

Identifikasi Longsor dan Pemodelan Probabilitas Jarak Luncur Longsor di Lereng Waduk Bener, Purworejo, Jawa Tengah

Esya Rachma Ningrum^{1*} dan Guruh Samodra¹

¹Geografi Lingkungan, Universitas Gadjah Mada; e-mail: esya.rachma.ningrum@mail.ugm.ac.id

ABSTRAK

Bendungan Bener di Kabupaten Purworejo merupakan bendungan tertinggi di Indonesia. Lereng-lereng di Waduk Bener berpotensi mengalami longsor dan degradasi lahan. Tahap awal pengurangan risiko untuk mengurangi dampak longsor dan degradasi lahan di Waduk Bener dapat dilakukan melalui pemetaan kerawanan longsor. Tujuan penelitian ini, yaitu: (1) menginventarisasi area longsor di lereng Waduk Bener, (2) mengidentifikasi sumber longsor di lereng Waduk Bener, dan (3) menilai kerawanan longsor di lereng Waduk Bener. Metode yang digunakan adalah interpretasi foto udara, pemodelan *FlowR* berbasis raster GIS, dan observasi lapangan. Interpretasi longsor secara visual menggunakan foto udara dapat mengidentifikasi 72 area dan sumber longsor yang berpotensi untuk menjadi aliran. Sumber longsor dapat dibagi menjadi unit longsor zona deplesi dan zona akumulasi. Kedua zona digunakan sebagai sumber longsor (*predefined source*) dalam pemodelan jarak luncur menggunakan perangkat lunak *FlowR*. Sebaran aliran longsor terdistribusi pada morfologi lereng atas, lereng tengah, bawah, dan lembah. Lereng atas, tengah, bawah dan lembah memiliki tingkat kerawanan longsor tinggi-sedang. Lereng bawah dan lembah memiliki kerawanan longsor rendah. Area yang memiliki kerawanan tinggi merupakan area yang diprioritaskan untuk dilakukan konservasi lahan untuk mengurangi risiko longsor.

Kata kunci: *FlowR*, Kerawanan, Longsor, Probabilitas

ABSTRACT

Bener Dam in Purworejo Regency is the highest dam in Indonesia. The slopes of Bener Reservoir have the potential for landslides and land degradation. Risk reductions are necessary to reduce the impact of landslides and land degradation in Bener Reservoir through landslide susceptibility mapping. The objectives of this study are to: (1) identify the landslide area on the slopes of the Bener Reservoir; (2) identify the source of the landslide on the slopes of the Bener Reservoir; and (3) assess the landslide susceptibility on the slopes of the Bener Reservoir. The methods employed in the study were aerial photo interpretation, *FlowR* modeling based on raster GIS, and field observations. Visual interpretation of landslides using aerial photographs can identify 72 areas and sources of landslides that have the potential to become flows. The source of landslides is divided into depletion zones and accumulation zones. Both zones become source area landslides (*predefined sources*) employed for runout modeling using *FlowR* software. The distribution of landslides occurs in the upper slope, mid slope, lower slope, and valley, which have high-to-moderate landslide susceptibility. The lower slope and valley have low landslide susceptibility. High-moderate susceptibility zones are priority areas for land conservation to reduce landslides risk.

Keywords: *FlowR*, Susceptibility, Landslide, Probability

Citation: Ningrum, E. R. dan Samodra, G. (2024). Identifikasi Longsor dan Pemodelan Probabilitas Jarak Luncur Longsor di Lereng Waduk Bener, Purworejo, Jawa Tengah. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(5), 1242-1254, doi:10.14710/jil.22.5.1242-1254

1. PENDAHULUAN

Bendungan Bener yang terletak di Kabupaten Purworejo merupakan salah satu bendungan yang sedang dibangun di Indonesia sejak tahun 2021 dan akan menjadi bendungan tertinggi di Indonesia. Infrastruktur tersebut merupakan salah satu dari Proyek Strategis Nasional (PSN) Indonesia. Bendungan Bener yang membendung aliran Sungai Bogowonto akan berfungsi untuk memenuhi kebutuhan air rumah tangga, industri, kota, dan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).

Degradasi lahan dapat ditemukan di lereng-lereng Waduk Bener berupa lahan yang tidak terdapat vegetasi dan mengalami proses penurunan produktivitas lahan serta cenderung bersifat merusak (Wahyunto & Dariah, 2014). Degradasi lahan di Waduk Bener yang berupa erosi dan longsor dapat menyebabkan sedimentasi sehingga dapat mengurangi umur waduk. Kondisi Bendungan Bener juga berada di daerah rawan longsor dengan lereng curam, kondisi lereng tidak stabil, dan karakteristik geomorfik rawan longsor (Muhardi & Wahyudi,

2019;Widiastutik & Buchori, 2018). Longsor-longsor kecil dapat memicu longsor dengan volume yang sangat besar dan dapat mengganggu fungsi waduk, seperti yang terjadi di Bendungan Vajont Italia tahun 1963 (Ghirotti, 2013).

Bendungan Vajont di Italia tahun 1963 mengalami bencana longsor pada lereng-lereng waduk hingga mengakibatkan tsunami. Hal tersebut terjadi karena tidak dilakukannya inventarisasi longsor pada lereng waduk dan identifikasi area lereng yang berpotensi tidak stabil. Kestabilan lereng bendungan dapat dipengaruhi oleh beberapa hal seperti siklus pengisian dan pengurangan air bendungan (Tang dkk., 2019), peningkatan pori-pori tanah (Ghirotti, 2013), dan meningkatnya tekanan hidrolik air pada waduk (Li dkk., 2019).

Tindakan mitigasi dan konservasi pada lereng-lereng waduk diperlukan agar fungsi waduk dapat berjalan sesuai dengan rencana. Identifikasi potensi longsor diperlukan untuk mengetahui area prioritas tindakan mitigasi dan konservasi pada lereng-lereng Waduk Bener. Pemodelan *Geography Information System* (GIS) berbasis raster dapat digunakan untuk mengidentifikasi area prioritas dengan pemetaan kerawanan longsor (Quan, 2012).

Berdasarkan hal tersebut analisis mengenai area rawan longsor secara spasial pada lereng-lereng Waduk Bener penting dilakukan guna mengurangi risiko bencana longsor. Analisis area rawan longsor dapat berupa prediksi jarak luncur material. Analisis tersebut diperlukan untuk menggambarkan potensi area luncuran, mensimulasikan gerakan longsor masa lalu, dan memprediksi potensi gerakan longsor di masa depan (McDougall, 2017). Metode analisis penyebaran longsor (*runout*) terus mengalami perkembangan hingga 20 tahun terakhir. Metode pemodelan *FlowR* oleh Horton dkk.(2013) termasuk dalam metode baru yang merupakan metode penilaian kerawanan longsor empiris berbasis fisik (*physically based*).

Metode *FlowR* dapat mengidentifikasi potensi area sumber longsor dan estimasi penyebaran longsor (*runout*) dengan data relatif sedikit. Berbeda dengan metode pemetaan kerawanan longsor lainnya yang hanya dapat mengetahui area rawan longsor saja tanpa diketahui seberapa besar aliran longsornya. Kelebihan model ini adalah hasil dari pemodelan dapat dilihat lebih cepat dengan beberapa algoritma yang dapat dipilih serta data masukan yang dapat ditentukan oleh pengguna sesuai dengan wilayahnya (Horton dkk., 2013).

Tujuan dilakukannya penelitian adalah menginventarisasi area longsor di lereng Waduk Bener, mengidentifikasi sumber longsor di lereng Waduk Bener, dan menilai kerawanan longsor di

lereng Waduk Bener berdasarkan pemodelan *FlowR*. Hasil dari analisis *FlowR* berupa peta persebaran potensi jarak luncur (*runout*) yang dapat digunakan sebagai acuan dalam menentukan kerawanan longsor di lereng Waduk Bener. Pemodelan *FlowR* dapat digunakan untuk perencanaan konservasi dan mitigasi bencana.

