

PEMODELAN SPASIAL KERAWANAN LONGSOR MENGGUNAKAN MODEL DETERMINISTIK *INFINITE SLOPE* DAN DATA LIDAR

(*LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MODELING USING DETERMINISTIC INFINITE SLOPE MODEL AND LIDAR DATA*)

Ahmad Harisul Haq¹, Guruh Samodra²

¹Program Studi Sarjana Geografi Lingkungan, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

²Departemen Geografi Lingkungan, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

Jl. Jatimulyo, Kota Yogyakarta 55242, Indonesia

E-mail: guruh.samodra@ugm.ac.id

Diterima: 24 Januari 2025; Direvisi: 25 April 2025; Disetujui untuk Dipublikasikan: 19 Mei 2025

ABSTRAK

Pemodelan kerawanan longsor dengan *infinite slope* merupakan salah satu metode deterministik yang memanfaatkan data *Digital Terrain Model* (DTM) dan data sifat tanah. Saat ini, masih banyak penelitian longsor model *infinite slope* yang menggunakan data DTM resolusi rendah. Resolusi data DEM yang digunakan dalam pemodelan longsor berpengaruh terhadap pemetaan kerawanan longsor. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memetakan topografi detail menggunakan *Light Detection and Ranging* (LiDAR) dan mengintegrasikan data LiDAR untuk pemetaan kerawanan longsor skala detail. Survei LiDAR menggunakan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) DJI M300, sensor *Terra LiDAR One Hesai* dan modul *Post-Processed Kinematics* (PPK). Selama pemindaian, UAV diterbangkan pada ketinggian 100 meter dan dibantu oleh pemasangan *ground control points* (GCP) di setiap titik penerbangan. Pemetaan kerawanan longsor model *infinite slope* memerlukan data sifat tanah seperti berat volume tanah, tebal tanah, kohesi tanah, dan sudut geser dalam yang diperoleh melalui pengamatan serta pengujian sampel tanah di lokasi penelitian. Berat volume tanah memiliki rentang nilai antara 1,2 – 1,8 gr/cm³. Tebal tanah memiliki rentang nilai antara 7,2 – 399,4 cm. Kohesi tanah memiliki rentang nilai antara 0,002 – 1,789 kg/cm². Sudut geser dalam memiliki rentang nilai antara 1,8° - 35°. Setiap peta sifat tanah diolah menggunakan perangkat lunak *Integrated Land and Water Information System* (ILWIS) untuk menghitung nilai faktor keamanan. Hasil pemotretan LiDAR berupa DTM memiliki ketinggian terendah 370 m dan ketinggian tertinggi 517 m. Uji akurasi vertikal relatif terhadap DTM menghasilkan nilai *Root Mean Square Error* vertikal (RMSE_z) sebesar 0,12 cm. Lereng tidak stabil menjadi kelas kestabilan lereng yang paling banyak ditemukan dibandingkan dengan lereng kritis dan lereng stabil, baik pada kondisi tanah kering, tanah tersaturasi sebagian, ataupun tanah tersaturasi penuh. Data DTM LiDAR dapat digunakan sebagai data yang handal untuk pemodelan kerawanan longsor berbasis model deterministik.

Kata kunci: *Infinite slope*, kerawanan longsor, LiDAR, model deterministik

ABSTRACT

Landslide susceptibility modeling using the infinite slope method is a deterministic approach that utilizes digital elevation model (DEM) data and soil property data. Many current studies on landslide modeling with the infinite slope method still rely on low-resolution DEMs. However, the resolution of DEM data significantly affects the accuracy of landslide susceptibility mapping. Therefore, this study aims to map detailed topography using LiDAR and integrate the data for high-resolution landslide susceptibility analysis. A LiDAR survey was conducted using a DJI M300 drone equipped with a Terra LiDAR One Hesai sensor and a PPK module. During the scanning process, the drone was flown at an altitude of 100 meters, with ground control points (GCPs) installed at each flight location. Landslide susceptibility modeling using the infinite slope method requires soil property data such as bulk density, depth, cohesion, and internal friction angle, which are obtained through field observations and laboratory testing of soil samples. Soil bulk density ranged from 1.2 to 1.8 g/cm³, soil depth from 7.2 to 399.4 cm, soil cohesion from 0.002 to 1.789 kg/cm², and internal friction angle from 1.8° to 35°. Each soil property map was processed using ILWIS software and used to calculate safety factor values. The LiDAR imaging produced a DTM with elevations ranging from 370 to 517 meters. Vertical accuracy testing of the DTM yielded an RMSE of 0.12 cm. Unstable slopes were the most frequently observed slope stability class, compared to critical and stable slopes, under all soil moisture conditions: dry, partially saturated, and fully saturated. DTM data from LiDAR can be considered a reliable input for deterministic landslide susceptibility modeling.

Keywords: *infinite slope, landslide susceptibility, LiDAR, deterministic model*

PENDAHULUAN

Bencana longsor merupakan salah satu bencana alam yang sering terjadi di daerah perbukitan dan pegunungan dan mempunyai curah hujan tinggi (Khan et al., 2021; Samodra et al., 2020). Longsor dapat mengakibatkan kerusakan pada infrastruktur, mengakibatkan kerugian ekonomi, serta menghilangkan nyawa. Asia, termasuk Indonesia, merupakan wilayah rawan longsor tinggi (Petley, 2012) dan berpotensi meningkat setiap tahunnya. Kejadian longsor di Indonesia mencapai 246 kejadian per tahun dan korban meninggal rata-rata 203 orang per tahun (Samodra et al., 2018). Pengurangan risiko bencana melalui langkah-langkah mitigasi yang tepat sangat diperlukan untuk mengurangi jumlah kejadian longsor dan jumlah korban akibat longsor (Rodríguez-Morata et al., 2019; Schuster & Kockelman, 1996).

Pemetaan kerawanan longsor merupakan salah satu langkah awal dalam kegiatan pengurangan risiko bencana longsor. Peta kerawanan longsor dapat berfungsi untuk mengidentifikasi area berisiko tinggi, perencanaan tata ruang dan pembangunan, menentukan lokasi penempatan sistem peringatan dini, edukasi dan sosialisasi untuk masyarakat, dan perencanaan evakuasi dan penanggulangan darurat (Cascini, 2008). Pembuatan peta kerawanan longsor harus disesuaikan dengan tujuan pembuatan, luas area kajian, metode, dan skala pemetaan. Pemetaan kerawanan longsor dapat dilakukan dengan pemodelan spasial menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG) (Cascini, 2008; Fell et al., 2008; van Westen et al., 2008).

Pemodelan kerawanan longsor dapat dilakukan dengan beberapa metode yaitu heuristik, statistik, dan deterministik (BSN, 2016). Metode heuristik digunakan pada pemetaan skala kecil, metode statistik digunakan pada pemetaan skala menengah, dan metode deterministik digunakan pada pemetaan skala detail (Corominas et al., 2014; Samodra et al., 2017; Soeters & Westen, 1996). Metode heuristik mengandalkan penilaian pakar berdasarkan pengalaman, observasi visual, dan identifikasi karakteristik bentanglahan. Metode ini mudah diterapkan namun hasilnya cenderung bersifat subjektif dan tidak akurat pada pemetaan skala detail (Gorsevski et al., 2016). Metode statistik menggunakan data empiris untuk menganalisis hubungan antara kejadian longsor dengan faktor lingkungan atau faktor pengontrol seperti kemiringan lereng, elevasi, litologi, penggunaan lahan, dan sebagainya (Hadmoko et al., 2017; Samodra et al., 2017). Hasil pemetaan kerawanan longsor menggunakan metode statistik lebih akurat dibanding metode heuristik (Park et al., 2013) namun hasilnya bersifat probabilistik dan sangat bergantung pada kualitas data inventarisasi longsor

(Alvioli et al., 2024; Samodra et al., 2024). Metode deterministik menggunakan hukum-hukum fisika untuk pemodelan kerawanan longsor (Iverson, 2000; Soeters & Westen, 1996). Metode ini memperhitungkan detail topografi, tebal tanah, berat volume tanah, kohesi tanah, sudut geser dalam, dan tekanan air pori untuk menentukan faktor keamanan lereng. Salah satu model yang umum digunakan dalam metode deterministik pemodelan longsor adalah *infinite slope* (lereng tak hingga).

