

Analisis Keruntuhan Lereng dengan Metode Structure from Motion (SfM) pada Lereng Tambang Batugamping di Tuban, Jawa Timur

Slope Failure Analysis using Structure from Motion (SfM) Method on Limestone Quarry

Akbar Susanto¹, Najib¹, Ahmad Syauqi Hidayatillah¹, Hendi Novianto², Farida Aryati², dan
Valentinus Alan Wibisono Palumpun²

¹Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

¹Jln. Prof. Soedarto, SH Kampus Undip Tembang, Semarang, Jawa Tengah 50275, Indonesia

²PT. Solusi Bangun Indonesia Tbk., Tuban, Tuban, Jawa Timur

Jln. Glondonggede, Tambakboyo, Tuban, Jawa Timur 62352, Indonesia

e-mail: najib@ft.undip.ac.id

Naskah diterima 26 Juni 2023, selesai direvisi 1 Agustus 2023, dan disetujui 25 Agustus 2023

ABSTRAK

Identifikasi diskontinuitas pada massa batuan merupakan hal mendasar dalam analisis kestabilan lereng. Identifikasi tersebut diperlukan untuk mengetahui potensi keruntuhan/ longsor pada lereng baik lereng alami maupun buatan manusia. Salah satu cara mengetahui potensi keruntuhan/ longsor pada lereng dapat dilakukan dengan menggunakan analisis kinematika lereng berdasarkan penyelidikan lapangan secara manual seperti scanline. Akan tetapi, penyelidikan tersebut dapat diganti menggunakan metode seperti metode Structure from Motion (SfM). Metode SfM mempunyai kelebihan dalam melakukan penyelidikan secara efektif, menjangkau area yang tinggi dan berbahaya. Dalam metode SfM, bentuk lereng divisualisasikan menjadi model 3D sesuai dengan kondisi aktual sehingga dapat diekstraksi kedudukan diskontinuitas yang dimiliki suatu lereng. Data penyelidikan metode SfM diambil melalui foto udara menggunakan *drone quadcopter* DJI Phantom Pro V.2. Selanjutnya data tersebut diolah menjadi *dense point cloud* melalui Agisoft Metashape Pro agar dapat dilakukan ekstraksi bidang diskontinuitas. Ekstraksi bidang diskontinuitas dilakukan dengan aplikasi CloudCompare dan Discontinuity Sets Extractor (DSE). Penggunaan aplikasi ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana perbandingan hasil analisis kinematika lerengnya. Berdasarkan hasil kinematika dari dua ekstraksi data diskontinuitas yang berbeda, pada kinematika lereng untuk ekstraksi data melalui CloudCompare ditemukan hasil tipe keruntuhan guling dengan signifikansi 28,57 %, dan untuk hasil dari ekstraksi data melalui DSE didapatkan hasil bahwa lereng tidak memiliki kecenderungan untuk terjadinya keruntuhan. Hasil analisis kinematika yang diberikan pada pengolahan data dari hasil ekstraksi diskontinuitas pada aplikasi DSE menunjukkan hasil yang masih meragukan karena memiliki kecenderungan error pada saat dilakukan komputasi secara otomatis. Hal ini berbeda dengan hasil dari ekstraksi data pada aplikasi CloudCompare karena ekstraksi data diskontinuitas dilakukan dengan manual oleh pengamat. Pemanfaatan metode SfM memberikan kemudahan dan keefektifan dalam pengambilan data diskontinuitas untuk analisis data kestabilan lereng.

Kata kunci: Analisis Kinematika, CloudCompare, Discontinuity Sets Extractor (DSE), Drone, Keruntuhan Lereng, SfM

ABSTRACT

Slope stability analysis requires the identification of discontinuities in rock masses. This identification is essential to identify the possibility of potential natural and man-made slope instability/landslides. Slope kinematic analysis based on manual field investigations such as scanlines is one approach to estimating the potential for collapse/landslides on slopes. However, procedures such as the Structure from Motion (SfM) approach could be used in the place of this investigation. The SfM approach provides the advantage of performing investigations efficiently and getting to high-risk areas. The SfM approach visualizes the slope's form into a 3D model by the actual conditions to extract the slope's discontinuity point. The DJI Phantom Pro V.2 quadcopter drone captured aerial images for the SfM technique investigation. Subsequently, Agisoft Metashape Pro transforms the data into a dense point cloud to ensure that discontinuity fields may be retrieved. The CloudCompare and Discontinuity Sets Extractor (DSE) apps were used to extract discontinuity data. This application is used to learn how to compare the outcomes of the slope kinematics analysis. The slope analysis of kinematics for data