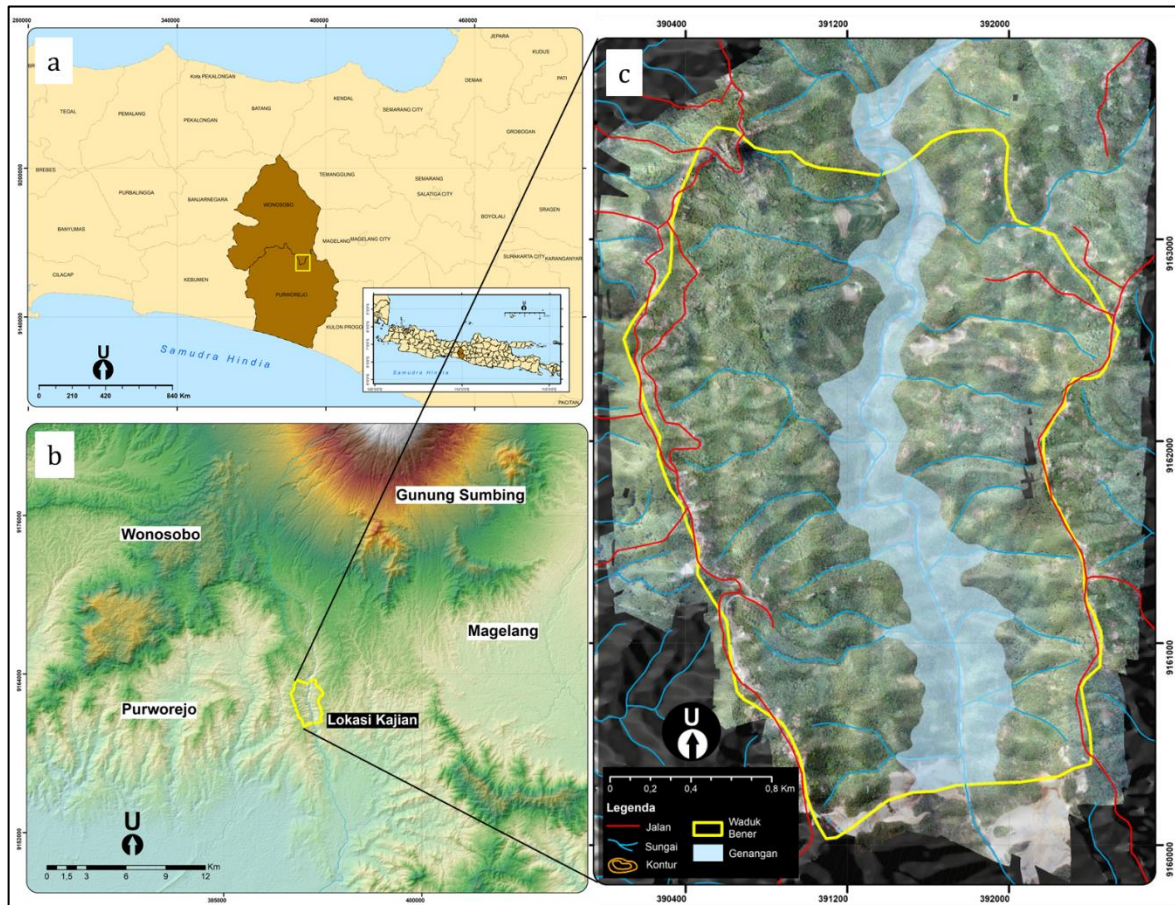
2. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi Penelitian

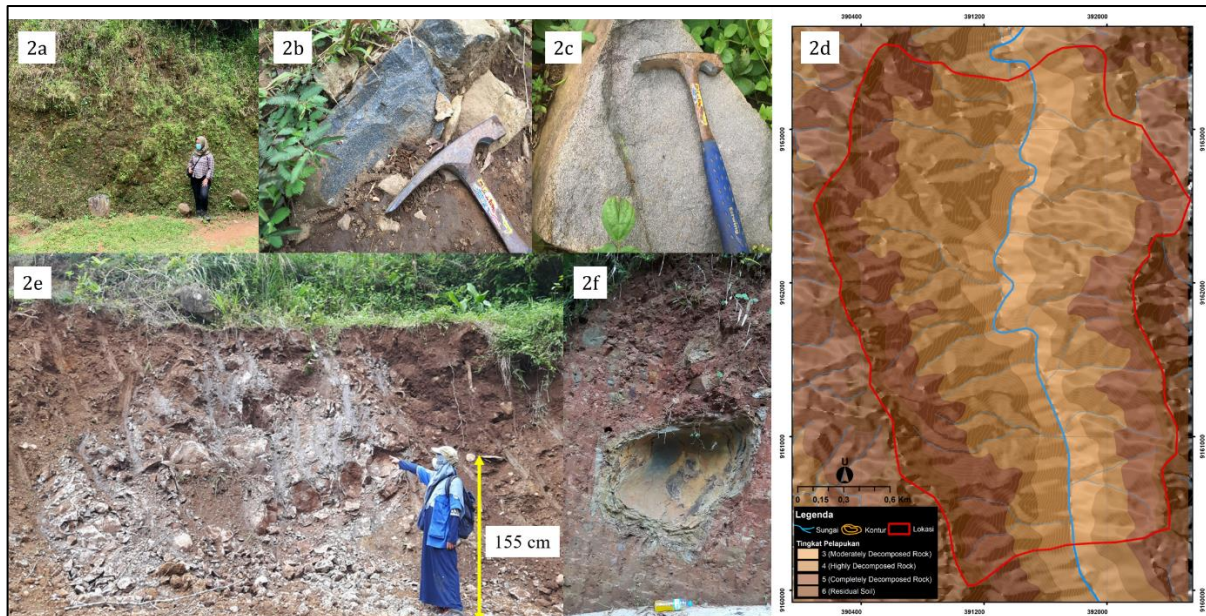
Lokasi penelitian berfokus pada lereng-lereng Waduk Bener yang secara administratif berada di Kabupaten Purworejo dan Kabupaten Wonosobo, Jawa Tengah dengan luas 600m² (Gambar 1). Skala pemetaan yang digunakan adalah skalamenengah yaitu 1:25.000.

Kondisi geologi Waduk Bener berada pada Formasi Kebobutak dan Endapan Gunungapi Sumbing Muda yang terletak pada jalur Pegunungan Selatan Jawa Tengah. Formasi Kebobutak tersusun oleh batuan breksi andesit, tuf, tuf lapilli, aglomerat, dan sisipan aliran lava andesit (Pratama dkk., 2017). Singkapan batuan breksi monomik ditemukan di lereng Waduk Bener (Gambar 2a). Komposisi fragmen pada batuan breksi monomik berupa batuan beku andesit yang merupakan material vulkanik (Gambar 2b). Material vulkanik berupa bongkah basalt yang diidentifikasi sebagai fragmen basalt (Gambar 2c) mengindikasikan keberadaan singkapan breksi polimik pada lereng Waduk Bener. Breksi polimik andesit basalt ditemukan di lereng Waduk Bener pada sisi timur Bendungan Bener (Sasangka dkk., 2020). Breksi monomik andesit memiliki tingkat resistensi lebih baik dibandingkan dengan breksi polimik andesit karena breksi polimik andesit lebih intensif mengalami denudasi (Sasangka dkk., 2020).

Pelapukan mengulit bawang (*concooid spheroidal/spheroidal weathering*) ditemukan di beberapa lokasi di lereng Waduk Bener (Gambar 2e dan 2f). Hal tersebut merupakan tanda dari adanya pelapukan tinggi. Secara umum lereng Waduk Bener memiliki tingkat pelapukan batuan tingkat tiga (*Moderately Decomposed Rock*) hingga tingkat enam (*Residual Soil*) (Gambar 2d). Tingkat pelapukan batuan di lereng Waduk Bener menunjukkan peningkatan pelapukan dari lembah hingga puncak. Tingkat pelapukan semakin meningkat dari dasar lembah hingga puncak bukit (Biondino dkk., 2020). Kondisi pelapukan batuan juga dapat memicu terjadi longsor pada lereng Waduk Bener. Morfologi lereng Waduk Bener mulai dari puncak perbukitan, igir, lereng, hingga lembah. Lereng perbukitan pada morfologi Waduk Bener dibagi kedalam tiga lereng yaitu lereng atas (*upper slope*), lereng tengah (*mid slope*), dan lereng bawah (*lower slope*).



Gambar 1. Lokasi Penelitian, a) Kabupaten Purworejo dan Kabupaten Wonorejo, b) *Digital Elevation Model*, dan c) Foto Udara Waduk Bener



Gambar 2. a) Breksi Monomik, b) Fragmen Andesit, c) Fragmen Basalt, d) Peta Tingkat Pelapukan Batuan Waduk Bener, e) *Spheroidal weathering*, dan f) *Spheroidal weathering*

2.2. Inventarisasi Longsor

Inventarisasi longsor dilakukan dengan kombinasi dari dua metode yaitu metode pemetaan tidak langsung (*indirect mapping*) (Soeters & Westen, 1984) dan survei lapangan. Metode pemetaan tidak langsung dilakukan dengan interpretasi visual foto udara dan

digital elevation model nasional (DEMNAS) (<https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/>) berdasarkan unsur interpretasi (rona, warna, morfologi, vegetasi, dan drainase). Kenampakan objek hasil interpretasi visual foto udara untuk identifikasi area longsor meliputi tipe dan aktivitas longsor. Hasil

interpretasi dilakukan survei lapangan guna menambahkan informasi terkait tanda-tanda longsor dan memverifikasi hasil interpretasi.

2.3. Data untuk Pemodelan

Basis data masukan (*input*) pada pemodelan *FlowR* yaitu longsor (sumber longsor dari interpretasi dan observasi lapangan) dan *digital elevation model* (DEMNAS). Semua data diolah menjadi format data *raster* dan dilakukan *upscaling* data pada resolusi 10 meter. Pengolahan data dilakukan pada perangkat lunak ILWIS 3.31 dan QGIS 10.3.