Model *infinite slope* adalah salah satu pemodelan deterministik yang umum digunakan untuk memetakan kerawanan longsor berdasarkan perhitungan nilai faktor keamanan (*safety factor*) (Iverson, 2000; Soeters & Westen, 1996). Model *infinite slope* menggambarkan suatu lereng dengan batas ketebalan tanah tak hingga secara horizontal dan mengasumsikan sifat mekanik tanah yang homogen secara vertikal (Griffiths et al., 2011; Salunkhe et al., 2017). Kelebihan dari model ini adalah kemudahan dalam memodelkan parameter mekanik tanah dan dapat diimplementasikan secara langsung menggunakan SIG (Mainwright & Mulligan, 2005; Mergili et al., 2014). Nilai faktor keamanan yang dihasilkan oleh model *infinite slope* mencerminkan kestabilan lereng di suatu lokasi. Keunggulan metode deterministik adalah kemampuannya untuk menghasilkan pemetaan skala detail atau skala besar yang relevan untuk evaluasi kestabilan lereng di area berisiko tinggi (Godt et al., 2008; Lu & Godt, 2008) seperti pada lereng yang mengancam infrastruktur seperti jalan. Meski demikian, metode deterministik memerlukan data topografi detail dan data mekanika tanah yang lengkap serta terdistribusi secara spasial.

Data topografi detail yang bebas akses belum tersedia di Indonesia. Penerapan model *infinite slope* di Indonesia umumnya menggunakan data topografi yang bersumber dari peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) skala 1:25.000 atau *Digital Elevation Model* Nasional (DEMNAS) dengan resolusi spasial sekitar 8 meter seperti yang dilakukan oleh Sugianti et al. (2022) dan (Hidayat et al., 2019). Data tanah yang digunakan biasanya juga tidak terdistribusi secara spasial (Godt et al., 2008; Lu & Godt, 2008; Montrasio and Valentino, 2008; Griffiths et al., 2011; Salvatici et al., 2018). Resolusi spasial, data ketebalan tanah, dan data mekanika tanah sangat menentukan hasil pemetaan kerawanan longsor menggunakan model *infinite slope*.

Penelitian ini menerapkan penggunaan data LiDAR, data ketebalan tanah, dan data mekanika tanah yang terdistribusi spasial untuk memetakan kerawanan longsor menggunakan model *infinite slope* pada penggal jalan Magelang-Purworejo yang berada di Kecamatan Salaman, Kabupaten Magelang. Penggal jalan tersebut pernah mengalami longsor pada tanggal 18 Januari 2019.

Longsor ini memiliki ketebalan sekitar 3 meter, lebar longsor 10 meter, dimensi longsor mencapai 30 meter, dan material longsor yang menutupi ruas jalan utama (BPBD, 2019). Tujuan penelitian terbagi menjadi 2, yaitu memetakan topografi detail menggunakan *Light Detection and Ranging* (LiDAR) dan mengintegrasikan data LiDAR untuk pemetaan kerawanan longsor skala detail di jalan raya Magelang-Purworejo.

METODE

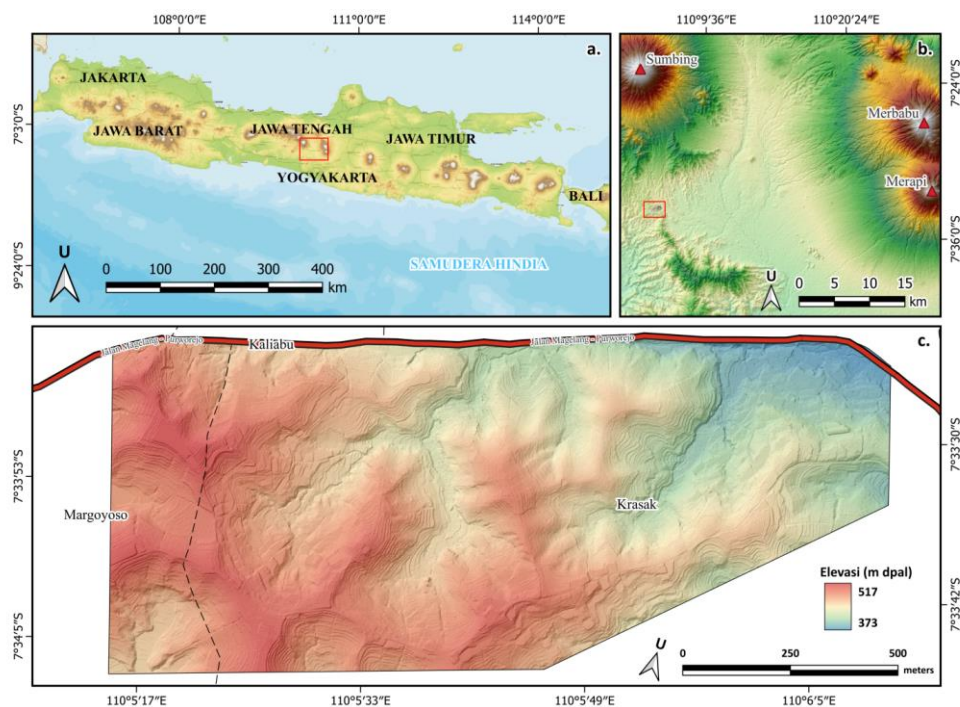
Lokasi penelitian terletak pada titik koordinat $7^{\circ}33'35''$ - $7^{\circ}34'58''$ LS dan $110^{\circ}5'7''$ - $110^{\circ}6'7$ BT. Lokasi penelitian merupakan sebagian lereng di selatan ruas jalan Magelang – Purworejo, yaitu di daerah Manglong, Desa Krasak, Kecamatan Salaman, Kabupaten Magelang, Provinsi Jawa Tengah. Secara umum, wilayah penelitian yang dikaji termasuk ke dalam 3 batas administrasi desa, yaitu Desa Krasak, Desa Margoyoso, dan Desa Kaliabu.

Secara umum kondisi geologi wilayah penelitian berada diantara Formasi Kebobutak, batuan Gunungapi Muda Sumbing, batuan Gunungapi Tua Sumbing (Rahardjo et al., 1995). Formasi Kebobutak terdiri dari batuan breksi vulkanik. Menurut Hidayat (2019), batuan breksi vulkanik merupakan hasil dari pelapukan batuan beku yang membentuk batuan sedimen. Batuan ini mengandung komposisi material yang dapat menunjukkan asal fragmen mineral yang dipengaruhi oleh kondisi iklim. Batuan Gunungapi Sumbing Muda merupakan endapan yang terdiri

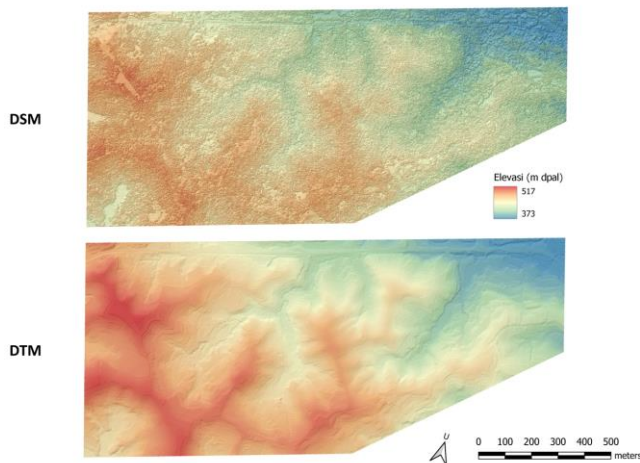
dari breksi tufa, tuf pasir, dan batupasir tuf. Batuan Gunungapi Sumbing Tua terdiri dari gabungan tuf lapili, aglomerat, dan breksi andesit (Nuur et al., 2015). Batuan dasar tersebut terlapukkan dan membentuk tanah yang didominasi oleh tekstur lempung. Karakteristik batuan dan tanah menyebabkan terjadinya longsor di wilayah penelitian.

Kondisi morfologi di wilayah penelitian secara umum dibagi berdasarkan morfologi lereng berupa landai, bergelombang, berbukit, curam, dan sangat curam. Wilayah dengan lereng yang relatif landai sebagian besar tersebar pada bagian timur laut wilayah penelitian. Lereng-lereng yang bergelombang dan berbukit tersebar secara merata di seluruh bagian wilayah penelitian. Wilayah dengan lereng yang relatif terjal dan sangat terjal hanya tersebar pada beberapa bagian wilayah penelitian saja, terutama pada titik-titik pertemuan antara lereng dan lembah.

