

**Simulasi Morfodinamika Longsor Kalisari, Kabupaten Magelang  
Berdasarkan Data LiDAR dan Model Numerik*****Morphodynamic Simulation of Kalisari Landslide, Magelang Regency  
Based on LiDAR and Numerical Model***

Guruh Samodra

Departemen Geografi Lingkungan, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada  
Bulaksumur, Sleman, Yogyakarta, 55281, Indonesiae-mail: [guruh.samodra@ugm.ac.id](mailto:guruh.samodra@ugm.ac.id)

Naskah diterima 28 Oktober 2021, selesai direvisi 21 Juli 2022, dan disetujui 10 Agustus 2022

**ABSTRAK**

Simulasi morfodinamika longsor dapat digunakan untuk memprediksi proses dan hasil proses geomorfologi di masa mendatang. Tujuan penelitian ini adalah untuk memetakan topografi Longsor Kalisari secara rinci dengan menggunakan UAV LiDAR dan memodelkan secara spasial morfodinamika Longsor Kalisari di masa mendatang khususnya jarak luncur, area yang mungkin terpapar, kecepatan, dan ketebalan material longsor. Metode yang digunakan meliputi pemetaan topografi, estimasi volume material yang akan longsor (*initial source*), penentuan reologi, dan pemodelan spasial morfodinamika longsor. Model elevasi digital (DEM) yang terdiri atas model permukaan digital (DSM) dan model medan digital (DTM) dihasilkan dari fotogrametri *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) foto udara dan LiDAR. Penentuan volume longsor awal berdasarkan data geolistrik dan model medan digital. Reologi material longsor ditentukan berdasarkan uji laboratorium sampel tanah. Pemodelan spasial morfodinamika longsor menggunakan model numerik berbasis raster. Pemetaan topografi menggunakan UAV LiDAR sangat superior dibandingkan dengan menggunakan *Structure-from-Motion* (SfM) foto udara. Pemindaian dengan LiDAR dapat menghasilkan model medan dengan mengeliminasi kenampakan vegetasi. Kombinasi teknologi LiDAR dan pemodelan numerik dapat diandalkan untuk memprediksi morfodinamika Longsor Kalisari di masa mendatang. Hasil pemodelan morfodinamika dapat dikonversi menjadi peta kerawanan longsor yang dapat digunakan sebagai acuan perencanaan penggunaan lahan berbasis pengurangan risiko bencana longsor pada skala rinci.

**Kata kunci:** geomorfologi, morfodinamika longsor, LiDAR, model numerik

**ABSTRACT**

*Landslide morphodynamic analysis can be employed to predict geomorphological processes and landforms in the future. The objectives of the research are to map detailed topographical features of Kalisari Landslide using UAV LiDAR and to model its morphodynamic spatially including runout distance, inundated area, velocity and height of the material. Digital Elevation Model (DEM) consisting of Digital Surface Model (DSM) and Digital Terrain Models (DTM) were obtained from UAV photography and LiDAR. The volume of material was estimated from electrical resistivity data and DTM. Rheology was estimated from the laboratory soil test. Landslide morphodynamics were generated from raster-based numerical model. Topographic mapping using LiDAR is more superior to that of UAV photogrammetry. LiDAR scanning can generate digital terrain model by eliminating vegetation. The combination of UAV LiDAR and numerical model can be well-implemented to predict the morphodynamic of future Kalisari Landslide. The results of the model can be directly converted to landslide susceptibility map which can be used as a reference for large scale/detailed land use planning based on landslide disaster risk reduction.*

**Keywords:** geomorphology, landslide morphodynamic, LiDAR, numerical model

## PENDAHULUAN

Longsor sebagai kata umum dari proses perpindahan material menuruni lereng akibat adanya gravitasi (Varnes, 1978, Cornforth, 2005; Hungrr., 2014;) merupakan agen utama dari evolusi geomorfologi (Crozier, 2010). Perubahan topografi pada lereng-lereng perbukitan dan pegunungan disebabkan oleh perulangan longsor yang sudah terjadi selama kurun waktu tertentu selain disebabkan oleh faktor eksogen lainnya seperti pelapukan dan erosi. Analisis mengenai perubahan bentuk lereng akibat longsor dapat didekati dengan analisis morfodinamika longsor. Morfodinamika yang menunjukkan tingkat atau status keaktifan dan laju proses genetik bentuklahan (Dramis drr., 2011) atau merupakan dinamika eksogen terkait kerja angin, air, es serta gerak massa (van Zuidam, 1983) merupakan aspek penting dalam kajian geomorfologi longsor.

Morfodinamika longsor yang berkaitan dengan evolusi bentuklahan dapat dipelajari berdasarkan hierarki skala spasial (skala peta) dan temporal. Morfodinamika longsor skala spasial kecil memfokuskan pada hubungan antara kejadian banyak longsor pada area yang luas sedangkan skala spasial besar memfokuskan pada satu longsor yang biasanya memiliki area kajian lebih sempit. Keduanya dapat dianalisis berdasarkan rentang waktu proses yang berbeda (temporal) yaitu jangka pendek dan jangka panjang (Korup, 2009).

Kajian longsor skala besar yang memfokuskan pada saat proses terjadinya longsor (jangka pendek) dapat digunakan untuk penilaian kerawanan longsor skala rinci. Aspek morfodinamika longsor skala besar dalam penelitian ini meliputi luasan wilayah terpapar, jarak luncur, kecepatan, dan tebal material yang terpindahkan. Informasi tentang prediksi aspek morfodinamika longsor di masa mendatang dapat digunakan sebagai acuan dalam perencanaan penggunaan lahan berbasis pengurangan risiko bencana dan pemilihan prosedur mitigasi yang tepat (Rodríguez-Morata drr., 2019; Cheon drr.,

2020). Data rinci topografi dan reologi diperlukan dalam simulasi morfodinamika longsor skala besar menggunakan model numerik.

Kemajuan teknologi pemetaan dan komputer memungkinkan geomorfolog untuk menggunakan model numerik morfodinamika longsor skala rinci. Kemajuan teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) fotografi, *Global Navigation Satellite System* (GNSS), dan *Light Detection and Ranging* (LiDAR) memungkinkan geomorfolog untuk melakukan pengukuran topografi secara cepat dan akurat. Perubahan topografi dan laju perpindahan material longsor dapat dihitung menggunakan data UAV fotografi multitemporal (Samodra drr., 2020b). Luas, volume longsor, frekuensi-magnitude, dan laju denudasi longsor juga dapat dihitung dengan bantuan teknologi terkini (Guzzetti drr., 2012; Samodra drr., 2018, 2020a) yang salah satunya adalah LiDAR. Teknologi LiDAR menawarkan teknologi pemetaan topografi yang sangat membantu dalam menemu-kenali kenampakan longsor.

Teknologi LiDAR mampu menembus celah-celah vegetasi untuk mencitrakan permukaan tanah. Dibandingkan dengan pemrosesan gambar fotogrametri Foto Udara (FU), keunggulan utama LiDAR adalah memungkinkan pemetaan permukaan tanah/dataran di bawah tutupan vegetasi yang lebat. Selain itu, *point cloud* yang diperoleh dari akuisisi LiDAR memungkinkan klasifikasi bangunan, jalan, saluran listrik sebagai elemen berisiko. *Point cloud* merupakan sekumpulan titik yang dapat merepresentasikan permukaan obyek elemen berisiko seperti gedung, rumah, jalan, saluran listrik, lahan pertanian, dll. yang dapat dipindai oleh sensor LiDAR.

Teknik pemetaan menggunakan LiDAR dapat digunakan untuk identifikasi longsor yang arusnya tertutup oleh tutupan vegetasi yang rapat. Teknologi LiDAR dapat digunakan untuk akuisisi data model medan digital/ *digital terrain model* (DTM) yang dapat dipakai untuk: 1) karakterisasi longsor, 2) pemetaan bahaya dan kerawanan longsor, 3) pemodelan longsor, dan 4) memonitor deformasi longsor (Jaboyedoff drr., 2012).