2.4. Pemodelan *Flow R*

Pemodelan *FlowR* terbagi menjadi dua tahapan yaitu identifikasi potensial sumber longsor (*source area*) dan penilaian penyebaran longsor (*propagation*). Pemodelan penyebaran longsor (*runout*) menghitung penyebarannya berdasarkan dua algoritma, yaitu algoritma penyebaran aliran (*direction algorithm*) dan algoritma penilaian jarak *runout* berbasis perhitungan energi kinetik (*inertia algorithm*). Algoritma penyebaran yang digunakan adalah algoritma *Holmgren (1994) modified*. Algoritma ini digunakan untuk mengetahui proporsi aliran (*flow proportion, fsi*) yang dipilih karena satu-satunya algoritma yang memiliki parameter penyebaran (Horton dkk., 2013) dengan persamaan (1);

$$f_{si} = \frac{(\tan\beta_i)^x}{\sum_{j=1}^8 (\tan\beta_j)^x}$$

$$\tan\beta > 0$$

Dimana: i, j adalah *flow direction* (1..8) dengan sudut interval 45°; *fsi* adalah proporsi aliran (*flow proportion*) (0..1) pada arah i ; $\tan\beta_i$ adalah sudut kemiringan antara sel pusat dengan sel arah i ; dan x adalah variable eksponen.

Algoritma inersia merupakan fungsi pembobotan sesuai perubahan arah untuk mengetahui proporsi aliran (*flow proportion, fpi*) (Horton dkk., 2011) dengan persamaan (2);

$$f_{pi} = w_{\alpha i}$$

Dimana: i adalah *flow direction* (1..8); *fpi* adalah proporsi aliran (*flow proportion*) (0..1) pada arah i ; αi adalah sudut antara arah sebelumnya dan arah dari sel pusat ke sel i ; dan $w_{0,45,90,135}$ adalah bobot untuk perubahan arah.

Hasil algoritma *Holmgren (1994) modified* dan algoritma inersia adalah probabilitas proporsi aliran akhir (*total flow proportion, fi*) (Horton et al., 2013) dengan persamaan (3);

$$f_i = \frac{f_{si} \cdot f_{pi}}{\sum_{j=1}^8 f_{sj} \cdot f_{pj}} \cdot f_o$$

Dimana: i, j adalah *flow direction* (1..8); f_i adalah proporsi aliran total (0..1) pada arah i ; *fsi* adalah proporsi aliran (*flow proportion*) dari algoritma terkait kemiringan lereng; *fpi* adalah proporsi aliran (*flow proportion*) dari inersia (*persistence*); dan f_o adalah proporsi aliran sel pusat yang telah ditentukan sebelumnya.

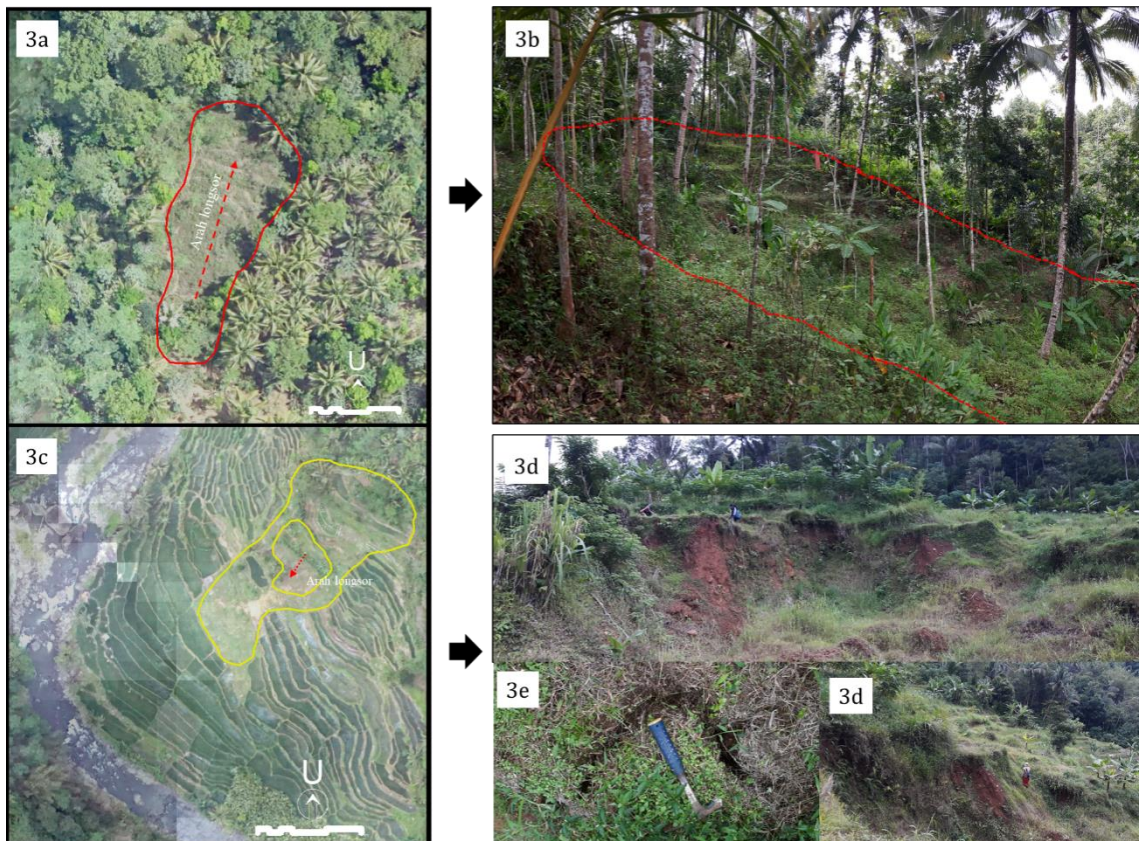
Pemodelan *FlowR* dilakukan pada perangkat lunak *FlowR 0.9.8* (<https://www.flow-r.org/>). Algoritma penyebaran aliran (*direction algorithm*) yang digunakan adalah *Holmgren (1994) modified* dengan nilai faktor $dh=00.5$ m eksponen 4. Nilai eksponen 4 dipilih pada pemodelan *FlowR* di lereng Waduk Bener berdasarkan penelitian oleh Claessens dkk., (2005), Horton dkk., (2008), Horton dkk., (2013) dan Miura (2019) karena terdapat korelasi yang baik antara hasil pemodelan dengan pengamatan di lapangan. Algoritma inersia yang digunakan berdasarkan bawaan perangkat lunak (*default weight*). Perhitungan energi kinetik berdasarkan sudut jangkauan (*travel angle=5* derajat) dengan kecepatan maksimum (*velocity=15* m/s).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Inventarisasi Area Longsor

Inventarisasi longsor pada lereng-lereng Waduk Bener dilakukan guna mengetahui jumlah area longsor dengan informasi mengenai tipologi dan tingkat aktivitas longsor. Tipologi longsor diidentifikasi berdasarkan kenampakan morfologi pada DEMNAS serta vegetasi dan drainase pada foto udara. Tipologi longsor menjadi salah satu hal penting dalam inventarisasi longsor karena menjadi kunci dalam mengenali jenis longsor berdasarkan pergerakannya (Murillo-García dkk., 2015). Berdasarkan hasil inventarisasi longsor di lereng-lereng Waduk Bener terdapat 72 longsor dengan dominasi tipologi *rotational slide* (53 longsor) dan tipe *translational slide* (19 longsor). Longsor terbesar memiliki luas 34.778 m² dan longsor terkecil seluas 299,3 m².

Rotational slide memiliki morfologi berbentuk melengkung ke atas, cekung pada badan longsor, dan berbentuk seperti sendok (Gambar 3a dan 3b). Bentuk longsor yang cekung merupakan ciri dari tipe ini dengan gerakan longsor berputar terhadap kontur lereng. *Rotational slide* pada lereng-lereng Waduk Bener dominan terjadi pada ketinggian 330-440 meter dan kemiringan lereng 21%-55% dengan kelas lereng berbukit-pegunungan (Ningrum, 2021). Kondisi vegetasi tipologi *rotational slide* memiliki kerapatan sedang hingga lebat dengan pemanfaatan penggunaan lahan sebagai semak, kebun campuran, dan sawah. Kejadian longsor tipe ini dipengaruhi pula oleh drainase dengan arah luncuran longsor menuju sungai serta terdapat aliran air pada sejumlah badan longsor.



Gambar 3. a) *Rotational Slide* pada Foto Udara, b) *Rotational Slide* di Lapangan, c) *Translational Slide* pada Foto Udara, d) *Translational Slide* di Lapangan, dan e) Rekahan (*crack*) pada Longsor *Translational Slide*

Translational slide memiliki morfologi bergelombang landai, keadaan morfologi berbeda dengan sekeliling, dan badan longsor cekung dangkal (Gambar 3c dan 3d). Tipologi ini bergerak menuruni lereng sepanjang permukaan relief datar (planar) dengan sedikit gerakan berputar (Highland, 2008; Murillo-García dkk., 2015). *Translational slide* pada lereng-lereng Waduk Bener dominan terjadi pada ketinggian 240-440 meter dan kemiringan 14%-55% dengan kelas lereng bergelombang-berbukit-pegunungan (Ningrum, 2021). Kondisi vegetasi dengan kerapatan ringan hingga lebat dan arah luncuran menuju pada sungai. Aliran air pada badan longsor dapat memicu longsor baru. Peningkatan kecepatan pada *translational slide* dapat berkembang menjadi *debris flow*.