Metode penelitian dibagi dalam beberapa tahap yaitu 1) pemetaan topografi detail menggunakan LiDAR-UAV, 2) Pembuatan *slope unit* untuk menentukan sampel tanah, 3) pengambilan sampel tanah di lapangan, 4) pengujian sampel tanah di laboratorium, 5) pemodelan spasial kerawanan longsor dengan model *infinite slope*. Wahana untuk survei menggunakan *quadcopter* UAV DJI M300 yang dilengkapi dengan sensor Terra LiDAR *One Hesai*. Ketinggian terbang saat survei adalah 100 meter untuk mendapatkan hasil yang optimum dengan pengoperasian di ketinggian



Gambar 1. Pulau Jawa, kotak merah menunjukkan wilayah Kabupaten Magelang dan sekitarnya (a); Wilayah Kabupaten Magelang dan sekitarnya, kotak merah menunjukkan lokasi penelitian (b); Topografi daerah penelitian yang dipetakan menggunakan survei UAV-LiDAR (c).



Gambar 2. Hasil pengolahan *point clouds* menjadi DSM dan DTM.

rendah. Metode yang digunakan adalah follow terrain atau mengikuti ketinggian permukaan objek di atas tanah. Penggunaan metode ini bertujuan untuk mendapatkan jumlah *point cloud* yang konsisten di setiap daerah dan menjaga ketinggian UAV saat proses akuisisi data LiDAR. Misi penerbangan menggunakan jalur yang telah ditentukan untuk memastikan semua area penelitian telah tercakup dalam pemindaian.

Pemotretan LiDAR menghasilkan data mentah berbentuk *point clouds* dengan resolusi spasial sebesar 0,5 m dan memiliki informasi koordinat 3D (X, Y, dan Z). Data *point clouds* kemudian dilanjutkan dengan proses *mesh* untuk menghasilkan data *Digital Surface Model* (DSM). Data DSM masih mencakup informasi tutupan lahan sehingga perlu dilakukan proses *filter*. *Filter* dilakukan pada data DSM untuk menghasilkan data yang hanya memuat informasi permukaan tanpa adanya unsur penutup lahan. Data ini kemudian disebut *Digital Terrain Model* (DTM). Pengolahan data LiDAR berupa *point cloud* menggunakan modul *Post-Processed Kinematics* (PPK). Survei *ground control point* (GCP) juga dilakukan untuk menghitung akurasi data LiDAR yang dihasilkan.

Penentuan titik perolehan sampel tanah menggunakan area *random sampling* untuk mengurangi subjektivitas dalam pemilihan lokasi sampel. Area satuan pemetaan yang digunakan adalah *slope unit* (unit lereng). Unit lereng atau yang sering disebut sebagai *halfbasins* merupakan suatu unit homogen lereng yang diasumsikan memiliki karakteristik geologi, geomorfologi, dan hidrologi yang mirip (Alvioli et al., 2016). Satuan pemetaan unit lereng memudahkan para pengambil keputusan untuk mengevaluasi faktor keamanan pada suatu penggal lereng sehingga dapat digunakan sebagai acuan untuk pengurangan risiko bencana pada suatu tapak tertentu (*specific site*).

Sampel tanah yang diambil sejumlah 24 sesuai dengan jumlah unit lereng yang dapat diidentifikasi. Identifikasi unit lereng dilakukan dengan membagi

wilayah penelitian menjadi banyak subdaerah aliran sungai (*sub catchments*) yang kemudian dapat dibagi lagi menjadi sisi kanan dan sisi kiri yang disebut sebagai *halfbasins* (Alvioli et al., 2016). Penentuan *halfbasin* memperhatikan arah aliran ke hilir (*downstream*) terhadap arah aliran utama (*main drainage*). Setiap satu *halfbasin* dianggap sebagai satu unit lereng. Sampel tanah kemudian dianalisis di laboratorium menggunakan triaksial untuk memperoleh nilai berat volume tanah, kohesi tanah, dan sudut geser dalam.

Berat volume tanah adalah sifat fisik tanah yang berkaitan dengan sifat-sifat fisik lainnya seperti permeabilitas, aerasi tanah, drainase, dan lain-lain (Kurnia et al., 2006). Nierwinski et al. (2023) menyebutkan bahwa berat volume tanah dapat digunakan untuk mengetahui struktur dan geomorfologi tanah sehingga mampu menunjukkan tingkat pergeseran tanah dan kekuatan material tanah. Kohesi tanah adalah salah satu sifat mekanis tanah yang penting dalam mengukur kekuatan geser lereng dan diperlukan untuk mengetahui kondisi kestabilan lereng (Wang & Akeju, 2016; Kim et al., 2021). Sudut geser dalam adalah salah satu sifat mekanis tanah yang menjadi bagian dari kekuatan geser tanah dalam menahan gaya geser (Jackson, 2013). Sudut geser dalam menunjukkan besaran sudut rekahan yang terbentuk saat terjadi gesekan antar partikel tanah atau batuan saat diberikan tekanan yang melebihi kapasitas maksimum yang dapat diterima (Haris et al., 2018; Rumbiak et al., 2020). Data tiga karakteristik tanah tersebut terdistribusi secara spasial berdasarkan unit lereng.

Tebal tanah adalah hasil dari gabungan proses penambahan kedalaman, penambahan material, dan hilangnya material dalam perkembangan suatu tanah (Johnson et al., 2005). Tebal tanah memegang peranan utama dalam proses hidrologis dan erosi yang terjadi sehingga memengaruhi kondisi kestabilan lereng (Fu et al., 2011). Data ketebalan tanah diperoleh dari hasil pengamatan di lapangan. Titik pengamatan ketebalan tanah ditentukan berdasarkan metode *grid sampling* dengan ukuran *grid* 63 x 63 m untuk pemetaan skala 1:10.000. Ukuran *grid* ini merupakan *minimum legible area* (MLA) yang dapat dipetakan untuk skala pemetaan 1:10.000 (USDA, 2017).

Pengamatan kedalaman tanah dilakukan melalui survei lapangan pada singkapan batuan di setiap *grid*. Data ketebalan tanah yang dapat teramati di lapangan berjumlah 79 titik. Teknik *multiple linear regression* digunakan untuk menginterpolasi sampel data ketebalan tanah. Hasil ketebalan tanah kemudian dianalisis dengan bantuan klasifikasi kelas tebal tanah berdasarkan USDA Soil Survey Manual (USDA, 2017).

Pemodelan kerawanan longsor menggunakan model *infinite slope* untuk menghitung faktor keamanan lereng pada setiap piksel. Seluruh

proses dalam pemodelan menggunakan data raster. Menurut Brunsden & Prior (1984), Morgan & Rickson (1995), dan Griffiths et al.(2011), **Persamaan 1** digunakan untuk menghitung faktor keamanan dalam model *infinite slope* adalah,

$$F = \frac{c' + (\gamma - m\gamma_w)z \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \dots \dots \dots (1)$$

dimana:

F = faktor keamanan

c' = kohesi tanah (Pa = N/m²)

γ = berat volume tanah (N/m³)

γ_w = berat volume air (10.000) (N/m³)

z = ketebalan tanah (m)

z_w = tinggi muka air di atas bidang (m)

m = rasio tegangan air pori (z/z_w) (tanpa dimensi)

β = kemiringan lereng (radians)

φ = sudut geser dalam (radians)

Perhitungan faktor keamanan dilakukan dengan menggunakan informasi karakteristik fisik dan mekanis tanah yang telah didapatkan dari hasil uji laboratorium, peta ketebalan tanah dan lereng dari survei LiDAR-UAV. Proses perhitungan faktor keamanan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Integrated Land and Water Information System (ILWIS). Setiap variabel yang dibutuhkan untuk perhitungan faktor keamanan akan diubah ke dalam format shapefile (.shp) dan ILWIS raster supaya memudahkan proses *import* data. Variabel-variabel yang telah dimasukkan ke dalam ILWIS dan masih dalam bentuk vektor kemudian diubah menjadi format raster dengan menggunakan *tools "Rasterize Polygon Map"*. Hasil faktor keamanan selanjutnya digunakan untuk mengetahui kondisi kestabilan lereng di lokasi penelitian. Klasifikasi kestabilan lereng dapat dibagi menjadi 3 kelas menurut Bowles (1989), yaitu tidak stabil, kritis, dan stabil (**Tabel 1**). Lereng kritis yang dimaksud adalah lereng dengan bidang gelincir yang lemah dan juga nilai faktor keamanan yang rendah (Metya et al., 2017). Lereng kritis dapat digunakan sebagai acuan untuk mengetahui nilai minimum faktor keamanan yang dapat ditoleransi oleh suatu lereng (Reale et al., 2015).