extraction through CloudCompare found overturning type results with a significance of 28.57% and for the findings of data extraction through DSE. It was found that the slope does not tend to fail to occur based on the kinematic results of two different discontinuity data extractions. Because they have the propensity for performing errors when computation is performed automatically, the findings of the kinematic analysis applied to data processing from discontinuity extraction results in DSE applications demonstrate results that are still in question. Since the discontinuity of data extraction has to be carried out manually by observers, the results differ from those of data extraction in the CloudCompare program. The SfM approach could obtain discontinuity data for slope stability data analysis.

Keywords: Kinematics Analysis, Drone, CloudCompare, Discontinuity Sets Extractor (DSE), Slope Failure, SfM

PENDAHULUAN

Diskontinuitas (kekar, sesar, perlapisan, retakan dan sejenisnya) yang ada pada suatu massa batuan akan sangat berpengaruh terhadap stabilitas suatu lereng baik lereng alami maupun buatan manusia. Dalam kegiatan penyelidikan potensi longsor pada lereng, diskontinuitas merupakan komponen yang sangat penting yang mempengaruhi lereng batuan (ISRM, 1978). Sifat dasar massa batuan, seperti kohesi, tahanan geser, kuat geser, analisis kinematik dan kemandirian keruntuhan dapat dipengaruhi oleh kondisi struktur geologi (Stead dan Wolter, 2015). Pengukuran diskontinuitas secara langsung pada massa batuan biasanya sulit dilakukan terutama pada lereng curam yang sulit dijangkau, memakan waktu, bias dan seringkali dapat membahayakan keselamatan (Clapuyt drr, 2016; Hererro drr, 2022). Penggunaan Laser Scanning, fotogrametri dan Light Detection and Ranging (LiDAR) lebih objektif dan efisien dalam memperoleh informasi diskontinuitas massa batuan dan menjadi pilihan alternatif dibandingkan dengan metode pemetaan diskontinuitas manual (Li drr, 2019). Hal ini disebabkan metode tersebut mempunyai keunggulan yaitu data diambil tanpa adanya kontak langsung dengan permukaan batuan. Akan tetapi, pada alat seperti Laser Scanning merupakan peralatan yang membutuhkan biaya yang tinggi dibanding dengan peralatan seperti citra digital (Assali drr, 2014). Pengambilan data citra digital tersebut dapat dilakukan dengan *Remotely Piloted Aerial Systems* (RPAS) seperti Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) atau *drone* yang terpasang kamera dengan fitur *Global Positioning System* (GPS) sehingga dapat merekam tiap posisi kamera.

Perkembangan penggunaan metode penginderaan jauh berbasis UAV dalam penelitian

ilmiah saat ini sudah sangat pesat ((Niethammer drr, 2009; Carvajal drr, 2011; Lucieer drr, 2014; Peterman 2015; Turner drr, 2015; Vrublová drr, 2015; Lindner drr, 2016; Tanteri drr, 2017; Mateos drr, 2017; Menegoni drr, 2019; Daghigh drr, 2022). Penggunaan metode ini dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan pekerjaan keteknikan seperti monitoring erosi tanah (d'Oleire-Oltmanns drr, 2012). volume, potensi dan energi jatuhnya batuan (Sarro drr, 2018), penentuan genangan air (Alpekin dan Yakar, 2020), ekstraksi data set diskontinuitas untuk analisis potensi jatuhnya batuan (Yakar drr, 2022), interpretasi diskontinuitas dan identifikasi potensi jatuhnya batuan (Wang drr, 2022), gerakan tanah dangkal (Bolla drr, 2021) hingga monitoring pergeseran gerakan tanah (Mukhlisin drr, 2023) dengan hasil yang cukup baik.