Sementara itu, tingkat aktivitas longsor di lereng-lereng Waduk Bener terdiri dari 1 longsor aktif, 3 longsor reaktif, dan longsor tidak aktif (5 longsor *dormant*, 61 longsor *abandoned*, serta 2 longsor *relict*). Tingkat aktivitas longsor menggambarkan kondisi umur longsor dan kondisi lereng pada longsor (WP/WLI, 1990). Longsor *dormant* dan longsor *abandoned* walau merupakan longsor tidak aktif tetapi masih terdapat tanda kelongsoran yang dapat memicu terjadi longsor di masa mendatang. Perkembangan lebih lanjut dari longsor *dormant* dan longsor *abandoned* adalah longsor *relict* (Griffiths & Whitworth, 2013). Longsor *relict* merupakan longsor yang sudah stabil dengan tutupan lahan vegetasi teratur dan kerapan sedang-lebat. Longsor *abandoned*

dan *relict* memiliki warna hijau/hijau kecoklatan dengan rona gelap apabila diidentifikasi berdasarkan kenampakan DEM (Ningrum, 2021).

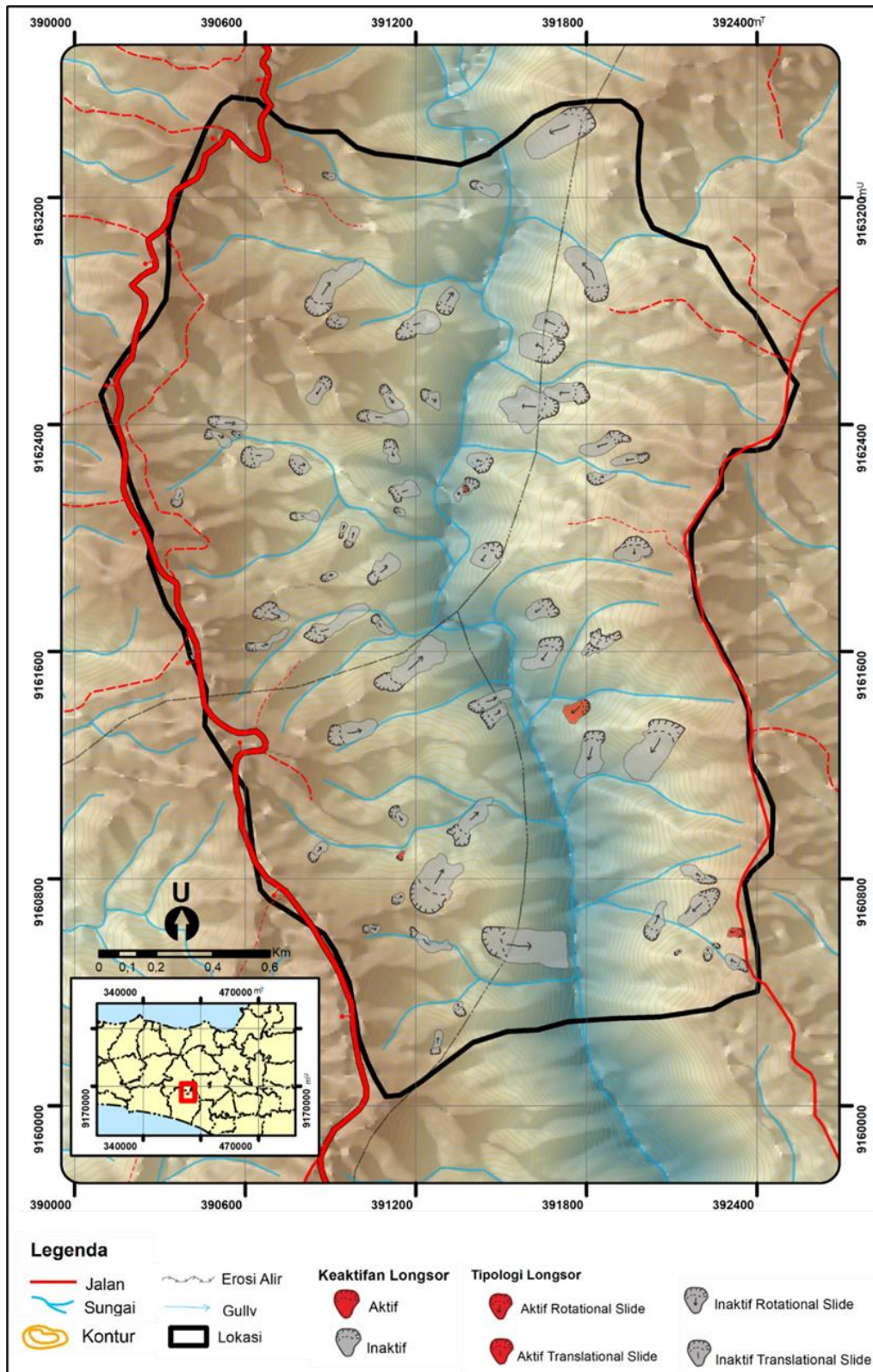
Material luncuran berupa material debris yaitu campuran puing-puing pasir dan batu hasil pelapukan batuan breksi monomik. Pelapukan pada lereng-lereng Waduk Bener menjadi salah satu faktor internal yang mengakibatkan longsor (Gambar 2). Keberadaan rekahan (*crack*) pada longsor (Gambar 3e) menjadi tanda tingkat aktivitas longsor (longsor aktif). Retakan (*crack*) pada lereng menjadi tanpa bahwa lereng mengalami deformasi gravitasi dan rentan terhadap kegagalan massa lereng di masa depan (Fan dkk., 2017).

Distribusi spasial longsor (Gambar 4) tidak aktif *rotational slide* berada di lereng tengah, sedangkan longsor aktif *translational slide* berada di lereng tengah hingga lembah. Distribusi spasial longsor aktif *rotational slide* dan *translational slide* mengikuti pola aliran sungai. Sementara distribusi spasial longsor tidak aktif mengikuti pola igir. Sebaran spasial longsor tidak aktif *rotational slide* dan *translational slide* ditemukan di lereng atas hingga lembah. Kejadian longsor aktif terjadi pada lereng yang curam hingga terjal. Kondisi longsor di lereng Waduk Bener yang berada pada kelas lereng berbukit hingga pegunungan terjal dapat berpotensi kembali terjadi longsor saat pengisian pengurangan Bendungan Bener, karena letaknya yang berada pada daerah genangan waduk.