Tabel 1. Klasifikasi kestabilan lereng berdasarkan nilai faktor keamanan.

Nilai Faktor Keamanan (F)	Klasifikasi Kestabilan Lereng
F < 1,07	Tidak Stabil
1,07 < F < 1,25	Kritis
F > 1,25	Stabil

Sumber: Bowles (1989)

Penelitian tentang kondisi kestabilan lereng pada umumnya hanya dilakukan pada kondisi tanah yang kering dan tanah yang tersaturasi (Chen et al., 2023). Akan tetapi, kondisi tanah tersaturasi sebagian bisa menjadi faktor penting dalam pengkajian kestabilan lereng karena dapat merepresentasikan lereng dengan kondisi yang sesungguhnya di lapangan (Kim et al., 2002). Oleh

karena itu, pembuatan peta kestabilan lereng pada penelitian ini dilakukan dengan membuat beberapa skenario berdasarkan derajat saturasi.

Peta hasil kestabilan lereng kemudian akan divalidasi dengan interpretasi longsor berdasarkan *Red Relief Image Map* (RRIM). *Red Relief Image Map* adalah salah satu visualisasi data 3 dimensi yang dapat menunjukkan informasi mikrotopografi dengan bantuan data LiDAR beresolusi tinggi sehingga detail-detail topografis dapat diinterpretasi dengan mudah (Chiba et al., 2008; Chiba & Hasi, 2016). Pemanfaatan data RRIM dengan data LiDAR dapat memudahkan proses interpretasi fitur longsor, batas longsor, dan anatomi longsor secara akurat dan rinci (Samodra, 2024).

Intrepretasi longsor kemudian dianalisis dengan kondisi kestabilan lereng di lokasi penelitian. Analisis interpretasi longsor dan kestabilan lereng dilakukan dengan cara menentukan apakah longsor yang diinterpretasi terletak di lereng yang tidak stabil, lereng kritis, atau bahkan di lereng stabil. Hal ini akan menentukan apakah hasil peta kestabilan lereng sudah sesuai dengan interpretasi longsor atau mungkin ada faktor-faktor lain yang dapat memengaruhi kondisi kestabilan lereng seperti faktor vegetasi, penggunaan lahan, dan lain-lain.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pemotretan LiDAR

Hasil pemotretan LiDAR dilakukan pengecekan dengan proses uji akurasi vertikal. Uji akurasi dilakukan dengan mengacu pada standar ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*). Proses uji akurasi yang dilakukan adalah dengan cara membandingkan nilai elevasi titik *control points* antara hasil akhir DTM dengan nilai elevasi titik *control points* yang diperoleh pada saat proses pemotretan. Berdasarkan **Tabel 2**, dapat diketahui bahwa uji akurasi vertikal menghasilkan nilai RMSE sebesar 0,127 cm. Merujuk pada dokumen ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data (ASPRS, 2015), nilai akurasi tersebut termasuk ke dalam kelas akurasi vertikal 1 cm.

Tabel 2. Uji akurasi vertikal DTM.

DTM		Referensi		Uji	
ID	Z DTM	ID	Z Refere nsi	dZ (m)	dZ ²
CP01	437,7 04	CP01	437,8 54	-0,150	0,023
CP02	495,7 18	CP02	495,6 45	0,073	0,005
CP03	443,4 3	CP03	443,5 72	-0,142	0,020
Jumlah (ICP)				0,048	

Rata-Rata (ICP)	0,016
RMSE (ICP)	0,127
LE90 (ICP)	0,209

Parameter Tanah

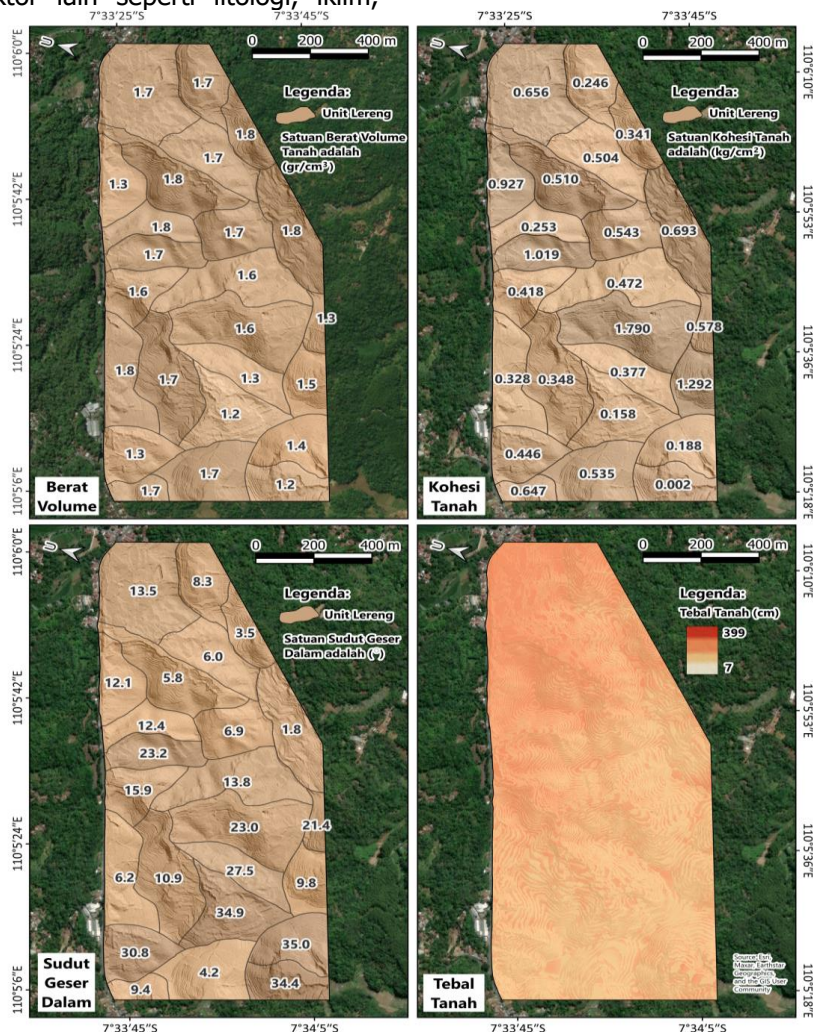
Distribusi nilai berat volume tanah di lokasi penelitian disajikan pada **Gambar 3**. Hasil pengujian menunjukkan bahwa parameter berat volume tanah di lokasi penelitian memiliki rentang nilai antara 1,2 – 1,8 gr/cm³ dengan rata-rata sebesar 1,6 gr/cm³. Nilai berat volume tanah tersebut menunjukkan bahwa tanah di lokasi penelitian memiliki karakteristik mineral yang bertekstur kasar hingga halus dan didominasi oleh lempung (Shodiq, 2006).

Berdasarkan **Gambar 3**, dapat diketahui bahwa tebal tanah di lokasi penelitian memiliki rentang nilai antara 7,2 – 399,4 cm. Lokasi dengan tebal tanah yang relatif tipis tersebar di bagian barat dan selatan sedangkan tebal tanah yang dalam tersebar di bagian timur laut lokasi penelitian. Tebal tanah yang tipis disebabkan oleh kondisi elevasi yang tinggi di lokasi tersebut. Hal ini sesuai dengan penelitian Lu et al. (2019) yang menyebutkan bahwa tebal tanah berkorelasi negatif dengan elevasi. Nilai tebal tanah juga dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor lain seperti litologi, iklim,

indeks kecekungan, tutupan vegetasi, dan kemiringan lereng (Catani et al., 2010).

Distribusi nilai kohesi tanah di lokasi penelitian dapat dilihat pada **Gambar 3**. Hasil pengujian parameter kohesi tanah di lokasi penelitian memiliki rentang nilai antara 0,002 – 1,789 kg/cm² dengan rata-rata sebesar 0,553 kg/cm². Kohesi tanah dengan nilai yang relatif rendah tersebar pada bagian tenggara, barat laut, dan barat daya lokasi penelitian sedangkan pada bagian tengah, utara, dan selatan lokasi penelitian memiliki nilai kohesi tanah yang relatif lebih tinggi dibandingkan wilayah lain di sekitarnya. Tingginya nilai kohesi tanah dapat disebabkan oleh kondisi tanah di lokasi penelitian yang kering akibat kemarau dan didominasi oleh lempung. Menurut Dafalla (2013), tanah lempung dalam kondisi yang kering memiliki kemampuan untuk mengembangkan nilai kohesi tanah yang lebih tinggi.