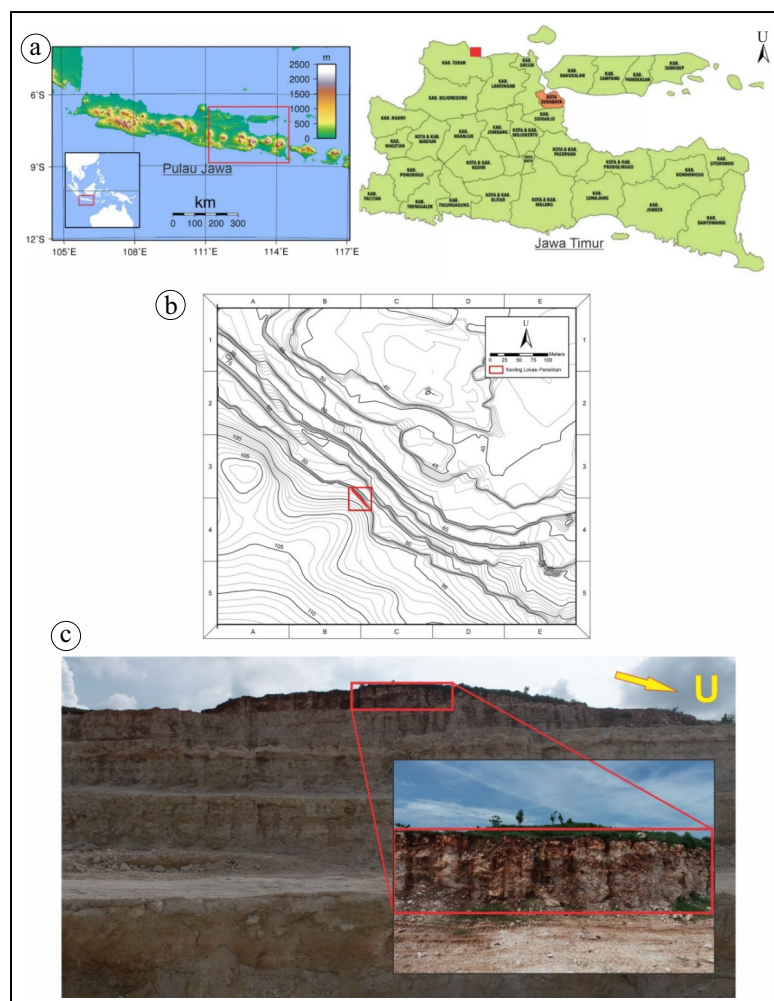
Pengambilan data UAVs dengan metode *Structure from Motion* (SfM) mempunyai tujuan untuk mendapatkan kenampakan model 3D dari objek yang diamati dengan arah dan kedudukan sesuai kondisi aktual (Riquelme, 2017). Metode SfM mampu mengakuisisi data dengan jutaan titik point dari permukaan lereng yang disimpan secara digital. Selain itu, data yang merepresentasikan permukaan lereng tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi kedudukan dari diskontinuitas, orientasi, jarak spasi, persistensi dan kekasaran dari lereng tersebut selama memiliki kualitas *point cloud* mencukupi (Riquelme drr., 2018). Giordan drr.(2015) merekomendasikan wahana *drone quadcopter* untuk survey pada area lereng yang terjal (sudut slope > 40°) dan *drone fixed wing* untuk survei pada area lereng yang sedang (sudut < 40°).

Model 3D pada metode SfM didapatkan dari penampakan beberapa foto udara dengan berb-

Analisis Keruntuhan Lereng dengan Metode Structure from Motion (SfM)
pada Lereng Tambang Batugamping di Tuban, Jawa Timur

agai sudut penangkapan (Michelletti drr, 2015). Metode SfM tersebut dapat membantu penyelidikan, terutama dalam melakukan analisis pada lereng yang curam, sulit dijangkau dan terdapat batuan menggantung serta loosen rocks pada tebing lereng sehingga dapat meminimalisir kecelakaan kerja selama melakukan penyelidikan dan meningkatkan efisiensi kerja (Giordan drr, 2015). Dalam metode SfM ini, tujuan utamanya yaitu untuk dapat mengekstraksi kedudukan data diskontinuitas yang ada pada lereng karena sangat penting untuk mengetahui karakteristik dan deteksi diskontinuitas pada massa batuan yang ada (Garcia-Luna drr, 2019). Data diskontinuitas ini selanjutnya akan digunakan untuk analisis kinematik dalam menentukan potensi tipe longsoran yang ada pada suatu wilayah.