Model medan digital sangat penting sebagai input pemodelan numerik longsor. Pemodelan numerik longsor secara umum dapat dibagi menjadi dua yaitu model kontinyu (*continuum*) dan partikel diskrit (*discrete particle*) (McDougall, 2017; Takahashi, 2014). Model kontinyu memodelkan material longsor sebagai satu kesatuan utuh yang dianalisis menggunakan bentuk persamaan kontinuitas dan momentum dalam bentuk *Eulerian*. Sebaliknya, model partikel diskrit memodelkan material longsor sebagai butiran-butiran yang terpisah yang dianalisis menggunakan bentuk persamaan *Lagrangian*.

Model kontinyu dapat digunakan secara langsung menggunakan Sistem Informasi geografis (SIG) karena diskretisasi persamaan matematik diferensial pada model morfodinamika longsor dapat diterapkan langsung pada format raster menggunakan misalnya metode diferensi hingga (*finite difference*). Domain model akan dibagi ke dalam *pixel* raster dan persamaan diferensial diubah menjadi persamaan aljabar untuk menghitung setiap aspek morfodinamika longsor seperti kecepatan dan tebal material longsor.

Prediksi morfodinamika longsor (kecepatan dan tebal material) berbasis simulasi menggunakan model numerik dapat digunakan sebagai perkiraan intensitas longsor yang akan terjadi pada suatu wilayah di masa datang. Informasi intensitas longsor dalam wujud model spasial dapat digunakan sebagai gambaran awal dalam mitigasi bencana longsor. Pertimbangan praktis dalam mitigasi bencana longsor merupakan isu penting bagi para pemangku kepentingan di daerah rawan longsor seperti di Indonesia. Longsor merupakan salah satu bencana yang mematikan di Indonesia dengan jumlah kematian akibat longsor sejumlah 10,837 orang dalam periode 2010-2021 menurut *Data Informasi Bencana Indonesia* (BNPB, 2021). Jumlah korban akibat longsor dapat bertambah seiring dengan pertumbuhan penduduk dan minimnya langkah mitigasi yang efektif dan efisien. Kabupaten Magelang merupakan salah satu Kabupaten di Indonesia yang sering dilanda longsor. BPBD kabupaten

Magelang mencatat 930 kejadian longsor dalam rentang waktu 2018 hingga 2021. Salah satu longsor yang masih aktif di Kabupaten Magelang adalah Longsor Kalisari.

Longsor Kalisari yang terletak di Desa Margoyoso, Kecamatan Salaman, Kabupaten Magelang Provinsi Jawa Tengah (gambar 1b) telah mengalami reaktivasi (Gambar 1a). Observasi dari tahun 2015 hingga 2019 menunjukkan Longsor Kalisari mengalami pergerakan retrogresif, pemunduran hingga 38 meter, dan mengalami pergerakan horizontal sebesar maksimum 8.1 m (Samodra drr., 2020b). Longsor Kalisari terletak di antara Gunungapi Sumbing dan Perbukitan Menoreh (Gambar 1c) sehingga genesis pembentukan material Longsor Kalisari sangat erat kaitannya dengan keduanya. Material dasar longsor Kalisari merupakan breksi andesit lapuk (bagian dari Formasi Andesit Tua Perbukitan Menoreh) (van Bemmelen, 1949) dan menumpang di atasnya merupakan tanah dengan tekstur lempung yang merupakan hasil lapukan dari endapan produk gunungapi di sekitarnya seperti Gunungapi Sumbing. Secara umum material permukaan longsor didominasi oleh tanah lempung (*clay*) dengan ketebalan lebih dari 10 meter (Sartohadi drr., 2018). Tujuan penelitian ini adalah untuk memetakan topografi Longsor Kalisari secara rinci menggunakan UAV LiDAR dan memodelkan secara spasial morfodinamika Longsor Kalisari di masa mendatang khususnya jarak luncur, area yang mungkin terpapar, kecepatan, dan ketebalan material longsor menggunakan model numerik.

## METODE PENELITIAN

Metode penelitian dapat dibagi menjadi beberapa langkah yaitu 1) pemetaan topografi dalam wujud DTM, 2) penentuan material yang kemungkinan akan longsor, 3) persiapan data reologi, dan 4) pemodelan morfodinamika longsor.

Pemetaan topografi menggunakan wahana *UAV hexacopter drone* DJI 600 Matrice Pro dengan

sensor LiDAR Snoopy A series 120. Ketinggian terbang saat survei topografi sekitar 70 meter dengan kecepatan sekitar 8 meter/detik. Pemindaian dengan sensor LiDAR menghasilkan *point cloud* sekitar 100 titik/m<sup>2</sup> yang masing-masing titiknya merepresentasikan elevasi obyek yang dipindai. Pemrosesan data mentah dari sensor menjadi *point cloud* menggunakan metode *Post Processing* (PP). Pembuatan DTM dilakukan dengan interpolasi *point cloud* LiDAR yang sebelumnya telah dilakukan eliminasi terhadap *point cloud* vegetasi (Gambar 1).

Penentuan volume material yang akan longsor menggunakan data dari geolistrik (Samodra dr., 2020b) dan DTM LiDAR untuk merekonstruksi sumber material longsor (*initial source area*). Reologi longsor diperoleh dari studi literatur serta membandingkan dengan data sifat fisik dan sifat mekanik tanah hasil dari analisis laboratorium. Pemodelan morfodinamika longsor dilakukan menggunakan model numerik *open source* MassMov2D (Beguiria dr., 2009) yang akan dirinci dalam paragraf berikut.

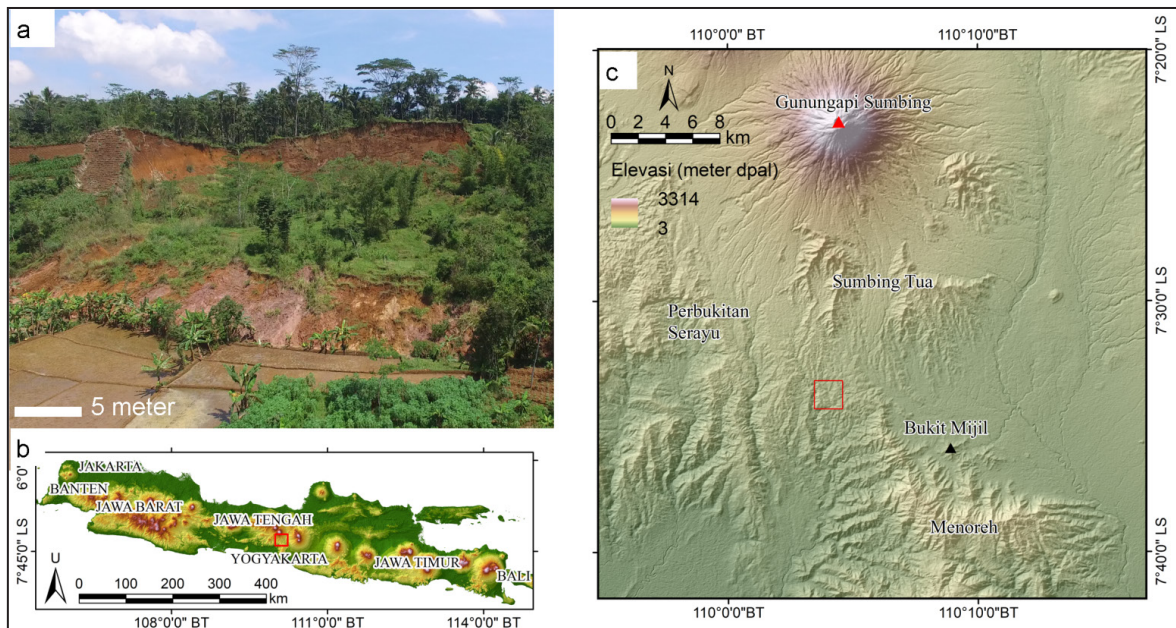
Model numerik MassMov2D berbasis 2D *continuum medium* (raster) menggunakan

persamaan aliran dinamis *depth-integrated approximation* (Savage and Hutter, 1989). Integrasi kedalam (*depth integration*) berdasarkan asumsi *shallow water* (persamaan Saint Venant) yang berarti bahwa panjang aliran massa longsor lebih besar dari tebal aliran massa. Kondisi tersebut juga berarti bahwa kecepatan vertikal dari aliran dianggap kecil atau dalam kata lain tekanan vertikal aliran dianggap mendekati kondisi hidrostatik.