Distribusi nilai sudut geser dalam di lokasi penelitian dapat dilihat pada **Gambar 3**. Hasil pengujian sudut geser dalam di lokasi penelitian memiliki rentang nilai antara 1,8° - 35° dengan rata-rata sebesar 15,4°. Persebaran nilai yang relatif rendah terletak di bagian timur, tenggara, dan barat lokasi penelitian sedangkan nilai yang relatif tinggi terletak di bagian tengah, selatan, dan barat daya



Gambar 3. Parameter tanah yang digunakan pada model *infinite slope*.

lokasi penelitian. Nilai sudut geser dalam yang rendah dapat disebabkan oleh proses-proses hidrologis yang terjadi pada lereng seperti pelapukan tanah. Jackson (2013) menyebutkan bahwa proses pelapukan tanah akan menyebabkan mineral-mineral yang menambah keterikatan partikel dalam kekuatan geser tanah menjadi hilang sehingga menurunkan nilai sudut geser dalam.

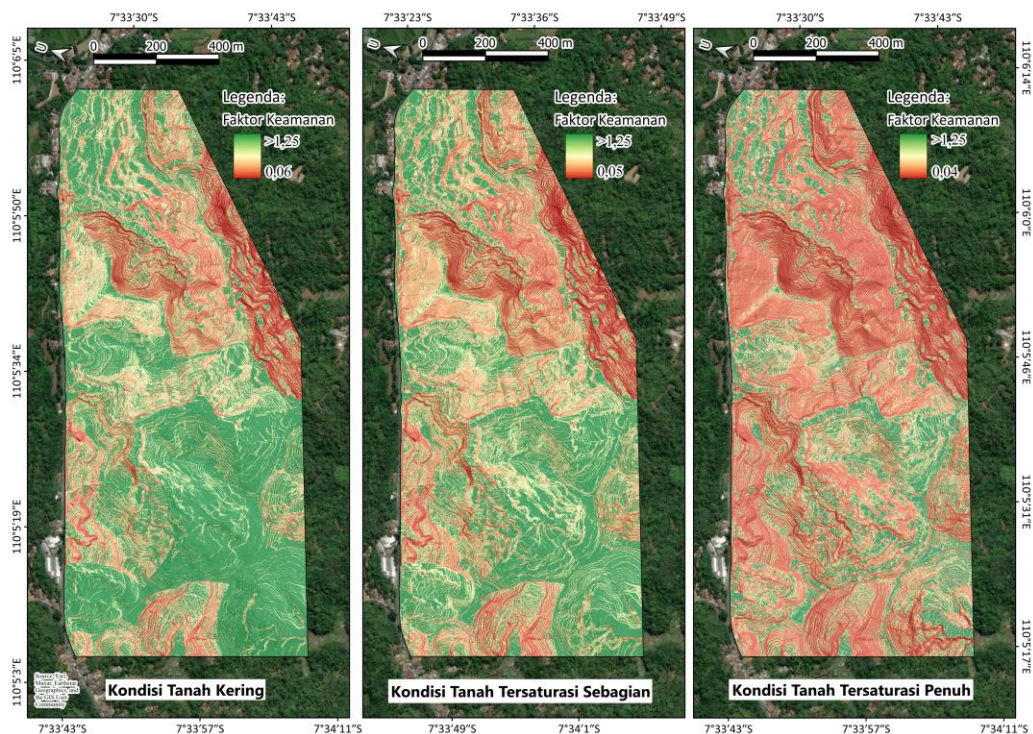
Model *Infinite Slope*

Pembuatan peta kestabilan lereng pada penelitian ini dilakukan dengan membuat beberapa skenario berdasarkan derajat saturasi. Derajat saturasi yang digunakan terbagi menjadi 3 skenario yang berbeda, yaitu kondisi tanah kering (*dry*), kondisi tanah tersaturasi sebagian (*partially saturated*), dan kondisi tanah tersaturasi penuh (*fully saturated*). Masing-masing skenario akan mempengaruhi proses perhitungan faktor keamanan yang nantinya digunakan untuk menentukan kestabilan lereng di lokasi penelitian.

Peta hasil perhitungan faktor keamanan di lokasi penelitian disajikan pada **Gambar 4**. Faktor keamanan pada kondisi tanah kering memiliki rentang nilai 0,06 – 98,41 sedangkan pada kondisi tanah tersaturasi sebagian memiliki rentang nilai 0,05 – 98,66. Rentang nilai faktor keamanan di kedua kondisi tersebut tidak jauh berbeda, namun jika dilihat dari persebarannya, nilai faktor keamanan menengah ke atas (ditunjukkan oleh warna kuning hingga hijau) pada kondisi tanah kering relatif lebih banyak dibandingkan dengan kondisi tanah tersaturasi sebagian, terutama pada bagian barat daya lokasi penelitian (**Gambar 4**).

Faktor keamanan dengan kondisi tanah tersaturasi penuh memiliki rentang nilai 0,04 – 56,81. Berbeda dengan kondisi tanah kering atau tanah tersaturasi sebagian, nilai faktor keamanan pada kondisi tanah tersaturasi penuh lebih didominasi oleh nilai faktor keamanan yang rendah (ditunjukkan oleh warna merah) yang persebarannya hampir di seluruh lokasi penelitian (**Gambar 4**). Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Tran et al. (2019) yang menyebutkan bahwa kondisi tanah yang tersaturasi dapat menyebabkan berkurangnya gaya penahan pada lereng sehingga nilai faktor keamanan menjadi lebih kecil. Kondisi kestabilan lereng di lokasi penelitian disajikan pada **Gambar 5** untuk semua kondisi tanah kering, tanah tersaturasi sebagian, dan tanah tersaturasi penuh. Secara keseluruhan, lereng yang stabil dan lereng yang kritis lebih banyak ditemukan pada kondisi tanah kering dibandingkan dengan kondisi tanah tersaturasi sebagian ataupun tanah tersaturasi penuh sedangkan persebaran lereng yang tidak stabil (nilai faktor keamanan yang kecil) jauh lebih banyak ditemukan pada kondisi tanah tersaturasi penuh dibandingkan dengan kondisi tanah kering ataupun tanah tersaturasi sebagian

Lereng stabil pada kondisi tanah kering memiliki luas sebesar 47,4 ha sedangkan pada kondisi tanah tersaturasi sebagian dan tersaturasi penuh masing-masing sebesar 33,9 ha dan 16,8 ha (**Tabel 3**). Nilai luasan lereng stabil pada kondisi tanah kering hampir 3 kali lipat dari nilai luasan pada kondisi tanah tersaturasi penuh sedangkan untuk kondisi tanah tersaturasi sebagian hanya 1,5 kali lipat. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi hujan



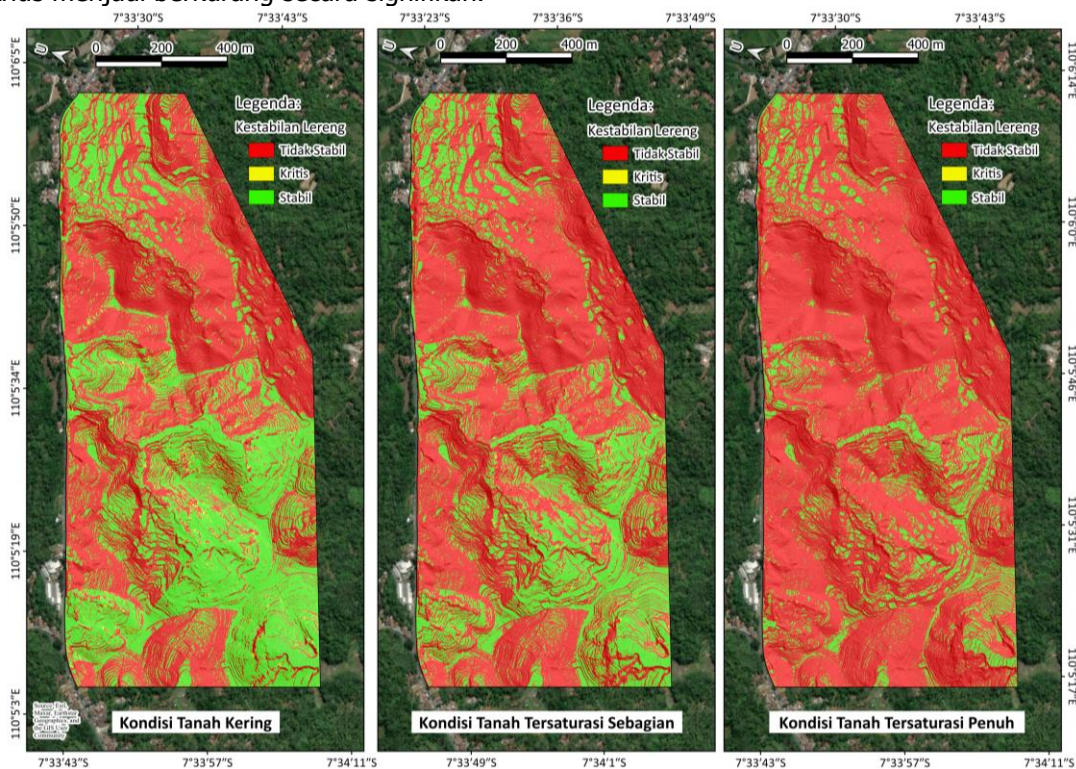
Gambar 4. Hasil perhitungan faktor keamanan pada 3 kondisi tanah yang berbeda.