Penyelidikan keruntuhan lereng dengan analisis kinematika pada lereng tambang terbuka di PT. Solusi Bangun Indonesia Tbk., Tuban, Jawa Timur (Gambar 1), dilakukan sebagai bentuk aplikasi metode SfM yang masih jarang diterapkan untuk penyelidikan pada lereng tambang terbuka beserta dinamikanya. Suri drr (2020) melakukan penelitian mengenai ekstraksi diskontinuitas pada lereng batuan menggunakan 3D poin cloud yang diterapkan pada kuari batugamping. Tetapi, penelitian tersebut hanya menggunakan satu alat bantu ekstraksi yaitu Discontinuity Sets Extractor (DSE). Pada penelitian ini dilakukan dengan menerapkan dua aplikasi sebagai alat bantu ekstraksi yang berbeda untuk membandingkan hasil yang didapatkan, yaitu *CloudCompare* dan DSE berbasis Matlab. Dalam aplikasi



Gambar 1. Lokasi penelitian (a) indeks peta Jawa dan Jawa Timur (diambil dari generic mapping tools, sadalmelik), (b) peta lokasi penelitian pada area bukaan tambang dan (c) fokus objek lereng penelitian.

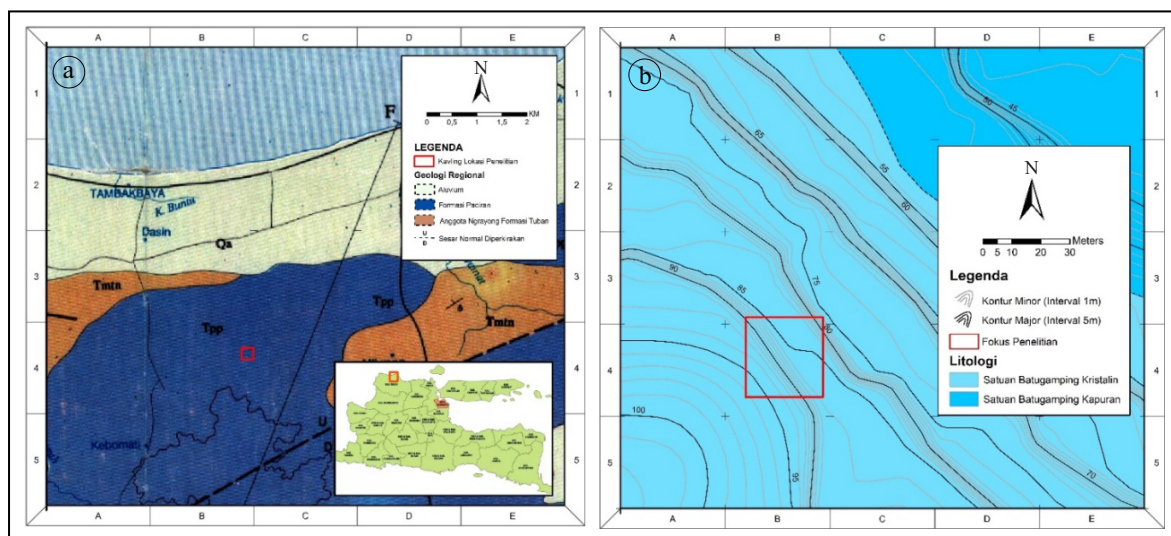
CloudCompare, ekstraksi data diskontinuitas dilakukan dengan semi otomatis menggunakan bantuan delineasi oleh manusia, sedangkan pada aplikasi Discontinuity Sets Extractor (DSE) dilakukan secara otomatis melalui komputasi dengan pendekatan perhitungan kedudukan orientasi diskontinuitas pada kontur bentukan muka model 3D lereng yang berbentuk Dense Point Cloud. Metode ini dapat menampilkan hasil karakterisasi geologi yang dapat dipercaya pada diskontinuitas batuan (Chen dr., 2016; García-Luna dr.,2019).

Analisis kinematika lereng yang dilakukan dalam penelitian ini menghasilkan data terkait masing-masing kedudukan bidang diskontinuitas sebagai bidang gelincir dengan signifikansi tipe keruntuhan yang mungkin terjadi. Selain itu, penelitian ini dapat menunjukkan cara penyelidikan lereng terkait bagaimana penerapan metode SfM dan perbandingan ekstraksi data diskontinuitas dari dua software yang berbeda beserta masing-masing kelebihan dan kekurangannya. Dengan mengetahui perbandingan dua metode ekstraksi *CloudCompare* dan DSE, diharapkan dapat memberi gambaran mengenai penggunaan metode ekstraksi untuk kepentingan analisis keruntuhan lereng / potensi longsor pada massa batuan baik pada lereng alami maupun buatan manusia.