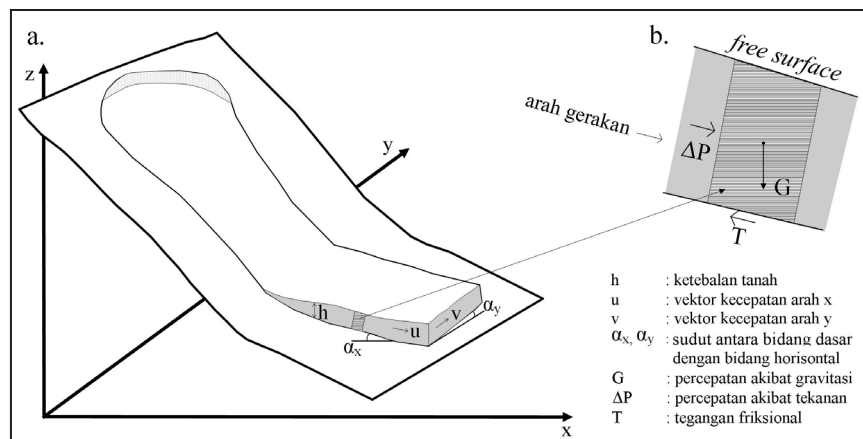
Referensi 2D menggunakan ruang vektor eukledian menggunakan koordinat kartesian x, y, z (Gambar 2a). Pemodelan numerik longsor menggunakan persamaan massa (1) dan momentum (2).

$h$  merupakan ketebalan tanah berarah tegak lurus terhadap bidang dasar (*bed*) ( $L$ ); ( $u, v$ ) merupakan vektor komponen kecepatan  $x$  dan  $y$  sejajar dengan bidang dasar ( $L^{-1}$ ). Koefisien  $\cos \alpha_x$  dan  $\cos \alpha_y$  merupakan cosinus dari bidang dasar (faktor geometri untuk mengoreksi sistem referensi lokal ke sistem referensi global); dan  $\alpha_x$  dan  $\alpha_y$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \cos \alpha_x \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \cos \alpha_y \frac{\partial (hv)}{\partial y} = 0 \quad \dots (1)$$



Gambar 1. *Aerial view* Longsor kalisari (a), DEM Pulau Jawa, kotak merah merupakan area transisi antara Gunungapi Sumbing dan Perbukitan Menoreh (b), DEM sekitar daerah penelitian, kotak merah menunjukkan lokasi Longsor Kalisari.



Gambar 2. Kerangka referensi koordinat (a) dan ilustrasi skematik gaya yang bekerja pada longsoran (b).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \cos \alpha_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \cos \alpha_y v \frac{\partial (u)}{\partial y} = -\cos \alpha_x g \left( \tan \alpha_x + k \frac{\partial \cos \alpha_x h}{\partial x} + \frac{-u}{\sqrt{u^2 + v^2}} S_f \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \cos \alpha_y v \frac{\partial v}{\partial x} + \cos \alpha_x u \frac{\partial (v)}{\partial y} = -\cos \alpha_y g \left( \tan \alpha_y + k \frac{\partial (\cos \alpha_y h)}{\partial y} + \frac{-v}{\sqrt{u^2 + v^2}} S_f \right) \dots \dots \dots (2)$$

merupakan sudut yang dibentuk antara bidang dasar (*bed*) dengan bidang horizontal berarah x dan y. Persamaan massa (1) digunakan untuk memprediksi tebal aliran longsoran *h*.

Persamaan momentum (2) mengekspresikan akselerasi atau percepatan ( $LT^{-2}$ ), dengan *g* merupakan percepatan gravitasi. Sisi kiri dari persamaan 2 merupakan akselerasi konvektif yaitu perubahan waktu rata-rata akibat perubahan posisi di lapangan. Sisi kanan persamaan 2 merupakan akselerasi waktu lokal yang mengekspresikan perubahan waktu rata-rata pada posisi tetap. Suku pertama di dalam tanda kurung merupakan percepatan akibat gravitasi *G* (Gambar 2b),  $\tan \alpha_x$  dan  $\tan \alpha_y$  merupakan gradien lereng dalam arah *x* dan *y* ( $LL^{-1}$ ). Suku kedua merupakan percepatan tekanan yaitu perubahan waktu rata-rata akibat perbedaan tekanan dalam sebuah aliran  $\Delta P$  (Gambar 2b). Suku *k* pada persamaan (2) merupakan koefisien tekanan bumi yaitu rasio antara tegangan tangensial dan tegangan normal (*tangential and normal stresses*). *k* bernilai 1 untuk cairan dan dapat bervariasi untuk materil plastis (Savage and

Hutter, 1989; Hungr, 1995). Tanda minus pada *u* dan *v* pada suku ketiga menunjukkan bahwa arah  $S_f$  berlawanan dengan arah kecepatan.  $S_f$  merupakan gradien resistensi aliran ( $LL^{-1}$ ) yang bertanggungjawab terhadap berkurangnya momentum aliran karena tegangan friksional *T* pada bidang dasar (*bed*) (Gambar 2b).

Aliran debris maupun aliran lumpur sering dimodelkan sebagai material *viscoplastis* dengan aliran laminar. Tegangan geser dideskripsikan menggunakan persamaan (3).

$$\tau(z) = \tau_c + \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^\beta \dots \dots \dots (3)$$

$\tau(z)$  merupakan tegangan geser pada kedalaman *z* ( $ML^{-1}T^{-2}$ ),  $\tau_c$  merupakan *yield strength* karena adanya kohesi,  $\partial v / \partial z$  merupakan perubahan geser dan  $\mu$  ( $ML^{-1}T^{-1}$ ) merupakan parameter viskositas. Viskositas aliran bergantung kepada persentase padatan yang ada pada aliran dan memiliki rentang nilai  $10^{-2}$  hingga  $10^3$ . Eksponen  $\beta$  merupakan parameter empiris yang ditentukan berdasarkan data eksperimen. Banyak model

aliran debris yang dikembangkan berdasarkan formulasi reologi Bingham *viscous fluid* maupun model Herschel-Bulkley menggunakan nilai eksponen  $\beta$  yang berbeda-beda (Beguería drr., 2009). Total stress  $S_f$ , dihitung dengan mengintegrasikan persamaan 3 (Coussot, 2017).

$$S_f = \frac{\tau_0}{\sigma} \left( \frac{3}{2} \tau_c + \frac{3\mu}{h} |u| \right) \dots\dots\dots (4)$$