yang hanya terjadi beberapa kali akan membuat lereng stabil menjadi berkurang dalam jumlah yang tidak terlalu banyak sedangkan hujan yang terjadi secara terus menerus dengan intensitas yang tinggi akan menyebabkan jumlah lereng yang stabil menjadi berkurang secara signifikan. Kondisi ini sesuai dengan penelitian Lu & Godt (2008), Srivastava et al. (2010), Zhang et al. (2015), dan Haq (2024) yang menunjukkan bahwa pada kondisi tanah kering, persentase lereng stabil cenderung lebih sedikit jika dibandingkan lereng stabil pada kondisi tanah tersaturasi sebagian ataupun tanah tersaturasi penuh. Hal ini disebabkan oleh semakin banyak air yang masuk ke dalam tanah maka nilai faktor keamanan akan menjadi semakin kecil sehingga jumlah lereng stabil menjadi lebih sedikit.

Lereng yang termasuk ke dalam kelas kritis pada kondisi tanah kering memiliki luas sebesar 6,2 ha sedangkan pada kondisi tanah tersaturasi sebagian dan tanah tersaturasi penuh masing-masing sebesar 5,3 ha dan 3,4 ha (**Tabel 3**). Nilai luasan lereng kritis pada kondisi tanah kering dan tanah tersaturasi sebagian memiliki perbedaan yang tidak terlalu jauh sedangkan nilai luasan pada tanah tersaturasi penuh hanya berjumlah hampir setengah dari kondisi tanah kering. Hal ini menunjukkan bahwa hujan yang hanya terjadi sesekali tidak akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap jumlah lereng kritis sedangkan pada kondisi hujan yang terjadi dengan intensitas tinggi secara terus menerus akan membuat jumlah lereng kritis menjadi berkurang secara signifikan.

Lereng yang termasuk ke dalam kelas lereng tidak stabil pada kondisi tanah kering memiliki luas sebesar 68,6 ha sedangkan pada kondisi tanah tersaturasi sebagian dan tanah tersaturasi penuh masing-masing sebesar 83 ha dan 102,1 ha (**Tabel 3**). Lereng yang tidak stabil umumnya tersebar pada lokasi-lokasi dengan nilai sudut geser dalam yang rendah dan kemiringan lereng yang curam, baik pada kondisi tanah kering, tanah tersaturasi sebagian, ataupun tanah tersaturasi penuh. Luas lereng tidak stabil semakin bertambah seiring dengan meningkatnya saturasi pada tanah. Hal ini dapat dilihat pada **Tabel 3** yang menunjukkan bahwa luas lereng tidak stabil pada kondisi tanah tersaturasi sebagian dan tanah tersaturasi penuh meningkat masing-masing sebesar 21% dan 49% jika dibandingkan dengan kondisi tanah kering.

Kondisi tanah tersaturasi penuh merupakan kondisi tanah dengan peningkatan luas kestabilan lereng yang paling banyak. Kondisi tanah tersaturasi penuh merupakan kondisi tanah dengan peningkatan luas kestabilan lereng yang paling banyak. Kondisi tanah tersaturasi penuh memegang persentase luas lereng tidak stabil yang paling besar, yaitu 84% dari keseluruhan lereng yang ada di lokasi penelitian sedangkan pada kondisi tanah kering dan tanah tersaturasi sebagian masing-masing hanya sebesar 56% dan 68%. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi tanah tersaturasi penuh, hampir semua lereng di lokasi penelitian termasuk ke dalam kelas lereng tidak stabil seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Hasil klasifikasi kestabilan lereng pada 3 kondisi tanah yang berbeda.

Tabel 3. Nilai luasan setiap kelas kestabilan lereng.

Nilai Faktor Keamanan (F)	Luasan pada Peta Kestabilan Lereng (Ha)		
	Tanah Kering (Dry)	Tanah Tersaturasi Sebagian (Partially Saturated)	Tanah Tersaturasi Penuh (Fully Saturated)
F < 1,07 (Tidak Stabil)	68,6	83,0	102,1
1,07 < F < 1,25 (Kritis)	6,2	5,3	3,4
F > 1,25 (Stabil)	47,4	33,9	16,8

Interpretasi Longsor Dengan RRIM

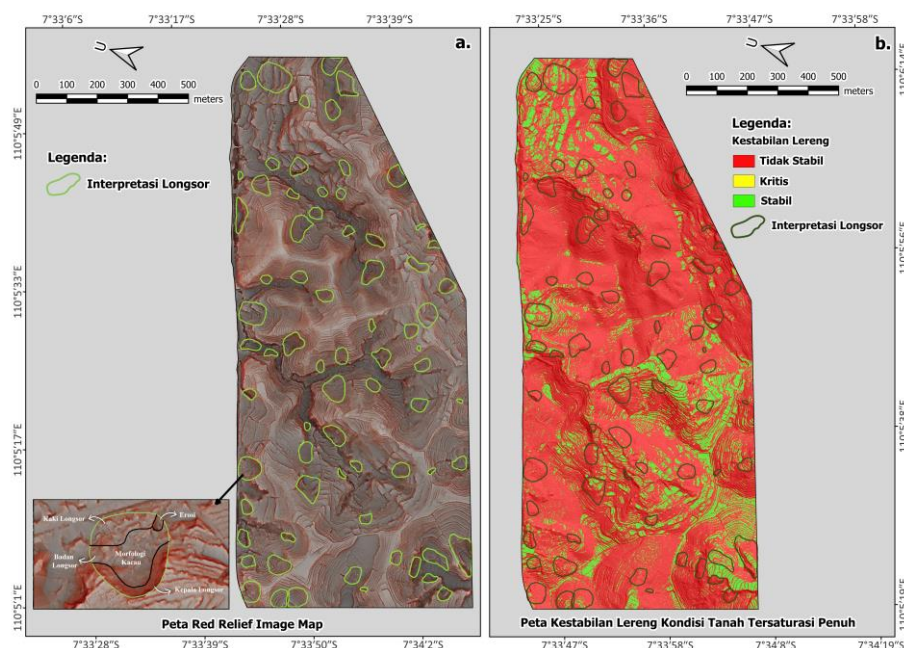
Berdasarkan **Gambar 6**, dapat diketahui bahwa terdapat 72 longsor yang telah diinterpretasikan dengan menggunakan data *red relief image map* (RRIM). Interpretasi longsor tersebut dilakukan dengan mengidentifikasi karakteristik morfologi yang terlihat pada lereng seperti kecuraman, permukaan yang tidak rata, dan morfologi kacau sehingga batas-batas longsor seperti kepala longsor, badan longsor, dan kaki longsor dapat ditentukan. Interpretasi longsor dapat dikaitkan dengan riwayat kejadian longsor, kondisi kestabilan lereng, dan karakteristik lokasi.

Terdapat riwayat kejadian longsor besar yang sebelumnya pernah terjadi pada tahun 2019. Longsor ini terletak di bagian barat laut lokasi peneltiandan menyebabkan penutupan ruas jalan utama akibat tertimbun material longsor. Berdasarkan hasil penelitian, lokasi longsor tersebut termasuk ke dalam kelas lereng tidak stabil, baik pada kondisi tanah kering, tanah tersaturasi penuh,

ataupun tanah tersaturasi sebagian. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Van Den Eeckhaut et al. (2007) yang menunjukkan bahwa longsor yang pernah terjadi dapat kembali terulang, namun luas longsor yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan yang sebelumnya. Kejadian longsor yang terulang dapat disebabkan oleh tidak adanya perubahan yang signifikan pada faktor-faktor pemicu longsor. Frekuensi dan tingkat peristiwa pemicu longsor dapat berubah seiring dengan berjalannya waktu, namun secara keseluruhan nilai rata-ratanya tetap stabil (Rossi et al., 2010).