Lokasi penelitian berada di area tambang terbuka milik PT. Solusi Bangun Indonesia Tbk., Tuban, Jawa Timur. Penelitian dilakukan terhadap lereng tambang batugamping yang berada di bukaan tambang pada bench 81 bagian paling atas di lereng tambang dengan sudut lereng lebih dari 800(Gambar 1). Lokasi disusun oleh batugamping dari Formasi Paciran (Gambar 2 a) yang berumur Pliosen-Pleistosen (Pringgoprawiro, 1983). Batugamping pada formasi ini merupakan satuan batugamping yang termuda di Zona Rembang dan memiliki hubungan menjari dengan Formasi Mundu dan Formasi Lidah. Pada Formasi Paciran dapat ditemukan batugamping terumbu yang berwarna putih keabuan, massif, bersifat dolomitan, terdiri dari agregat ganggang, koral dan foraminifera besar. Selain itu, juga dapat ditemukan batugamping kapuran dengan pelapukan yang tersingkap atau dapat disebut *karren surface* (Van Bemmelen, 1949).

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, penelitian dilakukan dengan melakukan pemetaan langsung untuk mendapatkan data kondisi morfologi, litologi, tingkat pelapukan dan deskripsi diskontinuitas secara kualitatif. Pemetaan geologi dilakukan pada dengan luasan sekitar 2,25 Ha dan fokus pen-



Gambar 2. (a) Geologi regional (Situmorang dr., 1992) dan (b) peta geologi daerah penelitian.

gamatan lereng bench 81 dengan tinggi sekitar 7,9 meter panjang 51 meter. Data morfologi digunakan untuk mengetahui jenis morfologi dan pengaruh proses morfologinya terhadap diskontinuitas. Data kondisi geologi digunakan untuk mengetahui sebaran dan jenis, sifat dan pelapukannya. Kondisi diskontinuitas untuk mengetahui gambaran umum diskontinuitas yang ada.

Pengukuran data diskontinuitas dilakukan dengan cara ekstraksi melalui data hasil penangkapan foto udara menggunakan drone, yaitu metode Structure from Motion (SfM) (Lucieer drr, 2014). Prinsip metode ini adalah data foto udara yang bersifat dua dimensi (2D) diolah menjadi model tiga dimensi (3D) yang menampilkan kondisi aktual lapangan beserta fiturnya (koordinat x, y, dan z) dan dinamakan sebagai dense point cloud (Shervais, 2016). Pengambilan data foto udara pada lereng direkomendasikan menggunakan wahana drone quadcopter untuk lereng dengan kemiringan $>40^\circ$ (Giordan drr, 2015). Wahana yang digunakan untuk pemetaan foto udara atau drone mapping yaitu drone quadcopter DJI Phantom Pro V.2. Foto udara yang ditangkap memiliki properti berupa kedudukan lokasi yang terukur oleh Global Positioning Systems (GPS) pada drone. Kedudukan lokasi pada foto tersebut dapat diekstrapolasikan pada tiap-tiap titik dense point cloud sehingga tiap titik memiliki data koordinat berupa x,y dan z menggunakan Agisoft Metashape (Agisoft, 2022). Data kedudukan diskontinuitas dapat diekstraksi melalui bantuan aplikasi *CloudCompare* dan Discontinuity Sets Extractor (DSE) (Riquelme drr., 2014). Hasil dari ekstraksi data diskontinuitas selanjutnya dapat dianalisis secara kinematik menggunakan aplikasi Rockscience Dips (www.rockscience.com).