Persamaan 3 digunakan untuk memodelkan aliran berdasarkan reologi Bingham *frictional* dan akan digunakan dalam penelitian ini. Implementasi numerik persamaan diferensial parsial hiperbolik (1) dan (2) dapat ditulis dengan menggunakan notasi vektor sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} w + k_1 \frac{\partial}{\partial t} g + k_3 (q + s) = 0 \dots\dots\dots (5)$$

dimana

$$w = \begin{pmatrix} h \\ u \\ v \end{pmatrix}, f = \begin{pmatrix} hu \\ u \\ v \end{pmatrix}, g = \begin{pmatrix} hv \\ u \\ v \end{pmatrix}, k_1 = \begin{pmatrix} c_x \\ c_x u \\ c_x v \end{pmatrix}, k_2 = \begin{pmatrix} c_y \\ c_y v \\ c_y u \end{pmatrix}, k_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ c_x \\ c_y \end{pmatrix},$$

$$q = \begin{pmatrix} k \frac{\partial \left( \begin{matrix} 0 \\ g c_x \\ h \end{matrix} \right)}{\partial x} + g S_x \\ k \frac{\partial (g c_x h)}{\partial x} + g S_x \end{pmatrix}, \text{ dan } s = \begin{pmatrix} 0 \\ q_x S_f \\ q_y S_f \end{pmatrix}$$

Model numerik aliran debris pada persamaan (5) akan diimplementasikan pada model raster SIG menggunakan metode beda hingga (*finite difference*). Model tersebut berarti bahwa aliran dideskripsikan oleh variasi kecepatan dan tebal aliran pada setiap piksel pada koordinat tertentu ( $i$  dan  $j$ ) berdasarkan fungsi waktu ( $n$ ). Piksel raster merupakan grid dengan ukuran  $s = \Delta x = \Delta y$ . Persamaan 5 dapat diselesaikan menggunakan metode beda hingga skema maju terpusat (*central difference forward scheme*) sebagai berikut:

$$W_{i,j}^{n+1} = W_{i,j}^n - \Delta t \left( k_{1i,j}^n \right) \left( f_{i+1,j}^n - f_{i-1,j}^n \right) +$$

$$k_{2i+j}^n \left( g_{i+1,j}^n - g_{i-1,j}^n \right) + k_{3i+j}^n \left( q_{i,j}^n + s_{i,j}^{n+1/2} \right) \dots (6)$$

$\Delta t$  merupakan durasi *time step* (detik). Solusi numerik  $W_{i,j}^n$  untuk menghindari efek dispersif pada setiap *time step* menggunakan persamaan:

$$W(w_{i,j}^n) = (1 - CFL) w_{i,j}^n + CFL \frac{w_{i-1,j}^n + w_{i+1,j}^n + w_{i,j-1}^n + w_{i,j+1}^n}{4} \dots\dots\dots (7)$$

di mana

$$CFL = \frac{\Delta t}{s} \sqrt{2(u)}$$

Pemilihan parameter reologi menggunakan data empiris penelitian terdahulu (O'Brien and Julien, 1988; Lee and Widjaja, 2013; Takahashi, 2014) berdasarkan material Longsor Kalisari yang dianalisis di laboratorium. Penelitian ini menggunakan model viscoplastis Bingham (persamaan 3) sehingga parameter reologi yang berpengaruh adalah berat jenis  $\rho$ , *yield strength*  $\tau_c$ , dan viskositas  $\mu$ . Analisis tanah di laboratorium digunakan untuk menghitung berat jenis dan untuk menyusun skenario longsor yaitu kadar air  $w <$  batas cair (LL-*Liquid Limit*) (kondisi plastis),  $w = LL$  (kondisi cair),  $w > LL$  (kondisi cair). Parameter terkait kadar air berkaitan dengan volume padatan  $C_v$  (O'Brien and Julien, 1988; Lee and Widjaja, 2013) yang didefinisikan sebagai berikut:

$$C_v = \frac{1}{1 + w \rho} \dots\dots\dots (8)$$

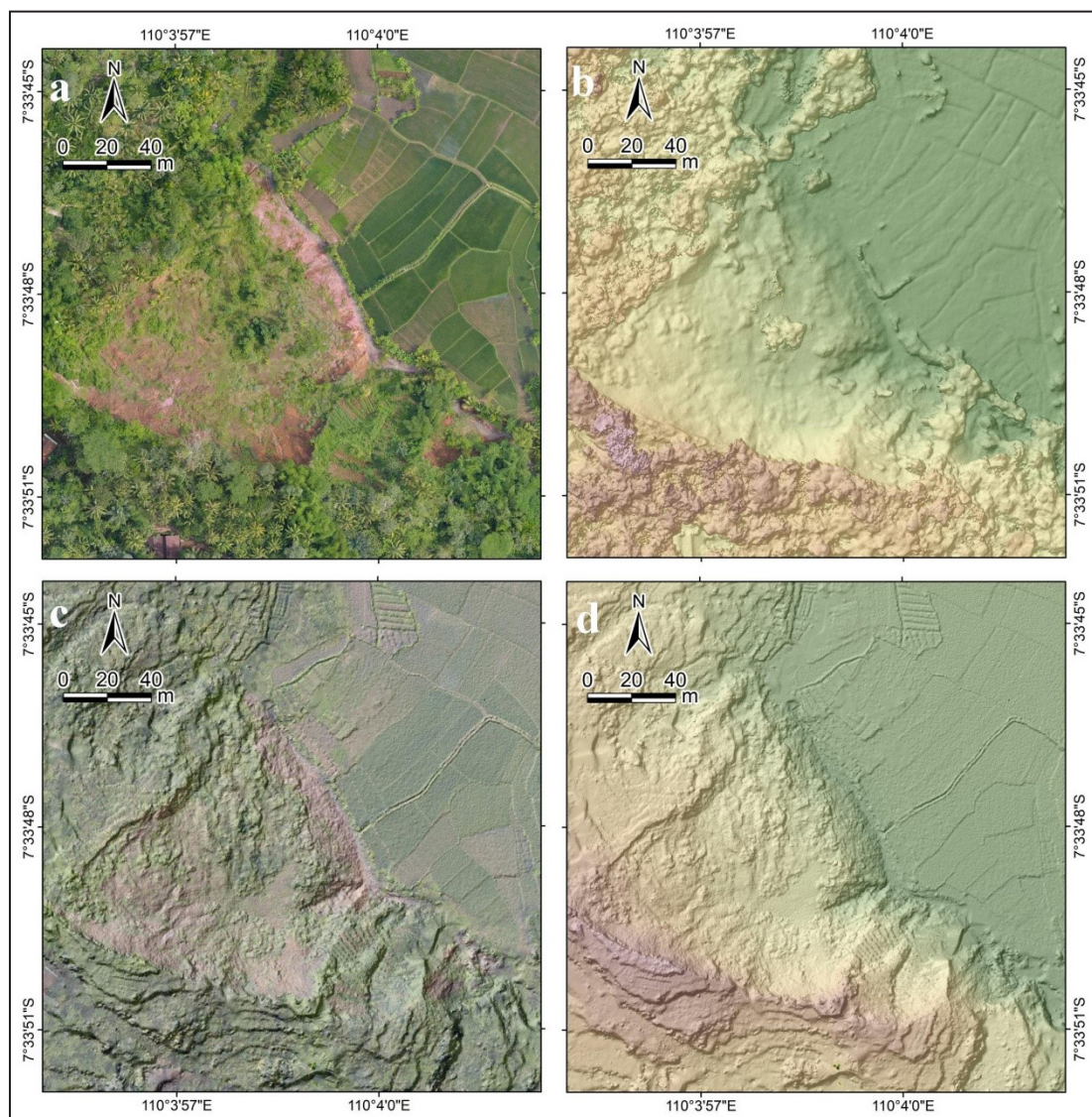
di mana  $\rho$  merupakan berat jenis tanah. Skenario tipe material longsor digunakan untuk menentukan parameter reologi berdasarkan konsep fase (fase plastis-fase cair) aliran lumpur (Lee and Widjaja, 2013).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemetaan batas area longsor menggunakan data penginderaan jauh biasanya menggunakan beberapa kunci interpretasi yang nampak pada citra. Interpretasi foto udara merupakan standar prosedur pemetaan longsor yang telah digunakan cukup lama (Rib and Liang, 1978). Informasi longsor dapat diekstraksi dengan data penginderaan jauh melalui identifikasi morfologi, vegetasi, dan drainase (Soeters and Westen, 1996). Longsor dapat dikenali melalui kenampakan anomali morfologi seperti bentuk tangga (*steplike*), gawir berbentuk setengah lingkaran,

tidak adanya vegetasi yang berasosiasi dengan anomali morfologi, dan keberadaan mata air.

