteria sangat renggang hingga sangat rapat. Pemodelan daerah rawan bencana tanah longsor dapat dihasilkan dari parameter curah hujan, kemiringan lereng, dan kondisi geologi. Dari analisis FFD dan pemodelan daerah rawan tanah longsor didapatkan

bahwa di antara keduanya terdapat kesesuaian, yaitu berada di kecamatan Sine, Ngrambe, Jogorogo, dan Kendal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Ardilla, S. DK, and Jasmani, "Pemetaan Network Analisis untuk Menentukan Jalur Evakuasi Gunung Merapi dengan Visualisasi Google Maps API (Studi Kasus: Kabupaten Sleman, D.I. Yogyakarta)," pp. 1–7, 2019, [Online]. Available: <http://eprints.itn.ac.id/id/eprint/2085>
- [2] F. Faizana, A. L. Nugraha, and B. D. Yuwono, "Pemetaan Risiko Bencana Tanah Longsor Kota Semarang," *J. Geod. Undip*, vol. 4, no. 1, pp. 223–234, 2015, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/geodesi/article/view/7669>
- [3] S. Erfani, M. Naimullah, and D. Winardi, "GIS Scoring and Overlay Methods for Mapping Landslide Vulnerability in Lebak Regency, Banten," *J. Fis. Flux J. Ilm. Fis. FMIPA Univ. Lambung Mangkurat*, vol. 20, no. 1, p. 61, 2023, doi: 10.20527/flux.v20i1.15057.
- [4] H. Yuniarta, A. P. Saido, and Y. M. Purwana, "Kerawanan Bencana Tanah Longsor Kabupaten Ponorogo," *e-Jurnal Matriks Tek. Sipil*, vol. 3, no. 1, pp. 194–201, 2015, doi: <https://doi.org/10.20961/mateksi.v3i1.37327>
- [5] A. Y. Effendi and T. Hariyanto, "Pembuatan Peta Daerah Rawan Bencana Tanah Longsor dengan Menggunakan Metode Fuzzy logic," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, pp. A714-A722, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.17190>
- [6] Z. R. Larasati, T. Hariyanto, and A. Kurniawan, "Pemetaan Daerah Risiko Banjir Lahar Berbasis SIG Untuk Menunjang Kegiatan Mitigasi Bencana (Studi Kasus: Gunung Semeru, Kab. Lumajang)," *J. Tek. ITS*, vol. 6, no. 2, 2017, doi: 10.12962/j23373539.v6i2.23899
- [7] E. S. Feri Gunawan, "Zonasi Pergerakan Tanah Daerah Girimukti Dan Sekitarnya, Kecamatan Campaka, Kabupaten Cianjur, Provinsi Jawa Barat," *Geosci. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 613–623, 2022, [Online]. Available: <http://jurnal.unpad.ac.id/geoscience/article/view/41396>
- [8] A. Shidik N., "Teknik Penginderaan Jauh Untuk Identifikasi Daerah Rawan Longsor Di Desa Sridadi, Kecamatan Sirampong, Kabupaten Brebes". *Jurnal Teknik Geologi: Ilmu Pengetahuan Teknolog*, vol. 4, no. 2, pp. 7-15, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.30872/jtgeo.v4i2.5442>
- [9] Aliyan Aliyah S., Pamungkas, T. D., Susanto, K., dan Ayesha P. P., "Pemetaan Daerah Potensi Longsor Menggunakan Analisis *Fault Fracture Density* (FFD) Pada Data DEMNAS Di Wilayah Cisarua, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat". *Jurnal Geografi, Edukasi, dan Lingkungan*, vol. 7, no. 2, pp. 168-183, 2023, doi: <https://doi.org/10.22236/jgel.v7i2.11397>
- [10] Poerwanto, Irvan M., Nasser, R., dan Prasti, D., "Pemetaan Daerah Rawan Bencana Longsor di Desa Cendana Kecamatan Burau". *Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Komputer*, 2019, Available: <https://api.core.ac.uk/oai/oai:ojournal.uncp.ac.id:article/1527>
- [11] M. Botjing, G. Halawa, dan Asrafil, "Penentuan Zonasi Tingkat Kerawanan Gerakan Tanah Di Kecamatan Marawola Kabupaten Sigi Sulawesi Tengah", *Bomba*, vol. 3, no. 1, pp. 25-34, Jul 2023.
- [12] N. Destriani dan A. Pamungkas, "Identifikasi Daerah Kawasan Rentan Tanah Longsor Dalam KSN Gunung Merapi Di Kabupaten Sleman," *Jurnal Teknik Pomits*, vol. 2, no. 2, pp. 134-138, 2013, doi: <https://doi.org/10.12962/j23373539.v2i2.3772>
- [13] H. Yuniarta, A. P. Saido, dan Y. M. Purwana, "Kerawanan Bencana Tanah Longsor Kabupaten Ponorogo," *Matriks Teknik Sipil*, vol. 3, no. 1, pp. 194-201, 2015, doi: <https://doi.org/10.20961/mateksi.v3i1.37327>



©2025. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).