Jika dilihat dari kondisi kestabilan lereng di lokasi penelitian, terdapat sebanyak 44 longsor hasil interpretasi yang terletak di lereng tidak stabil pada kondisi tanah kering sedangkan untuk kondisi tanah tersaturasi sebagian dan tanah tersaturasi penuh masing-masing sebanyak 52 longsor dan 65 longsor. Hal ini menunjukkan bahwa dari total 72 longsor hasil interpretasi, sebagian besar longsor tersebut terletak pada lereng-lereng tidak stabil, baik pada kondisi tanah kering, kondisi tanah tersaturasi sebagian, ataupun tanah tersaturasi penuh. Jumlah longsor pada lereng tidak stabil semakin bertambah seiring dengan meningkatnya tingkat saturasi tanah.

Hasil penelitian berupa peta kestabilan lereng dengan 3 kondisi tanah yang berbeda dan peta hasil interpretasi longsor berdasarkan RRIM cocok dan sesuai untuk digunakan secara bersamaan dalam mengetahui lokasi-lokasi yang rawan terhadap bencana longsor, terutama berdasarkan informasi lereng-lereng yang termasuk ke kelas tidak stabil. Informasi lokasi yang rawan terhadap bencana longsor dapat dijadikan acuan dan referensi dalam mengantisipasi dan mencegah terjadinya bencana longsor.



Gambar 6. Interpretasi longsor berdasarkan RRIM (a); Overlay hasil interpretasi longsor dengan peta kestabilan lereng kondisi tanah tersaturasi penuh (b).

KESIMPULAN

Hasil DTM LiDAR dengan resolusi tinggi dapat menunjukkan topografi-topografi secara detail. Model kerawanan longsor deterministik menggunakan faktor topografis seperti kemiringan lereng dan elevasi yang diperoleh dari data DEM. Resolusi DEM LiDAR yang tinggi akan memberikan pengaruh pada pemetaan kerawanan longsor deterministik. Semakin tinggi resolusi data DEM LiDAR yang digunakan maka akan semakin baik pemetaan kerawanan longsor yang akan dihasilkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami ucapkan kepada PT Terra Drone Indonesia yang telah membantu dalam penyediaan data DTM LIDAR yang digunakan pada penelitian ini dan Laboratorium Mekanika Tanah Departemen Teknik Sipil UGM yang telah membantu dalam menyediakan data mekanika tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Alvioli, M., Loche, M., Jacobs, L., Grohmann, C.H., Abraham, M.T., Gupta, K., Satyam, N., Scaringi, G., Bornaeux, T., Rossi, M., Marchesini, I., Lombardo, L., Moreno, M., Steger, S., Camera, C.A.S., Bajni, G., Samodra, G., Wahyudi, E.E., Susyanto, N., Sinčić, M., Gazibara, S.B., Sirbu, F., Torizin, J., Schüßler, N., Mirus, B.B., Woodard, J.B., Aguilera, H., Rivera-Rivera, J., 2024. A benchmark dataset and workflow for landslide susceptibility zonation. *Earth-ScienceRev.* 258, 104927. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104927>
- Alvioli, M., Marchesini, I., Reichenbach, P., Rossi, M., Ardizzone, F., Fiorucci, F., Guzzetti, F., 2016. Automatic delineation of geomorphological slope units with r.slopeunits v1.0 and their optimization for landslide susceptibility modeling. *Geosci. Model Dev.* 9, 3975–3991. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3975-2016>
- Badan Standardisasi Nasional, 2016. Standar nasional Indonesia 8291:2016 Penyusunan dan Penentuan Zona Kerentanan Gerakan Tanah. Jakarta.
- Bowles, J.E., 1989. Sifat-Sifat Fisik & Geoteknis Tanah. Erlangga, Jakarta.
- BPBD, K.M., 2019. Tabel Kejadian Bencana Tanah Longsor [WWW Document]. URL <https://sikk.magelangkab.go.id/> (accessed 6.1.24).
- Brunsden, D., Prior, D., 1984. Slope Instability. John Wiley & Sons, Chichester.
- Cascini, L., 2008. Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. *Eng. Geol.* 102, 164–177. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.016>
- Catani, F., Segoni, S., & Falorni, G. 2010. An Empirical Geomorphology-Based Approach to the Spatial Prediction of Soil Thickness at Catchment Scale. *Water Resources Research*, 46(5), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2008WR007450>
- Chen, Y., Lai, Y., Zhang, M., Li, H., Zhang, Y., 2023. Upper-Bound Optimized Solution of Unsaturated Soil Slope Stability Under Steady and Unsteady Flows. *Comput. Geotech.* 164, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105815>
- Chiba, T., & Hasi, B. 2016. Ground Surface Visualization Using Red Relief Image Map for A Variety of Map Scales. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41(B2), 393–397. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B2-393-2016>
- Chiba, T., Kaneta, S., & Suzuki, Y. 2008. Red Relief Image Map: New Visualization Method for Three Dimensional Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B2), 1071–1076.
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M.G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., Smith, J.T., 2014. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 73, 209–263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Dafalla, M. A. 2013. Effects of Clay and Moisture Content on Direct Shear Tests for Clay-Sand Mixtures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/562726>
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, 102(3–4), 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.014>
- Fu, Z., Li, Z., Cai, C., Shi, Z., Xu, Q., Wang, X., 2011. Soil Thickness Effect on Hydrological and Erosion Characteristics Under Sloping Lands: A Hypopedological Perspective. *Geoderma* 167–168, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.08.013>
- Godt, J.W., Baum, R.L., Savage, W.Z., Salciarini, D., Schulz, W.H., Harp, E.L., 2008. Transient deterministic shallow landslide modeling: Requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework. *Eng. Geol.* 102, 214–226. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.019>
- Gorsevski, P. V., Brown, M.K., Panter, K., Onasch, C.M., Simic, A., Snyder, J., 2016. Landslide detection and susceptibility mapping using LiDAR and an artificial neural network approach: a case study in the Cuyahoga Valley National Park, Ohio. *Landslides* 13, 467–484. <https://doi.org/10.1007/S10346-015-0587-0/FIGURES/12>
- Griffiths, D. V., Huang, J., Fenton, G.A., 2011. Probabilistic Infinite Slope Analysis. *Comput. Geotech.* 38, 577–584. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.03.006>
- Hadmoko, D.S., Lavigne, F., Samodra, G., 2017. Application of a semiquantitative and GIS-based statistical model to landslide susceptibility zonation in Kayangan Catchment, Java, Indonesia. *Nat. Hazards* 87. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2772-z>
- Haris, V.T., Studi, P., Sipil, T., Lancang, U., Lubis, F., Studi, P., Sipil, T., Lancang, U., Studi, P., Sipil, T., Lancang, U., Geser, S., 2018. Nilai Kohesi dan Sudut Geser Tanah pada Akses Gerbang Selatan Universitas Lancang Kuning. *J. Tek. Sipil* 4, 123–130.