Ketiadaan vegetasi yang berasosiasi dengan anomali morfologi sangat mudah dikenali pada citra penginderaan jauh terutama foto udara. Gambar 3a menunjukkan Longsor Kalisari dengan foto udara (FU) (Samodra dr., 2020b). Longsor Kalisari nampak jelas karena adanya perbedaan kenampakan vegetasi. Batas longsor dapat diidentifikasi dengan mudah apabila terdapat perbedaan keberadaan vegetasi. Meski demikian delineasi batas longsor menggunakan FU masih terganggu apabila terdapat kanopi



Gambar 3. Visualisasi Longsor Kalisari menggunakan foto udara (a), DSM dari pemrosesan SfM (b), *drapped map* foto udara dengan DTM LiDAR (c), dan DTM LiDAR (d).

yang cukup lebat di sekitar longsor. Batas longsor sulit diidentifikasi secara rinci menggunakan Gambar 3a dan 3b. Selain itu, *Digital Surface Model* (DSM) dari pengolahan *Structure from Motion* (SfM) FU masih sulit untuk mengeliminasi kenampakan vegetasi sehingga DTM masih sulit diturunkan dari FU SfM merupakan teknik pencitraan fotogrametri untuk memperkirakan struktur tiga dimensi dari gambar dua dimensi yang bertampalan. Teknik SfM bisa digunakan untuk memperoleh DEM dari citra FU yang bertampalan. Model elevasi digital (DEM) dari SfM merepresentasikan nilai elevasi permukaan vegetasi bukan nilai elevasi permukaan lahan (Gambar 3b). Penggunaan DEM dari SfM untuk estimasi volume atau *initial source* longsor dapat menimbulkan kesalahan pada area dengan kerapatan vegetasi yang tinggi.

Pemetaan longsor menggunakan LiDAR memiliki keunggulan karena dapat merepresentasikan DTM sehingga morfologi dapat terlihat sangat rinci (Gambar 3c dan 3d). Kenampakan vegetasi dapat dieliminasi sehingga longsor dapat diidentifikasi berdasarkan perbedaan elevasi dan pola morfologi. Anomali morfologi seperti gawir, rekahan, permukaan *hummocky*, dan *ponding* dapat dikenali dengan mudah melalui interpretasi DTM LiDAR. Batas longsor dan anatomi longsor dapat ditentukan secara terperinci dan akurat menggunakan DTM LiDAR.

Batas longsor sangat penting sebagai input dalam pemodelan numerik. Pemodelan numerik memerlukan input *initial source* yang berupa batas longsor dan kedalaman material sumber longsor. Dalam penelitian ini, batas dan morfologi longsor diekstraksi menggunakan data LiDAR sedangkan ketebalan material sumber

longsor memakai pengukuran yang dilakukan oleh Samodra drr., (2020) menggunakan geolistrik.

Pemodelan numerik Longsor Kalisari menggunakan input DEM LiDAR dengan resolusi 1 m dan area inisiasi longsor dari pengukuran geolistrik. Berat jenis tanah yang digunakan dalam simulasi adalah sebesar  $2613 \text{ kg m}^{-3}$  yang merupakan hasil pengukuran sampel tanah di laboratorium. Simulasi morfodinamika longsor menggunakan model numerik memerlukan beberapa parameter input sesuai model reologi yang dipilih. Penelitian ini menggunakan model reologi Bingham dengan parameter penting berupa *yield strength*  $\tau_c$  dan viskositas  $\mu$ .

Nilai parameter *yield strength* dan viskositas ditentukan berdasarkan skenario kemungkinan sifat material dan tipe gerakan longsor. Skenario pertama, longsor yang akan terjadi berupa material plastis dengan tipologi *slide*. Skenario dua dan tiga, longsor yang akan terjadi berupa material cair dengan tipologi aliran (*flow*). Tanah bersifat plastis atau cair bergantung pada nilai kadar air ( $w$ ) dan batas cair ( $LL$ -*Liquid Limit*). Tanah akan bersifat plastis apabila  $w < LL$  sedangkan tanah akan bersifat cair apabila  $w \geq LL$ . Parameter  $LL$  (*Liquid Limit*) = 79 % diperoleh dari analisis sampel tanah di laboratorium.

Parameter *yield strength* dan viskositas berkaitan dengan nilai  $C_v$  yang dapat dihitung apabila  $w$  dan  $p$  diketahui (persamaan 10). Penentuan nilai parameter *yield strength* dan viskositas menggunakan grafik empiris hubungan antara  $C_v$  dengan *yield strength* dan  $C_v$  dengan viskositas (Lee and Widjaja, 2013; O'Brien and Julien, 1988; Takahashi, 2014). Tabel 1 menunjukkan

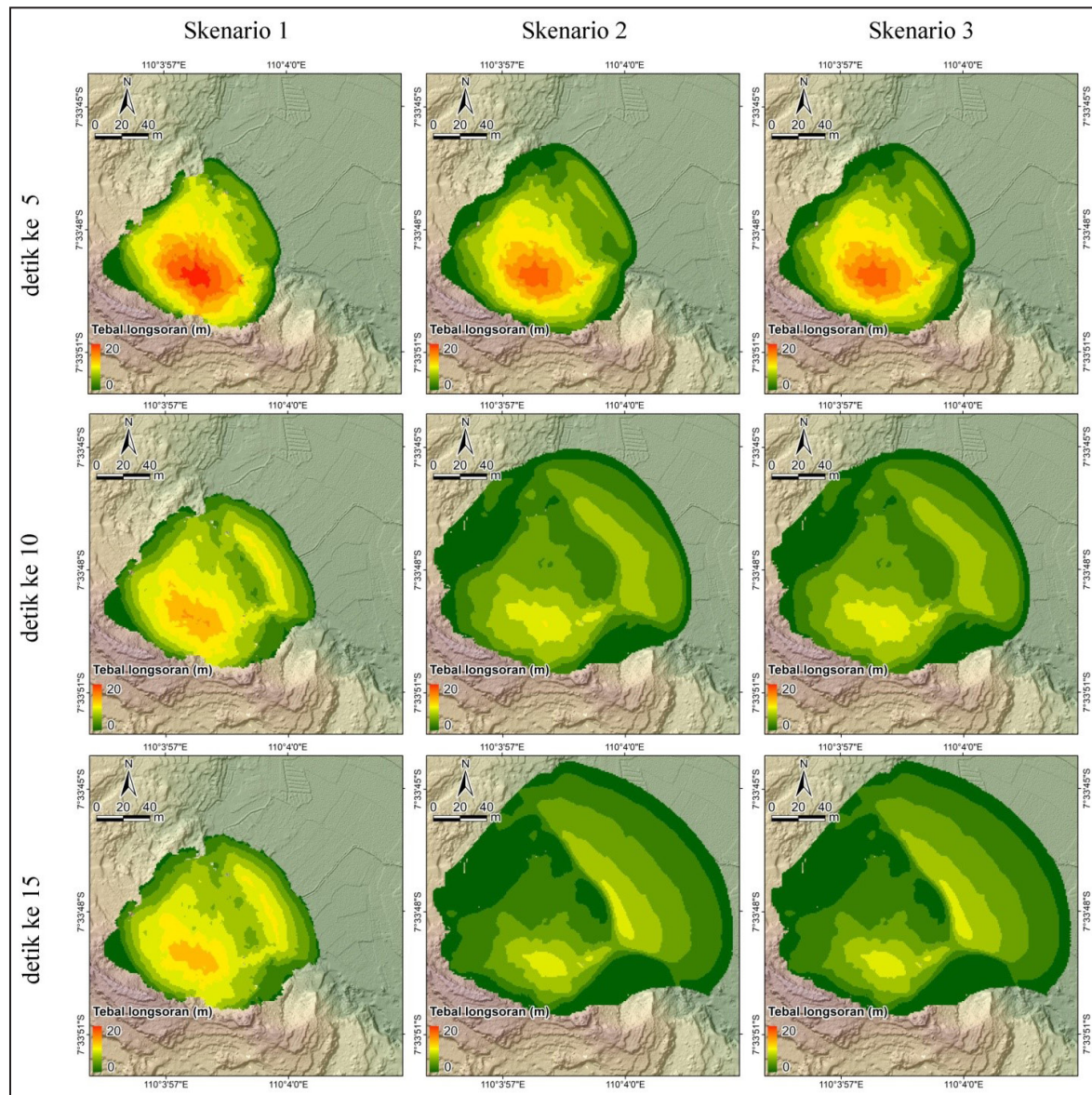
Tabel 1. Parameter yang digunakan dalam analisis morfodinamika Longsor Kalisari