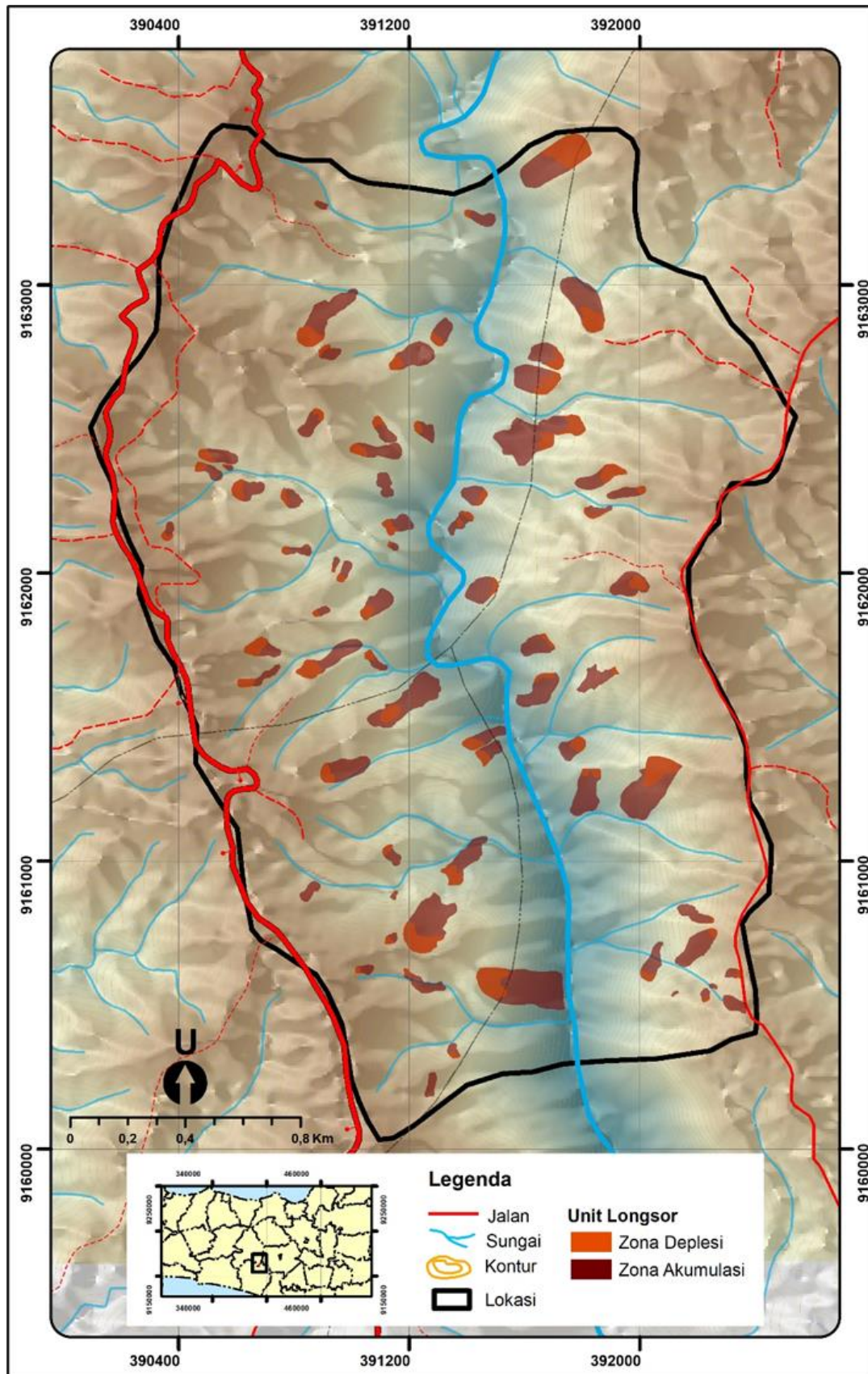
3.2. Identifikasi Sumber Longsor

Hasil inventarisasi yang telah dilakukan dapat diidentifikasi menjadi unit longsor yaitu zona deplesi dan zona akumulasi (Gambar 4). Zona deplesi merupakan zona pergerakan material longsor mahkota longsor dan badan longsor yang mencakup kepala longsor, gawir mayor (utama), serta gawir minor (Griffiths & Whitworth, 2013). Identifikasi zona

deplesi dilakukan dengan interpretasi foto udara dengan kunci interpretasi vegetasi dan asosiasi terhadap sungai. Berdasarkan hasil interpretasi, zona deplesi terdapat bidang gawir mayor (utama) dan gawir minor pada badan longsor. Pola vegetasi pada zona deplesi tersebar tidak teratur dikarenakan pemanfaatan lahan kebun campuran.



Gambar 3. Peta Inventarisasi Longsor di Lereng Waduk Bener



Gambar 4. Peta Sebaran Unit Longsor di Lereng Waduk Bener

Sementara itu, zona akumulasi merupakan zona terakumulasinya material longsor yang berada di kaki longsor (Griffiths & Whitworth, 2013). Zona akumulasi longsor di lereng Waduk Bener mengarah

pada sungai dengan pola vegetasi lebih teratur. Proses transportasi dan deposisi dipengaruhi oleh litologi dan inisiasi longsor dipengaruhi oleh kemiringan lereng (Strauch dkk., 2019). Pada zona akumulasi

banyak ditemukan *gully* yang berasosiasi dengan sungai. Proses pergerakan massa di lereng Waduk Bener juga dipengaruhi oleh erosi alur dan *gully* (Ningrum, 2021). Identifikasi sumber longsor di lereng-lereng Waduk Bener berdasarkan geomorfologi longsor hanya fokus pada pembagian unit longsor tanpa diketahui besaran volume setiap unit longsor. Unit longsor yang telah diidentifikasi merupakan satu kesatuan area longsor. Area longsor ini yang digunakan sebagai masukan dalam pemodelan kerawanan longsor.

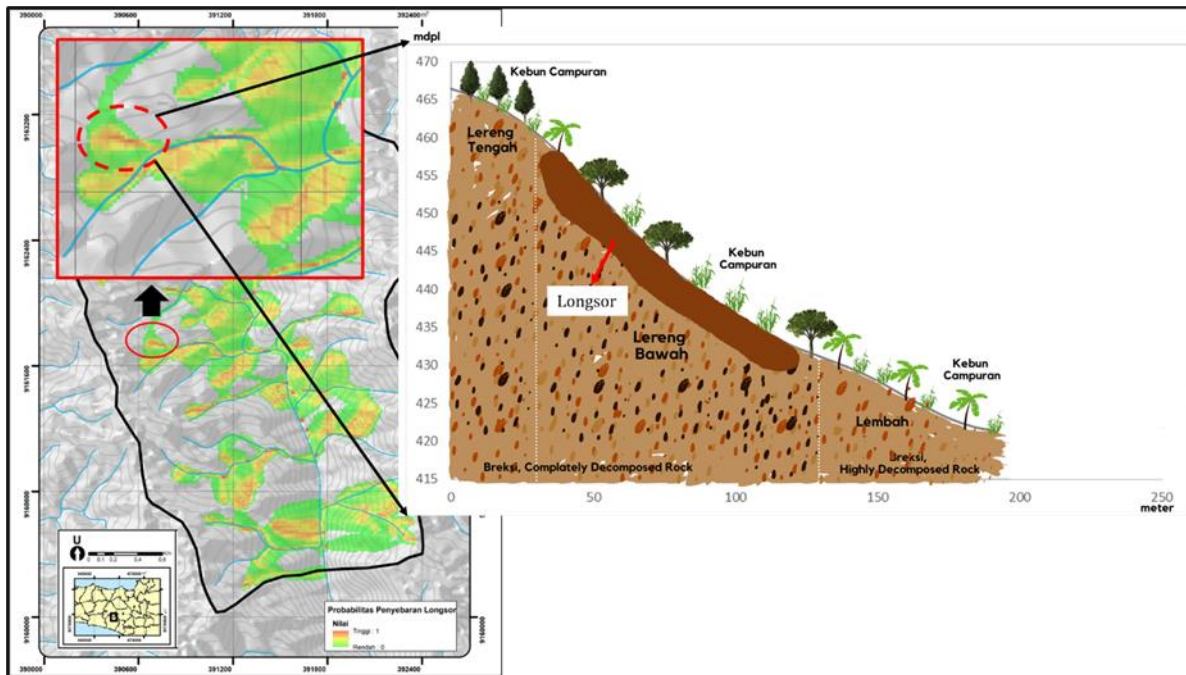
Penilaian kerawanan longsor dapat menggambarkan probabilitas kejadian longsor dimasa mendatang berdasarkan hasil inventarisasi yang telah dilakukan. Data area longsor hasil inventarisasi menjadi data masukan dalam model sebagai sumber iniasi longsor (*predefined source*) yang telah ditentukan untuk mengestimasi jarak luncur longsor (*runout*). Kriteria dan parameter yang ditentukan mempengaruhi hasil probabilitas aliran longsor. Resolusi dan akurasi DEM merupakan elemen penting dalam pemodelan *FlowR* dan akan mempengaruhi kualitas dari hasil model (Horton dkk., 2011). Resolusi 10 meter merupakan resolusi yang direkomendasikan karena memiliki relevansi pada variabilitas bentuk topografi (Fischer dkk., 2012; Horton dkk., 2013).

3.3. Kerawanan Longsor

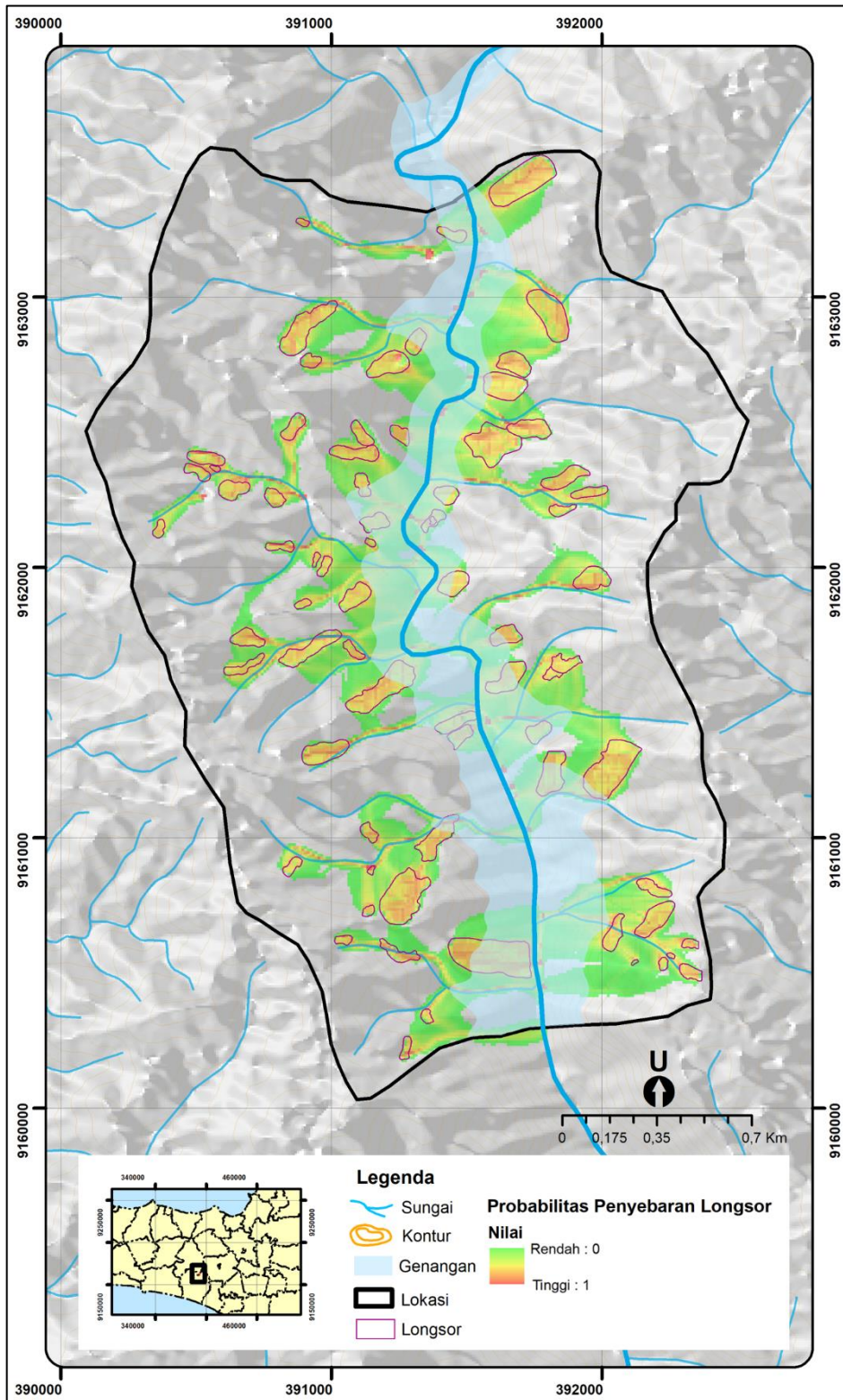
Hasil pemodelan *FlowR* (Gambar 6) menunjukkan sebaran probabilitas jarak luncur longsor di lereng-lereng Waduk Bener. Hasil probabilitas luncuran longsor menunjukkan rentang nilai 0 hingga 1. Permukaan dengan warna merah (nilai 1) memiliki kemungkinan lebih tinggi untuk dijangkau aliran longsor daripada permukaan warna hijau (nilai 0) (Gambar 6). Nilai 0 menjadi batas bawah probabilitas penyebaran longsor sehingga memiliki tingkat kerawanan rendah. Sementara itu, pada rentang nilai 0,1-0,9 dapat diidentifikasi dengan tingkat kerawanan sedang. Nilai probabilitas 1 menandakan bahwa area tersebut memiliki tingkat kerawanan tinggi dan menunjukkan besarnya kemungkinan terjadinya longsor di masa depan (Petley dkk., 2005).