- Haq, A.H. 2024. Kestabilan Lereng Di Ruas Jalan Magelang – Purworejo Dengan Menggunakan Pemodelan Spasial *Infinite Slope*. Universitas Gadjah Mada (Skripsi).
- Hidayat, R., 2019. Identifikasi Zona Longsor Secara Geologi Dan Geofisika, in: Seminar Nasional Geomatika. p. 1239. <https://doi.org/10.24895/sng.2018.3-0.1049>
- Iverson, R.M., 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resour. Res.* 36, 1897–1910. <https://doi.org/10.1029/2000WR900090>
- Jackson, L.E., 2013. Slide and Slump, in: *Encyclopedia of Natural Hazards*. Geological Survey of Canada, Vancouver, pp. 913–918.
- Johnson, D.L., Domier, J.E.J., Johnson, D.N., 2005. Animating the Biodynamics of Soil Thickness Using Process Vector Analysis: A Dynamic Denudation Approach to Soil Formation. *Geomorphology* 67, 23–46. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.08.014>
- Khan, S., Kirschbaum, D. B., & Stanley, T. 2021. Investigating the potential of a global precipitation forecast to inform landslide prediction. *Weather and Climate Extremes*, 33, 100364. <https://doi.org/10.1016/J.WACE.2021.100364>
- Kim, J., Salgado, R., Lee, J., 2002. Stability Analysis of Complex Soil Slopes Using Limit Analysis. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 128, 546–557.
- Kim, Y., Satyanaga, A., Rahardjo, H., Park, H., Sham, A.W.L., 2021. Estimation of Effective Cohesion Using Artificial Neural Networks Based on Index Soil Properties: A Singapore Case. *Eng. Geol.* 289, 106163. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106163>
- Kurnia, U., Agus, F., Adimiharja, A., Dariah, A. 2006. Sifat Fisik Tanah dan Metode Analisisnya. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Bogor.
- Lu, N., Godt, J., 2008. Infinite Slope Stability Under Steady Unsaturated Seepage Conditions. *Water Resour. Res.* 44. <https://doi.org/10.1029/2008WR006976>
- Lu, Y., Liu, F., Zhao, Y. guo, Song, X. dong, Zhang, G. lin, 2019. An Integrated Method of Selecting Environmental Covariates for Predictive Soil Depth Mapping. *J. Integr. Agric.* 18, 301–315. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61936-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61936-7)
- Mainwright, J., Mulligan, M., 2005. *Environmental Modelling*. John Wiley & Sons, London.
- Mergili, M., Marchesini, I., Rossi, M., Guzzetti, F., Fellin, W., 2014. Spatially Distributed Three-Dimensional Slope Stability Modelling in a Raster GIS. *Geomorphology* 206, 178–195. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.10.008>
- Metaya, S., Mukhopadhyay, T., Adhikari, S., Bhattacharya, G., 2017. System Reliability Analysis of Soil Slopes with General Slip Surfaces Using Multivariate Adaptive Regression Splines. *Comput. Geotech.* 87, 212–228. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.02.017>
- Montrasio, L., & Valentino, R. 2008. A model for triggering mechanisms of shallow landslides. *Natural Hazards and Earth System Science*, 8(5), 1149–1159. <https://doi.org/10.5194/NHESS-8-1149-2008>
- Morgan, R.P., Rickson, R., 1995. *Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach*. E & FN SPON An imprint of Chapman & Hall, London.
- Nierwinski, H.P., Pfitscher, R.J., Barra, B.S., Menegaz, T., Odebrecht, E., 2023. A Practical Approach for Soil Unit Weight Estimation using Artificial Neural Networks. *J. South Am. Earth Sci.* 131, 104648. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104648>
- Nuur, M.F., Purwanto., Raharjo, S., 2015. Geologi dan Kendali Sifat Fisik - Mekanik Tanah Terhadap Potensi Bencana Gerakan Tanah Daerah Tanjunganom, Kecamatan Salaman, Kabupaten Magelang, Jawa Tengah. *J. Ilm. Geol. Pangea* 2, 51–67.
- Park, H.J., Lee, J.H., Woo, I., 2013. Assessment of rainfall-induced shallow landslide susceptibility using a GIS-based probabilistic approach. *Eng. Geol.* 161, 1–15. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2013.04.011>
- Petley, D., 2012. Global patterns of loss of life from landslides. *Geology* 40, 927–930. <https://doi.org/10.1130/G33217.1>
- Reale, C., Xue, J., Pan, Z., Gavin, K., 2015. Deterministic and Probabilistic Multi-Modal Analysis of Slope Stability. *Comput. Geotech.* 66, 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.01.017>
- Rodríguez-Morata, C., Villacorta, S., Stoffel, M., & Ballesteros-Cánovas, J. A. 2019. Assessing strategies to mitigate debris-flow risk in Abancay province, south-central Peruvian Andes. *Geomorphology*, 342, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.06.012>
- Rossi, M., Witt, A., Guzzetti, F., Malamud, B. D., & Peruccacci, S. 2010. Analysis of Historical Landslide Time Series in The Emilia-Romagna Region, Northern Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(10), 1123–1137. <https://doi.org/10.1002/esp.1858>
- Rumbiak, V., Dwi, Y., Cahyono, G., Pertambangan, J.T., 2020. Pengaruh Uji Kuat Geser Terhadap Batu Andesit, in: *Seminar Teknologi Kebumihan Dan Kelautan (SEMITAN II)*. pp. 605–609.
- Salunkhe, D.P., Bartakke, R.N., Chvan, G., Kothavale, P.R., 2017. An Overview on Methods for Slope Stability Analysis 6, 528–535.
- Salvatici, T., Tofani, V., Rossi, G., D'Ambrosio, M., Tacconi Stefanelli, C., Benedetta Masi, E., Rosi, A., Pazzi, V., Vannocci, P., Petrolo, M., Catani, F., Ratto, S., Stevenin, H., & Casagli, N. (2018). Application of a physically based model to forecast shallow landslides at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18 (7), 1919–1935. <https://doi.org/10.5194/NHESS-18-1919-2018>
- Samodra, G. 2024. *Teknologi Geospasial Inventarisasi Longsor*. Gadjah Mada University Press.
- Samodra, G., Chen, G., Sartohadi, J., Kasama, K., 2017. Comparing data-driven landslide susceptibility models based on participatory landslide inventory mapping in Purwosari area, Yogyakarta, Java. *Environ. Earth Sci.* 76, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6475-2>
- Samodra, G., Hadmoko, D.S., Wicaksono, G.N., Adi, I.P., Yudinugroho, M., Wibowo, S.B., Suryatmojo, H., Purwanto, T.H., Widartono, B.S., Lavigne, F., 2018. The March 25 and 29, 2016 landslide-induced debris flow at Clapar, Banjarnegara, Central Java. *Landslides* 15, 985–993. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0958-4>
- Samodra, G., Ngadisih, N., Malawani, M. N., Mardiatno, D., Cahyadi, A., & Nugroho, F. S. 2020. Frequency-magnitude of landslides affected by the 27–29

- November 2017 Tropical Cyclone Cempaka in Pacitan, East Java. *Journal of Mountain Science*, 17(4), 773–786. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5734-y>
- Samodra, G., Ngadisih, Nugroho, F.S., 2024. Benchmarking data handling strategies for landslide susceptibility modeling using random forest workflows. *Artif. Intell. Geosci.* 5, 100093. <https://doi.org/10.1016/J.AIIG.2024.100093>
- Schuster, R. L., & Kockelman, W. J. 1996. Principles of landslide hazard reduction. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* (pp. 91–105). National Academy Press. National Research Council, Transportation Research Safety Board Special Report.
- Shodiq, M.F., 2006. Tinjauan Terhadap Distribusi Tegangan pada Tanah Lempung Lunak Dibawah Pondasi Dangkal dengan Pemberian Lapis Pasir. Universitas Islam Indonesia.
- Soeters, R., Westen, C.J. van, 1996. Slope instability recognition, analysis, and zonation, in: A. K. Turner, R.L. Schuster (Eds.), *Landslides, Investigation and Mitigation* (Transportation Research Board, National Research Council, Special Report; 247). National Academy Press, Washington D.C., pp. 129–177.
- Srivastava, A., Babu, G.L.S., Haldar, S., 2010. Influence of Spatial Variability of Permeability Property on Steady State Seepage Flow and Slope Stability Analysis. *Eng. Geol.* 110, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.11.006>
- Staff, S.S.D., 2017. Soil Survey Manual. United States Department of Agriculture Handbook 18, Illinois.
- Sugianti, K., Yunarto, Sadisun, I.A., Kartiko, R.D., 2022. Analysis of maximum rainfall infiltration induced slope stability using the transient rainfall infiltration and grid based regional slope stability model in Ciliilin, West Java, Indonesia. *Indones. J. Geosci.* 9, 263–278.
- Tran, T.V., Alkema, D., Hack, R., 2019. Weathering and Deterioration of Geotechnical Properties in Time of Groundmasses in A Tropical Climate. *Eng. Geol.* 260, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105221>
- Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., & Demoulin, A. 2007. Characteristics of The Size Distribution of Recend and Historical Landslides in A Populated Hilly Region. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(3–4), 588–603. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.01.040>
- van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3–4), 112–131. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2008.03.010>
- Wang, Y., Akeju, O.V., 2016. Quantifying the Cross-Correlation Between Effective Cohesion and Friction Angle of Soil from Limited Site-Specific Data. *Soils Found.* 56, 1055–1070. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.11.009>
- Zhang, L.L., Fredlund, M.D., Fredlund, D.G., Lu, H., Wilson, G.W., 2015. The Influence of the Unsaturated Soil Zone on 2-D and 3-D Slope Stability Analyses. *Eng. Geol.* 193, 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.011>