| Parameter pemodelan  | Skenario 1 ( $w < LL$ ) | Skenario 2 ( $w = LL$ ) | Skenario 3 ( $w > LL$ ) |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $w$ (%)              | 65                      | 79                      | 90                      |
| LI (Liquidity Index) | 0,06                    | 1                       | 1.73                    |
| $\tau_c$ (Pa)        | 2000                    | 5                       | 2                       |
| $\mu$ (Pa s)         | 50                      | 0,05                    | 0,04                    |
| $C_v$                | 0,37                    | 0,326                   | 0,298                   |

parameter yang digunakan dalam pemodelan numerik dengan tiga skenario berbeda ( $w < LL$ ,  $w = LL$ , dan  $w > LL$ ).

Skenario 1 menghasilkan longsor dengan panjang *runout* sebesar 129 m, luas landaan 2.443 m<sup>2</sup>, volume 13.320 m<sup>3</sup> pada detik ke 15. Skenario 2 dan 3 menghasilkan hasil yang mirip yaitu panjang *runout* sebesar 198 m, luas landaan 13.320 m<sup>2</sup>, volume 513.223 m<sup>3</sup> pada detik ke 15. Luas landaan dan volume hanya dihitung pada dataran koluvial tanpa memperhitungkan area pada sumber longsor (lereng longsor) (Gambar 4).

Kecepatan dan ketebalan aliran maksimum untuk skenario 1 adalah 8 m/dt dan 10 m. Sedangkan kecepatan dan ketebalan aliran maksimum untuk skenario 2 dan 3 adalah 12 m/dt dan 8 m. Hasil simulasi numerik Longsor Kalisari dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5. Skenario 2 dan 3 merupakan skenario terburuk dengan jarak jangkauan terjauh dan luas area terpapar terluas. Skenario 1 menghasilkan rasio H/L 0,22 dan skenario 2 dan 3 sebesar 0,15. Hasil pemodelan morfodinamika Longsor Kalisari pada detik ke 15 dapat dilihat pada Tabel 2. Skenario 1 merepresentasikan tanah bersifat plastis menghasilkan jarak



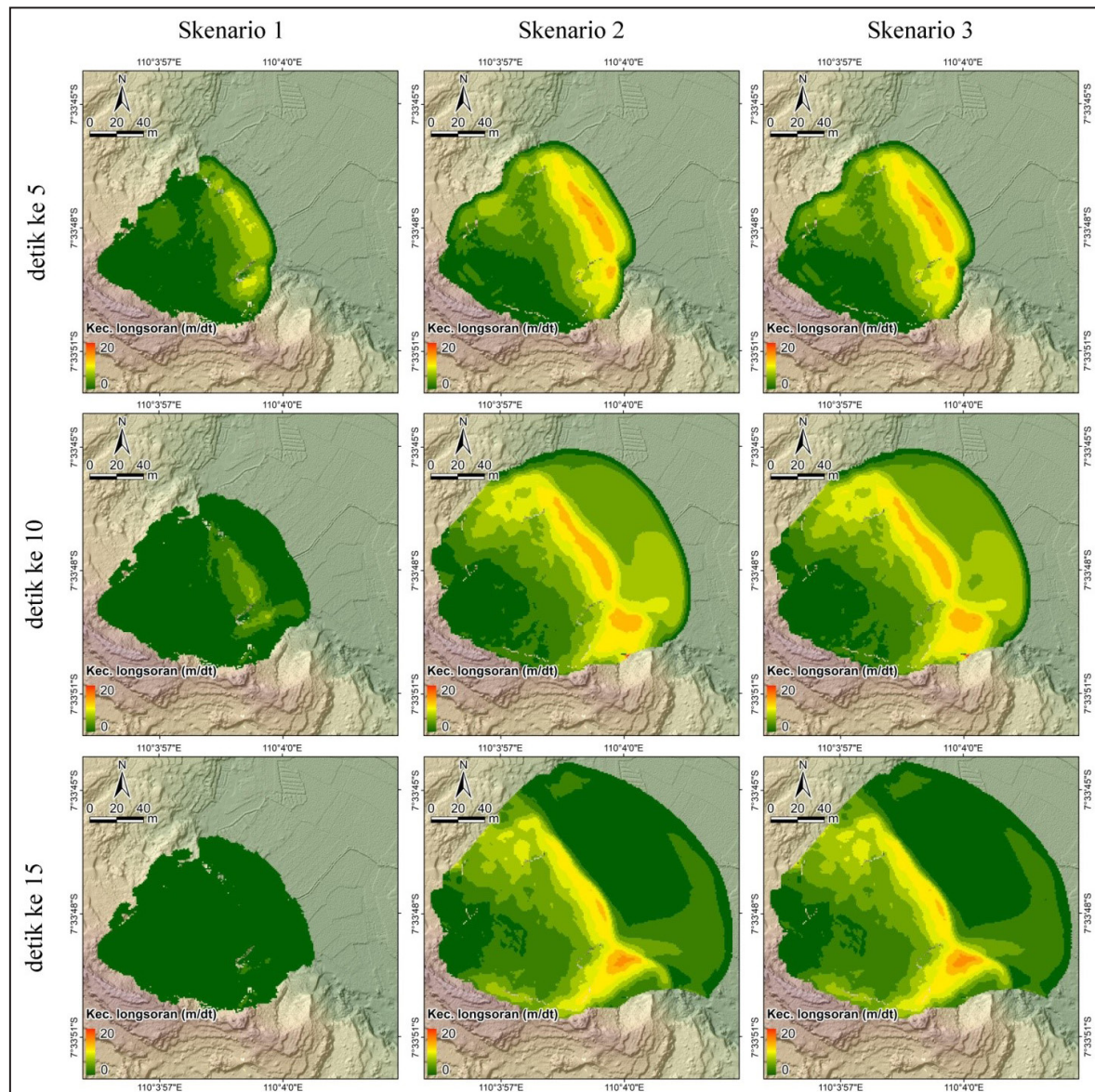
Gambar 4. morfodinamika Longsor Kalisari (tebal longsor) dengan berbagai skenario.

luncuran yang tidak terlalu jauh dan dapat diinterpretasikan bahwa tipe pergerakan kemungkinan adalah tipe *slide*. Sedangkan skenario 2 dan 3 yang merepresentasikan tanah bersifat cair dan jarak luncuran yang cukup jauh dapat diinterpretasikan bahwa tipe longsor adalah tipe aliran.