Semua area sumber longsor pada lereng Waduk Bener memiliki nilai probabilitas 0,1-1 yang menandakan tingkat kerawanan sedang-tinggi. Probabilitas jarak luncuran longsor terjadi mulai dari sumber longsor, mengikuti kondisi topografi, masuk pada aliran anak sungai, dan berakhir pada topografi yang lebih rendah dengan tingkat kerawanan rendah.

Secara umum tingkat kerawanan longsor sedang-tinggi terjadi pada morfologi lereng bawah dan tengah. Sementara tingkat kerawanan longsor rendah di lereng bawah dan lembah.



Gambar 5. Profil Melintang Longsor di Lereng Waduk Bener



Gambar 6. Peta Probabilitas Aliran Longsor di Lereng Waduk Bener

Salah satu profil melintang longsor di lereng Waduk Bener (Gambar 5) menunjukkan kerawanan tinggi-sedang pada sumber longsor diperkuat oleh kondisi di lapangan dengan masifnya proses erosi alur, *gully*, dan kondisi geologi. Keberadaan *gully* dan erosi alur dapat menjadi inisiasi longsor (Ningrum, 2021). Kondisi geologi pada sumber longsor dengan pelapukan batuan V (*completely decomposed rock*) rawan terjadi erosi dan longsor. Aliran longsor yang

terjadi berdasarkan hasil pemodelan bermuara pada zona akumulasi dan berakhir masuk sungai.

Hasil probabilitas aliran longsor dipengaruhi oleh kriteria dan parameter yang telah ditentukan. Kriteria dan parameter yang mempengaruhi algoritma penyebaran adalah resolusi DEM, algoritma arah aliran, dan *inertial algorithm*. Resolusi dan akurasi DEM merupakan elemen penting dalam pemodelan *FlowR* dan akan mempengaruhi kualitas dari *output*

model (Horton dkk., 2011). Horton dkk., (2013) melakukan simulasi penyebaran aliran *debris flow* di Solalex, Switzerland dengan perbandingan resolusi DEM 2m, 5m, 10m, 25m, dan 50m dengan parameter algoritma *Holmgren (1994) Modified*.

Hasil penyebaran aliran longsor dengan *FlowR* pada resolusi DEM yang berbeda, menghasilkan hasil penyebaran lebih konstan pada DEM dengan resolusi 2m, 5m, dan 10m (Horton dkk., 2013). Resolusi DEM 10m merupakan resolusi yang direkomendasikan karena memiliki relevansi pada variabilitas bentuk topografi (Fischer dkk., 2012; Horton dkk., 2013). Sehingga pada pemodelan probabilitas jarak luncur longsor di lereng Waduk Bener menggunakan DEM (DEMNAS) dengan resolusi 10m. Resolusi DEM 2m dan 5m menghasilkan probabilitas jarak luncur dengan pola lurus kecil dan hasil penyebaran yang *underestimate*.

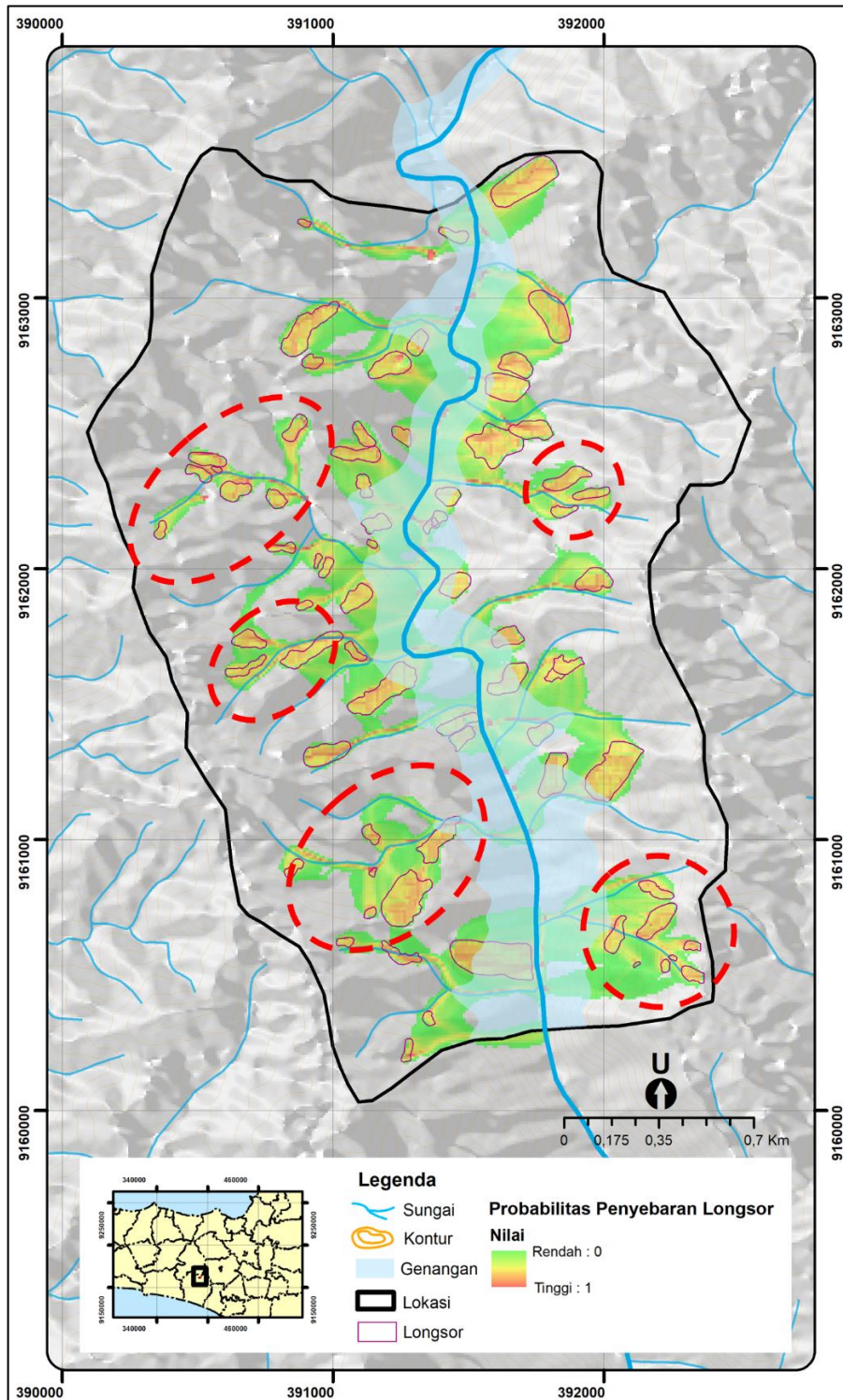
Pemodelan probabilitas jarak luncur longsor dengan resolusi DEM yang lebih kecil, yaitu resolusi 25m memiliki kualitas yang rendah tetapi masih dapat digunakan sebagai *input* pemodelan. Sementara itu, DEM dengan resolusi 50m sebaiknya tidak digunakan karena memiliki hasil terlalu kasar (Horton dkk., 2013). Pemodelan dengan resolusi yang kasar dapat memperbesar luasan hasil penyebaran aliran longsor. Hasil penyebaran aliran dipengaruhi pula oleh algoritma arah aliran. Algoritma arah aliran yang digunakan adalah *Holmgren (1994) Modified* dengan nilai eksponen 4. Variasi nilai eksponen yang semakin besar (eksponen 6, 8, dan 10) akan menghasilkan penyebaran aliran yang semakin konvergen. Nilai eksponen yang umumnya digunakan dalam pemodelan *FlowR* adalah eksponen 4 dan 6 (Horton dkk., 2013). Apabila menggunakan nilai eksponen selain 4 hasil penyebaran aliran longsor tidak berkorelasi antara hasil pemodelan dengan pengamatan di lapangan (Claessens dkk., 2005; Horton dkk., 2008; Horton dkk., 2013; Miura, 2019).