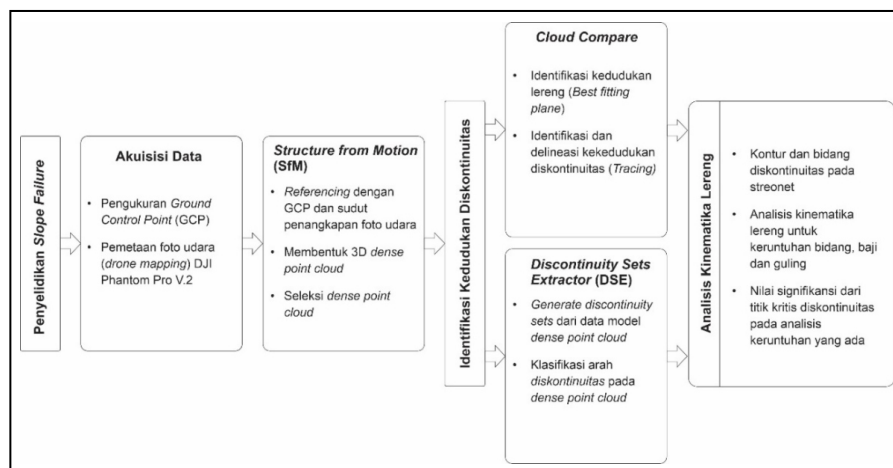
Model 3D Dense Point Cloud merupakan bentuk model tiga dimensi yang dibentuk dari kumpulan titik-titik tinggi yang sangat banyak dan mengandung informasi koordinat x, y, dan z (Agisoft, 2022). Informasi koordinat x, y, dan

z pada masing-masing titik Dense Point Cloud diperoleh dari hasil ekstrapolasi data foto udara yang mengandung informasi lokasi perekaman GPS pada saat pemetaan foto udara dan referensi berupa Ground Control Point (GCP). GCP merupakan titik referensi atau titik ikat pada lapangan dan terukur secara terestris menggunakan alat Trimble RTK GNSS Base & Rover. Titik GCP berguna untuk meminimalisir terjadinya penyimpangan kedudukan yang besar sehingga mendekati kondisi aktual lapangan. Banyaknya data foto udara yang saling bertampalan dengan sudut penangkapan foto yang berbeda dapat menghindari adanya kekosongan data pada model 3D Dense Point Cloud yang dibentuk. Selengkapannya alur penyelidikan kinematika lereng dengan SfM digambarkan pada diagram alir (Gambar 3).

Pada metode SfM, data diskontinuitas dapat diekstrak dengan menggunakan aplikasi seperti *CloudCompare* dan Discontinuity Sets Extractor (DSE) (Lucieer drr, 2014). Ekstraksi data dilakukan pada model 3D berupa DPC untuk dapat diekstraksi kedudukan diskontinuitasnya. Pada ekstraksi data menggunakan aplikasi *CloudCompare*, data Dense Point Cloud diekstraksi kedudukan lereng melalui alat best fitting plane, dan kedudukan diskontinuitas diekstraksi menggunakan bantuan plugins compass dengan delineasi manual dengan bantuan manusia.

Dalam ekstraksi data diskontinuitas pada aplikasi DSE, cukup berbeda dengan *CloudCompare*. Dense Point Cloud secara otomatis diklasifikasikan kedalam beberapa orientasi kedudukan bidang diskontinuitas dengan melihat orientasi pada kontur atau tekstur yang dimiliki muka lereng.

Nilai kedudukan dari tiap bidang diskontinuitas yang telah diekstraksi dari *CloudCompare* dimasukkan kedalam aplikasi Dips untuk dianalisa secara kinematika lerengnya. Tiap data dari masing-masing hasil ekstraksi data diskontinuitas oleh kedua aplikasi yang berbeda (*CloudCompare* dan DSE) dengan menganalisis syarat keruntuhan Hoek & Bray (1981) untuk beberapa



Gambar 3. Diagram alir penyelidikan keruntuhan lereng dengan metode SfM.

jenis keruntuhan. Nilai-nilai yang dimasukkan dalam analisa ini yaitu nilai kedudukan lereng, nilai kedudukan bidang diskontinuitas dan juga nilai sudut geser dalamnya, sehingga dapat dianalisa signifikansi dari jenis kelongsoran yang mungkin terjadi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pengamatan langsung di lapangan, kondisi morfologi didominasi oleh proses geomorfik seperti erosi dan pelapukan, selain itu terdapat morfologi dataran terdenudasi yang telah mengalami penurunan relief, dan pelapukan fisik serta kimia pada permukaan batuan. Berdasarkan hal tersebut, bentuklahan yang menyusun yaitu bentuklahan denudasional. Bentuklahan denudasional pada lokasi penelitian dapat dibagi menjadi dua klasifikasi relief berdasarkan perhitungan morfometri yaitu satuan bentuklahan denudasional bergelombang landai dengan nilai persen lereng 7,43% dan beda tinggi 10 m, dan satuan bentuklahan denudasional berbukit bergelombang dengan nilai persen lereng 15,58 % dan beda tinggi 70 m. Aspek lainnya seperti kegiatan penambangan batugamping juga mempengaruhi proses erosi dan pelapukan yang ada, yaitu dengan tersingkapnya permukaan batugamping setelah dilakukan ekskavasi, maka batuan tersebut akan mudah terpapar agen pelapukan, seperti matahari, hujan dan mekanis. Permukaan lereng

tambang batugamping yang terbuka secara langsung menyebabkan pelapukan lebih intensif dan terjadinya diskontinuitas menjadi lebih intensif akibat aktivitas penambangan seperti peledakan (Ak dan Konuk, 2008), pengeboran dan pengupasan material tambang.