Gambar 4 dan 5 merupakan morfodinamika Longsor Kalisari (tebal aliran, kecepatan, dan area terpapar) pada detik ke 5, 10, dan 15 dengan berbagai skenario (Tabel 1 dan 2). Gambar 4 skenario 1 menunjukkan perubahan tebal longsor dari detik ke 5 hingga ke 15 tidak terlalu signifikan. Begitu juga Gambar 5 skenario 1

yang tidak menghasilkan perubahan kecepatan yang signifikan.

Skenario 2 dan 3 (Gambar 4&5) menghasilkan area terpapar yang luas melanda area pertanian. Longsor kemungkinan tidak mencapai area permukiman Dusun Kalisari. Perubahan ketebalan dan kecepatan juga terjadi secara signifikan antara detik ke 5, 10, dan 15 pada skenario 2 dan 3. Pada skenario 2 dan 3 material longsor sudah berubah sifat dari padat menjadi cair sehingga mobilisasi material dapat mencapai jarak yang lebih jauh dibandingkan skenario 1. Animasi morfodinamika Longsor Kalisari dalam



Gambar 5. morfodinamika Longsor Kalisari (kecepatan longsor) dengan berbagai skenario.

Tabel 2. hasil pemodelan morfodinamika Longsor kalisari pada detik ke 15

| Hasil pemodelan                | Skenario 1<br>(tanah bersifat plastis) | Skenario 2<br>(tanah bersifat cair) | Skenario 3<br>(tanah bersifat cair) |
|--------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Panjang <i>runout</i> (m)      | 129                                    | 198                                 | 198                                 |
| Luas landaan (m <sup>2</sup> ) | 2.443                                  | 13.230                              | 13.230                              |
| Volume (m <sup>3</sup> )       | 13.320                                 | 513.223                             | 513.223                             |
| Kecepatan maksimum (m/dt)      | 8                                      | 12                                  | 12                                  |
| Tebal maksimum (m)             | 10                                     | 8                                   | 8                                   |
| H/L                            | 0,22                                   | 0,15                                | 0,15                                |

bentuk animasi terlampir dalam *Supplementary Material*.

Analisis prediksi morfodinamika Longsor Kalisari dapat digunakan untuk perhitungan risiko pada area pertanian. Data LiDAR memungkinkan perhitungan elemen berisiko longsor pada lahan pertanian. Kombinasi FU, LiDAR dan model numerik memiliki potensi yang baik untuk digunakan dalam analisis risiko longsor secara umum.

Penggunaan prediksi luas area terpapar, ketebalan, dan kecepatan longsor dapat digunakan sebagai peta rawan longsor skala besar/rinci. Peta kerawanan longsor skala besar yang memuat informasi intensitas longsor seperti luas area terpapar, ketebalan, dan kecepatan longsor dapat digunakan dalam perencanaan penggunaan lahan berbasis risiko bencana skala rinci (Cascini, 2008; Fell dr., 2008). Peta longsor skala besar memerlukan sumber data spasial beresolusi tinggi dan berskala besar.

Salah satu sumber data spasial topografi beresolusi tinggi adalah LiDAR. DTM berbasis LiDAR dengan resolusi 1 m telah dapat digunakan dengan sangat baik sebagai input untuk pemodelan morfodinamika Longsor Kalisari berbasis numerik. Material longsor dapat mengalir pada area persawahan yang relatif datar. DTM sangat berpengaruh terhadap hasil pemodelan numerik. Penggunaan data dengan presisi yang lebih tinggi dapat menghasilkan akurasi hasil pemodelan yang lebih tinggi (Sodnik dr., 2013).

Data topografi dengan resolusi spasial yang lebih rinci dapat merepresentasikan morfologi longsor lebih baik. Selain resolusi spasial data topografi,

hasil pemodelan juga dipengaruhi oleh input parameter (Phillips and Davies, 1991). Parameter *yield strength* dan viskositas perlu dipilih dengan sangat hati-hati. Nilai parameter akan sangat mempengaruhi hasil pemodelan. Uji sensitivitas juga dapat dilakukan untuk mengetahui seberapa sensitif parameter mempengaruhi hasil pemodelan. Meski demikian, uji sensitivitas berada di luar konteks penelitian ini.

Parameter pemodelan secara ideal dihitung menggunakan rheometer dengan sampel tanah yang diambil di lapangan (Bisantino dr., 2010; Liu dr., 2020; O'Brien and Julien, 1988) kemudian dilakukan verifikasi menggunakan eksperimen dengan *flume test* (Iverson, 1997; Hu dr., 2014; Takahashi, 2014; de Haas dr., 2015; Hürlimann dr., 2015; ). Hasil dari verifikasi kemudian memerlukan uji validasi dan kalibrasi supaya input parameter dapat digunakan secara tepat dalam pemodelan (Aaron dr., 2019). Meski demikian, dengan alasan kepraktisan pemilihan parameter reologi sering ditentukan menggunakan metode *trial-error* yang dilakukan melalui pencocokan hasil pemodelan dengan area longsor yang sudah terjadi (*back analysis*) (Dietrich and Krautblatter, 2019; Zimmermann dr., 2020). Parameter pemodelan yang terbaik merupakan parameter yang dapat menghasilkan model area terpapar mirip dengan area terpapar longsor yang telah terjadi. Metode seperti ini memerlukan DTM sebelum dan setelah kejadian untuk menentukan luas dan volume *source area*. Data area yang terpapar juga diperlukan sebagai acuan perbandingan hasil pemodelan. Uji sensitivitas, analisis reologi di laboratorium, verifikasi, kalibrasi, validasi,

dan *back analysis* perlu dilakukan di masa mendatang untuk memahami dengan lebih baik morfodinamika Longsor Kalisari.

## KESIMPULAN

Pemetaan topografi menggunakan LiDAR sangat superior dibandingkan dengan menggunakan SfM foto udara. SfM foto udara belum dapat diolah menjadi DTM dan hanya bisa diolah menjadi DSM karena tidak bisa mengeliminasi vegetasi di daerah penelitian. DSM tidak bisa digunakan untuk menghitung volume material longsor yang digunakan sebagai input pemodelan morfodinamika longsor. Selain itu, anomali morfologi sebagai tanda keberadaan longsor sangat mudah dikenali melalui interpretasi DTM LiDAR sehingga penentuan batas longsor dapat dilakukan dengan presisi yang lebih tinggi daripada menggunakan foto udara. Batas longsor dan DTM LiDAR digunakan sebagai data *input* dalam pemodelan numerik morfodinamika longsor yang menghasilkan luasan wilayah terpapar, jarak luncur, kecepatan, dan tebal material yang terpindahkan. Pemodelan numerik Longsor Kalisari menghasilkan dua skenario berdasarkan sifat material dan tipe gerakan longsor. Skenario material bersifat plastis menghasilkan tipologi longsor *slide* sedangkan skenario material bersifat cair menghasilkan tipologi longsor aliran. Hasil pemodelan dapat dikonversi menjadi peta kerawanan longsor yang memiliki informasi intensitas longsor seperti luasan wilayah terpapar, jarak luncur, kecepatan, dan tebal material yang terpindahkan. Peta kerawanan longsor skala besar yang merupakan hasil dari pemodelan morfodinamika longsor dapat digunakan secara praktis sebagai bagian dari dokumen perencanaan penggunaan lahan berbasis risiko bencana skala rinci. Rencana rinci tata ruang berbasis pengurangan risiko bencana skala besar sebaiknya menggunakan peta kerawanan yang memiliki informasi intensitas longsor daripada hanya menggunakan peta kerawanan dengan informasi kategori secara kualitatif hasil dari pembobotan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada M. Fauzan Ramadhan yang telah membantu dalam pelaksanaan survei foto udara. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Geografi UGM yang telah membiayai sebagian penelitian ini melalui skema Hibah Penelitian Dosen Fakultas Geografi UGM 2021.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aaron, J., McDougall, S., Nolde, N., 2019. Two methodologies to calibrate landslide runout models. *Landslides* 16, 907–920. DOI:10.1007/s10346-018-1116-8.
- Beguiría, S., Van Asch, T.W.J., Malet, J.-P., Gröndahl, S., 2009. A GIS-based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 1897–1909. DOI:10.5194/nhess-9-1897-2009.
- Bisantino, T., Fischer, P., Gentile, F., 2010. Rheological characteristics of debris-flow material in South-Gargano watersheds. *Nat. Hazards* 54, 209–223. DOI:10.1007/s11069-009-9462-4.
- Cascini, L., 2008. Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. *Eng. Geol.* 102, 164–177. DOI:10.1016/j.enggeo.2008.03.016.
- Cheon, E., Lee, S.-R., Lee, D.-H., 2020. Hazard Assessment Based on the Combination of DAN3D and Machine Learning Method for Planning Closed-Type Barriers against Debris-Flow. *Water* 12, 170. DOI:10.3390/w12010170.
- Cornforth, D., 2005. *Landslides in Practice: Investigation, Analysis, and Remedial/Preventative Options in Soils*. Wiley, New Jersey.
- Coussot, P., 2017. *Mudflow rheology and dynamics*, 1st ed, *Mudflow Rheology and Dynamics*. CRC Press. DOI:10.1201/9780203746349.
- Crozier, M.J., 2010. *Landslide geomorphology: An argument for recognition, with examples from New Zealand*. Geomor-