Sementara itu, *inertial algorithm* berpengaruh pada arah penyebaran longsor. Pemodelan *FlowR* di lereng Waduk Bener menggunakan kriteria *inertial algorithm default* yang menghasilkan hasil penyebaran aliran longsor *overestimate* (Gambar 6). Hasil penyebaran aliran longsor yang merupakan probabilitas jarak luncur dimasa mendatang, tepat jika menggunakan hasil penyebaran yang *overestimate*. Hasil probabilitas jarak luncur longsor yang lebih besar dibandingkan kejadian aliran longsor yang sebenarnya dapat dianggap akurat untuk tujuan pemetaan kerentanan longsor (Horton dkk., 2011). Miura (2019) melakukan perbandingan *inertial algorithm default* dengan *inertial algorithm gamma*,

secara signifikan hasil penyebaran aliran longsor dengan *inertial algorithm gamma* yang hasilnya meng-*underestimate* penyebaran aliran longsor. Akan tetapi, karena pemodelan *FlowR* mengandalkan data input dasar, hasil model hanya memberikan prediksi awal mengenai area yang rentan terhadap material tanpa memperkirakan kecepatan atau ketebalan material (Huy Duong dkk., 2023; Quan Luna dkk., 2016).

Penerapan pemodelan *FlowR* pada lereng Waduk Bener merupakan model pertama yang diterapkan dengan data masukan yang minimal. Walaupun demikian, pemodelan *FlowR* menghasilkan hasil akurasi yang tinggi pada skala regional dengan data masukan yang lebih sedikit dibandingkan pemodelan probabilitas jarak luncur longsor lainnya (Xu dkk., 2022). Do dkk., (2020) menyebut area aliran longsor yang dihasilkan dari pemodelan *FlowR* secara umum lebih besar dibandingkan dengan longsor yang diamati di lapangan. Hal tersebut sesuai dengan tujuan dari prediksi kejadian terburuk atau yang mungkin terjadi pada kejadian longsor. Penelitian mengenai pemodelan *FlowR* di Indonesia masih jarang dilakukan. Penelitian terdahulu pernah dilakukan oleh Putra dkk., (2022) mengenai pemodelan hasil probabilitas jarak luncur longsor pada kasus longsor aliran bahan rombakan atau *debris flow* di Sigi Sulawesi Selatan, menemukan hasil kesesuaian yang baik antara hasil prediksi dan aliran longsor di lapangan serta model yang masuk akal. Sejalan dengan Huy Duong dkk., (2023), penerapan model *FlowR* pada area longsor menunjukkan arah dan panjang aliran longsor memiliki kemiripan dengan observasi lapangan.

Penyebaran aliran longsor di lereng Waduk Bener sisi barat lebih rawan dibandingkan sisi timur Hal ini dikarenakan lereng sisi barat Waduk Bener terdapat lebih banyak longsor sebanyak 44 longsor dan akan lebih banyak mensuplai material longsor apabila terjadi longsor (Gambar 6). Sementara itu, di lereng sisi timur terdapat 28 area longsor. Aliran longsor yang terjadi dapat masuk ke dalam genangan Waduk Bener dan menyebabkan sedimentasi (Ningrum, 2021). Sejalan dengan penelitian Sabila dkk., (2020) yang menyebutkan prediksi erosi permukaan lahan yang masuk ke Bendungan Bener berkisar 1,3% sampai 70,7%. Dimana tanah yang terangkut erosi dapat masuk ke sungai utama Sungai Bogowonto melalui anak-anak sungai yang dapat menyebabkan sedimentasi. Area-area yang memiliki banyak percabangan anak sungai dan suplai material menjadi area prioritas konservasi tanah terhadap bencana longsor (Gambar 7).



Gambar 7. Peta Probabilitas Penyebaran Aliran Longsor dengan Area Prioritas

Area prioritas konservasi di lereng-lereng Waduk Bener terdapat lima area (Gambar 7). Tiga area di sisi barat yang terletak di lereng tengah-lereng bawah serta dua area di sisi timur yang terletak di lereng atas dan tengah. Area prioritas konservasi di lereng-lereng Waduk Bener terdapat pada tingkat kerawanan longsor tinggi-sedang. Tingkat kerawanan longsor tinggi-sedang merupakan area sumber longsor mencakup zona deplesi dan zona akumulasi. Area prioritas ditentukan berdasarkan jumlah sumber longsor, tingkat kerawanan, dan banyaknya

percabangan anak sungai. Sejalan dengan penelitian yang dilakukan Sasangka dkk., (2021), lokasi genangan Bendungan Bener yang berada di sebelah timur dan barat lokasi bendungan inti dengan elevasi yang lebih tinggi memiliki kerentanan lereng sedang. Sementara itu, disebelah utara bendungan inti dengan elevasi lebih rendah memiliki kerentanan rendah sehingga jika terjadi penurunan muka air bendungan (*rapid drawdown*) kemungkinan kecil akan mempengaruhi kestabilan lereng di sekitar genangan (Sasangka dkk., 2021).

Area prioritas perlu dilakukan konservasi guna meminimalisir kejadian longsor di masa mendatang akibat percepatan laju erosi. Hasil probabilitas jarak luncur pada lereng-lereng Waduk Bener dapat digunakan pula untuk mengkalibrasi proses dengan laju erosi pada pemodelan numerik lainnya. Area prioritas konservasi yang terletak pada morfologi lereng atas dapat dilakukan konservasi dengan menggunakan tanaman akar kuat dan daun tebal. Hal ini dilakukan guna meminimalisir dampak pelepasan dan transportasi tanah yang disebabkan oleh proses erosi. Tanaman yang direkomendasikan adalah pohon berkayu tinggi dengan sela-sela ditanami tanaman kopi dan herba (Purwaningsih dkk., 2020). Sementara itu, pada morfologi lereng tengah dapat dilakukan konservasi vegetatif dengan tanaman yang dapat meminimalkan dampak dari proses transformasi dan translokasi.

Area longsor dengan tingkat kerawanan tinggi-sedang serta dari hasil identifikasi termasuk dalam longsor aktif dan terletak di lereng bawah atau lembah dapat menjadi prioritas selanjutnya. Hal ini dikarenakan longsor aktif yang terletak di lereng bawah atau lembah akan lebih mudah mensuplai material pada Sungai Bogowonto. Konservasi pada morfologi lereng bawah dan lembah secara vegetatif dapat dilakukan dengan menanam rerumputan. Konservasi longsor secara vegetatif berdasarkan satuan morfologi dan unit longsor dengan penataan tanaman disebut sebagai sistem agroforestri. Teknik vegetatif pada area longsor dianggap sebagai teknik yang efektif untuk mengendalikan proses erosi, sehingga reaktivasi longsor dapat dikelola dan diminimalisir (Purwaningsih dkk., 2020).

Area yang memiliki maksimal *runout* dan bermuara di Sungai Bogowonto, terletak pada morfologi lembah dapat dilakukan konservasi secara mekanik. Material longsor yang masuk ke anak-anak sungai dan Sungai Bogowonto dapat mengakibatkan sedimentasi. Sedimentasi pada Waduk Bener dapat diminimalisir dengan membuat *checkdam*. Pembuatan bangunan rekayasa *checkdam* dapat dibangun di anak-anak sungai untuk menangkap aliran longsor secara langsung, menahan sedimentasi, dan kontrol sedimen (Cuomo, 2020; Sssa & Canuti, 2009). Prediksi jarak luncur dapat mengurangi kerugian dimasa mendatang karena dapat menentukan area kerentanan, memperkirakan intensitas bahaya, dan menyusun strategi mitigasi yang tepat.

4. KESIMPULAN

Inventarisasi longsor di lereng-lereng Waduk Bener terdapat 72 longsor dengan aktivitas longor aktif dan tidak aktif serta tipologi *rotational slide* dan *translational slide*. Sumber longsor meliputi zona deplesi dan akumulasi yang menjadi sumber inisiasi longsor (*predefined source*) pada masukan pemodelan *FlowR*. Pemodelan probabilitas jarak luncur berdasarkan *FlowR* dengan algoritma *Holmgren modified* tersebar pada lereng timur dan barat dengan

tingkat kerawanan longsor tinggi-sedang pada morfologi lerengatas, tengah, bawah, dan lembah serta tingkat kerawanan longsor rendah pada lereng bawah dan lembah. Area prioritas konservasi berada pada area dengan tingkat kerawanan tinggi-sedang dan area longsor dengan banyak percabangan anak sungai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Hibah Penelitian Dosen Fakultas Geografi 2023. Peneliti mengucapkan terima kasih kepada tim surveyor yang telah membantu dalam pengumpulan data dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Biondino, D., Borrelli, L., Critelli, S., Muto, F., Apollaro, C., Coniglio, S., Tripodi, V., & Perri, F. (2020). A multidisciplinary approach to investigate weathering processes affecting gneissic rocks (Calabria, southern Italy). *Catena*, 187(November 2019), 104372. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104372>
- Claessens, L., Heuvelink, G., Schoorl, J. M., & Veldkamp, A. (2005). DEM resolution effects on shallow landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(October 2018), 461-477. <https://doi.org/10.1002/esp.1155>
- Cuomo, S. (2020). Modelling of flowslides and debris avalanches in natural and engineered slopes: a review. *Geoenvironmental Disasters*, 7(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0133-9>
- Do, H. M., Yin, K. L., & Guo, Z. Z. (2020). A comparative study on the integrative ability of the analytical hierarchy process, weights of evidence and logistic regression methods with the Flow-R model for landslide susceptibility assessment. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 2449-2485. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1846086>
- Fan, X., Xu, Q., Scaringi, G., Dai, L., Li, W., Dong, X., Zhu, X., Pei, X., Dai, K., & Havenith, H. B. (2017). Failure mechanism and kinematics of the deadly June 24th 2017 Xinmo landslide, Maoxian, Sichuan, China. *Landslides*, 14(6), 2129-2146. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0907-7>
- Fischer, L., Sletten, K., Rubensdotter, L., & Stalsberg, K. (2012). Debris Flow Modeling for Susceptibility Mapping at Regional to National Scale in Norway. *Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding - Eberhardt*, 723-729.
- Ghirotti, M. (2013). The 1963 Vaiont landslide, Italy. *Landslides*, January 2005, 359-372. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511740367.030>
- Highland, L. M. (2008). Introduction The Landslide Handbook-A Guide to Understanding Landslides. Dalam *U.S. Geological Survey (USGS) National Landslide Information Center (NLIC)*. United States Geological Survey.
- Horton, P., Bardou, E., & Jaboyedoff, M. B.-A. (2008). Debris flow hazard assessment at a regional scale. *Geophysical Research Abstracts*, 10(January), EGU2008-08400.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Zimmermann, M., Mazotti, B., & Longchamp, C. (2011). *FLOW-R, A MODEL FOR DEBRIS FLOW SUSCEPTIBILITY MAPPING AT A*

- REGIONAL SCALE – SOME CASE STUDIES. 875–884. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2011-03.B-095>
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., & Zimmermann, M. (2013). Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(4), 869–885. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-869-2013>
- Huy Duong, N., Thi Huyen, N., Van Son, P., The Viet, T., & Duc Ha, N. (2023). Proposed procedure of survey and model application for forecasting flow landslide susceptibility and hazards – A case study in Tam Chung commune, Thanh Hoa province. *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, 3(16), 23–37. [https://doi.org/10.36335/VNJHM.2023\(16\).23-37](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2023(16).23-37)
- Li, C., Fu, Z., Wang, Y., Tang, H., Yan, J., Gong, W., Yao, W., & Criss, R. E. (2019). Susceptibility of reservoir-induced landslides and strategies for increasing the slope stability in the Three Gorges Reservoir Area: Zigui Basin as an example. *Engineering Geology*, 261(November 2018), 105279. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105279>
- McDougall, S. (2017). 2014 Canadian Geotechnical Colloquium: Landslide runout analysis — current practice and challenges. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(5), 605–620. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0104>
- Miura, H. (2019). Fusion analysis of optical satellite images and digital elevation model for quantifying volume in debris flow disaster. *Remote Sensing*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/rs11091096>
- Muhardi, & Wahyudi. (2019). Jurnal Fisika Identifikasi Litologi Area Rawan Longsor di Desa Clapar-Banjarnegara. *Jurnal Fisika*, 9(2), 52–59.
- Murillo-García, F. G., Alcántara-Ayala, I., Ardizzone, F., Cardinali, M., Fiourucci, F., & Guzzetti, F. (2015). Satellite stereoscopic pair images of very high resolution: a step forward for the development of landslide inventories. *Landslides*, 12(2), 277–291. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0473-1>
- Ningrum, E. R. (2021). *Penilaian Kerawanan Longsor Menggunakan Pemodelan Flow R: Studi Kasus Lereng Waduk Bener, Purworejo Jawa Tengah*. Universitas Gadjah Mada.
- Petley, D. N., Dunning, S. A., & Rosser, N. J. (2005). A Framework for Landslide Risk Assessment and Management. *Landslide Risk Management*, 299–320.
- Pratama, I. wahyu, Hanif, I. M., Hidayatullah, & Pramumijoyo, S. (2017). Studi Petrogenesa Batuan Beku Di Daerah Semono Dan Sekitarnya, Kecamatan Kaligesing Dan Bagelen, Kabupaten Purworejo, Provinsi Jawa Tengah Dengan Metode Sayatan Tipis. *Seminar Nasional Kebumian Ke-10 Peran Penelitian Ilmu Kebumian Dalam Pembangunan Infrastruktur Di Indonesia, September*.
- Purwaningsih, R., Sartohadi, J., & Anggri, M. (2020). Trees and crops arrangement in the agroforestry system based on slope units to control landslide reactivation on volcanic foot slopes in Java, Indonesia. *Land*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/LAND9090327>
- Putra, M. H. Z., Dinata, I. A., Sadisun, I. A., Sarah, D., Aulia, A. N., & Sukristiyanti, S. (2022). Modeling of individual debris flows based on DEMNAS using Flow-R: A case study in Sigi, Central Sulawesi. *RISSET Geologi dan Pertambangan*, 32(1), 37. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2022.v32.12>
- 15
- Quan, B. R. (2012). Dynamic numerical run out modeling for quantitative landslide risk assessment. Dalam *Thesis of University of Twente, ITC*. ITC.
- Quan Luna, B., Blahut, J., van Asch, T., van Westen, C., & Kappes, M. (2016). ASCHFLOW - A dynamic landslide run-out model for medium scale hazard analysis. *Geoenvironmental Disasters*, 3(1), 29. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0064-7>
- Sabila, N. A., Yulistiyanto, B., & Legono, D. (2020). Kajian Sedimen Delivery Ratio Bendungan Bener Kabupaten Purworejo. *Prosiding Webinar Nasional Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta*, 177–184.
- Sasangka, D. J., Insani, D., & Indrawan, I. G. B. (2020). Engineering Gology Model of Bener Dam Diversion Tunnels in Geological Risk Disaster Mitigation. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 6(3), 205–215. <https://doi.org/10.23960/jge.v6i3.95>
- Sasangka, D. J., Suhardi, S., Riyanto, D. P., Insani, D., & Dwi, C. (2021). ANALISIS KERENTANAN LERENG LOKASI PEMBANGUNAN BENDUNGAN BENER KABUPATEN PURWOREJO. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 7(3), 238–255. <https://doi.org/10.23960/jge.v7i3.158>
- Soeters, R., & Westen, V. A. N. (1984). Slope instability recognition, analysis and zonation. *Landslides, investigation and mitigation, Transportation Research Board, National Research Council*, 129–177.
- Sssa, K., & Canuti, P. (2009). Landslide Disaster Risk Reduction. *Springer*, 53(9). <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Strauch, R., Istanbuluoglu, E., & Riedel, J. (2019). A New Approach To Mapping Landslide Hazards: A Probabilistic Integration Of Empirical And Physically Based Models In The North Cascades Of Washington, USA. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(11), 2477–2495. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2477-2019>
- Tang, M., Xu, Q., Yang, H., Li, S., Iqbal, J., Fu, X., Huang, X., & Cheng, W. (2019). Activity law and hydraulics mechanism of landslides with different sliding surface and permeability in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Engineering Geology*, 260(June). <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105212>
- Wahyunto, & Dariah, A. (2014). Degradasi Lahan di Indonesia: Kondisi Existing, Karakteristik, dan Penyeragaman Definisi Mendukung Gerakan Menuju Satu Peta. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 8(2), 81–93. <https://doi.org/10.2018/jsdl.v8i2.6470>
- Widiastutik, R., & Buchori, I. (2018). PURWOREJO LANDSLIDE DISASTER RISK ANALYSIS IN LOANO DISTRICT, PURWOREJO. *Jurnal Pembangunan*, 14(2), 109–122.
- WP/WLI. (1990). A suggested method for reporting a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 41(1), 5–12. <https://doi.org/10.1007/BF02590201>
- Xu, H., Su, P., Chen, Q., Liu, F., Zhou, Q., & Liu, L. (2022). Susceptibility areas identification and risk assessment of debris flow using the Flow-R model: a case study of Basu County of Tibet. *Geoenvironmental Disasters*, 9(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s40677-022-00216-3>