- phology 120, 3–15. DOI:10.1016/j.geomorph.2009.09.010.
- de Haas, T., Braat, L., Leuven, J.R.F.W., Lokhorst, I.R., Kleinhans, M.G., 2015. Effects of debris flow composition on runout, depositional mechanisms, and deposit morphology in laboratory experiments. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 120, 1949–1972. DOI:10.1002/2015JF003525.
- Dietrich, A., Krautblatter, M., 2019. Deciphering controls for debris-flow erosion derived from a LiDAR-recorded extreme event and a calibrated numerical model (Roßbichelbach, Germany). *Earth Surf. Process. Landforms* 44, 1346–1361. DOI:10.1002/esp.4578.
- Dramis, F., Guida, D., Cestari, A., 2011. Nature and aims of geomorphological mapping, in: *Developments in Earth Surface Processes*. Elsevier B.V., pp. 39–73. DOI:10.1016/B978-0-444-53446-0.00003-3.
- 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. *Eng. Geol.* 102, 85–98.
- Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K.T., 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Sci Rev.* 112, 42–66. DOI:10.1016/j.earscirev.2012.02.001.
- Hu, W., Xu, Q., van Asch, T.W.J., Zhu, X., Xu, Q.Q., 2014. Flume tests to study the initiation of huge debris flows after the Wenchuan earthquake in S-W China. *Eng. Geol.* 182, 121–129. DOI:10.1016/j.eng-geo.2014.04.006.
- Hungr, O., 1995. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Can. Geotech. J.* 32, 610–623. DOI:10.1139/t95-063.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11, 167–194. DOI:10.1007/s10346-013-0436-y.
- Hürlimann, M., McArdell, B.W., Rickli, C., 2015. Field and laboratory analysis of the runout characteristics of hillslope debris flows in Switzerland. *Geomorphology* 232, 20–32. DOI:10.1016/j.geomorph.2014.11.030.
- Iverson, R.M., 1997. The physics of debris flows. *Rev. Geophys.* 35, 245–296. DOI:10.1029/97RG00426.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A., 2012. Use of LIDAR in landslide investigations: A review. *Nat. Hazards*. DOI:10.1007/s11069-010-9634-2.
- Korup, O., 2009. Linking landslides, hillslope erosion, and landscape evolution. *Earth Surf. Process. Landforms* 34, 1315–1317. DOI:10.1002/esp.1830.
- Lee, S.H.H., Widjaja, B., 2013. Phase concept for mudflow based on the influence of viscosity. *Soils Found.* 53, 77–90. DOI:10.1016/j.sandf.2012.12.005.
- Liu, X., Wang, F., Nawnit, K., Lv, X., Wang, S., 2020. Experimental study on debris flow initiation. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 79, 1565–1580. DOI:10.1007/s10064-019-01618-8.
- McDougall, S., 2017. 2014 Canadian Geotechnical Colloquium: Landslide runout analysis — current practice and challenges. *Can. Geotech. J.* 54, 605–620. DOI:10.1139/cgj-2016-0104.
- O'Brien, J.S., Julien, P.Y., 1988. Laboratory Analysis of Mudflow Properties. *J. Hydraul. Eng.* 114, 877–887. DOI:10.1061/(asce)0733-9429(1988)114:8(877).
- Phillips, C.J., Davies, T.R.H., 1991. Determining rheological parameters of debris flow material. *Geomorphology* 4, 101–110. DOI:10.1016/0169-555X(91)90022-3.
- Rib, H.T., Liang, T., 1978. Recognition and Identification, in: Robert, L.S., Raymond, J.K. (Eds.), *Landslides Analysis and Control*. the National Academic of Sciences, Washington, pp. 34–79.
- Rodríguez-Morata, C., Villacorta, S., Stoffel, M., Ballesteros-Cánovas, J.A., 2019. Assessing strategies to mitigate debris-flow risk in Abancay province, south-central Peru-

- vian Andes. *Geomorphology* 342, 127–139. DOI:10.1016/j.geomorph.2019.06.012.
- Samodra, G., Chen, G., Sartohadi, J., Kasama, K., 2018. Generating landslide inventory by participatory mapping: an example in Purwosari Area, Yogyakarta, Java. *Geomorphology* 306, 306–313. DOI:10.1016/j.geomorph.2015.07.035.
- Samodra, G., Ngadisih, N., Malawani, M.N., Mardiatno, D., Cahyadi, A., Nugroho, F.S., 2020a. Frequency–magnitude of landslides affected by the 27–29 November 2017 Tropical Cyclone Cempaka in Pacitan, East Java. *J. Mt. Sci.* 17, 773–786. DOI:10.1007/s11629-019-5734-y
- Samodra, G., Ramadhan, M.F., Sartohadi, J., Setiawan, M.A., Christanto, N., Sukmawijaya, A., 2020b. Characterization of displacement and internal structure of landslides from multitemporal UAV and ERT imaging. *Landslides* 17, 2455–2468. DOI:10.1007/s10346-020-01428-0
- Sartohadi, J., Harlin Jennie Pulungan, N.A., Nurudin, M., Wahyudi, W., 2018. The ecological perspective of landslides at soils with high clay content in the middle bogowonto watershed, central Java, Indonesia. *Appl. Environ. Soil Sci.* 2018. DOI:10.1155/2018/2648185.
- Savage, S.B., Hutter, K., 1989. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *J. Fluid Mech.* 199, 177–215. DOI:10.1017/S0022112089000340.
- Sodnik, J., Podobnikar, T., Petje, U., Mikoš, M., 2013. Topographic Data and Numerical Debris-Flow Modeling, in: *Landslide Science and Practice*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 573–578. DOI:10.1007/978-3-642-31325-7\_75.
- 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.
- Takahashi, T., 2014. *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*, 2nd ed. CRC Press.
- van Bemmelen, R.W., 1949. *The Geology of Indonesia*. Govt. Print. Off., The Hague.
- van Zuidam, R.A., 1983. *Guide to Geomorphologic Areal Photographic Interpretation and Mapping*. Section of Geology and Geomorphology, ITC, Enschede, The Netherlands.
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes, in: Schuster, R., Krizek RJ (Eds.), *Landslides, Analysis and Control*, Special Report 176: Transportation Research Board. National Academy of Sciences, Washington DC, pp. 11–33.
- Zimmermann, F., Mc Ardell, B.W., Rickli, C., Scheidl, C., 2020. 2D Runout Modeling of Hillslope Debris Flows, Based on Well-Documented Events in Switzerland. *Geosciences* 10, 70. DOI:10.3390/geosciences10020070