Dari aspek litologi, daerah penelitian tersusun oleh batugamping kristalin di area selatan (gambar 2a) dan batugamping kapuran di area utara (gambar 2b). Objek lereng yang diteliti berada di sebelah selatan bukaan tambang dengan litologi penyusun berupa batugamping kristalin dimana litologi tersebut memiliki sifat yang masif, kompak dan keras. Satuan litologi batugamping kristalin dapat ditemukan pada sebaran elevasi antara 20-115 mdpl dengan ciri litologi pada berwarna putih keabu-abuan hingga kekuningan, banyak fosil, kompak, keras dan memiliki kenampakan berlubang dengan struktur geologi berupa rekahan yang bervariasi. Dilihat dari kenampakannya (Gambar 4a), litologi ini memiliki lubang yang cukup intensif sehingga dapat dikatakan *vuggy*, dan terdapat sedikit mineral kalsit. Satuan litologi batugamping kapuran (Gambar 4b) ditemukan pada elevasi 20-60 mdpl dengan ciri warna putih hingga kekuningan, tekstur berpasir, rapuh tidak begitu kompak, memiliki kekerasan agak keras hingga keras dan sebagian berlubang. Kenampakan satuan litologi batugamping kapuran dari jarak dekat memperlihatkan tekstur yang berpasir dan tidak begitu kompak. Kondisi batugamping

kristalin yang kompak tetapi terpotong dengan keberadaan diskontinuitas (Gambar 4a) yang dapat menyebabkan potensi keruntuhan/longsor (Hook dan Bray, 1981).

Data diskontinuitas pada lereng dilakukan dengan menggunakan drone dan diolah kedalam bentuk model tiga dimensi (3D) untuk dapat diekstraksi data diskontinuitasnya dan dianalisa dengan metode kinematika.

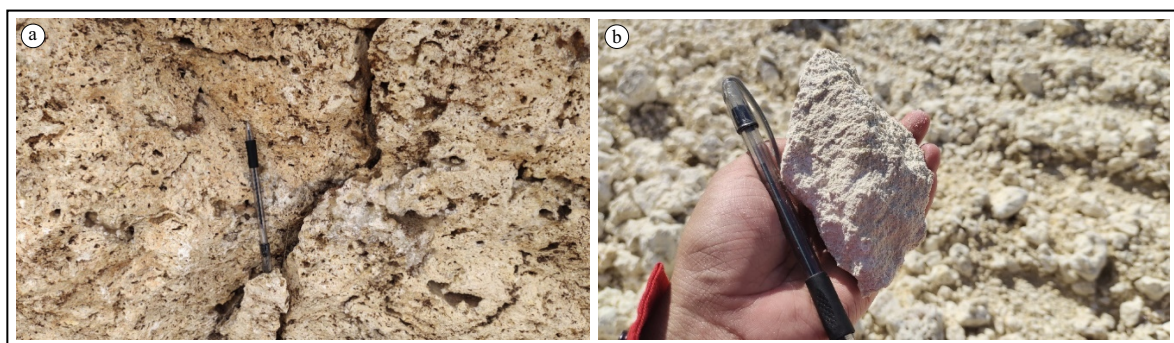
Data foto udara yang diperoleh pada saat drone mapping yaitu sejumlah 68 buah foto dengan ukuran masing-masing foto sebesar 5472 x 3648 pixel dan resolusi sebesar 72 dpi. Data foto udara yang telah diolah dalam aplikasi Agisoft Metashape menghasilkan titik Dense Point Cloud sebanyak 4.928.045 titik dalam kualitas medium dan sudah cukup baik dan rapat untuk dilakukan analisis lanjutan.

Pengolahan *Dense Point Cloud* dalam bentuk tiga dimensi (3D) yang telah terbentuk, dan telah direferensikan dengan titik koordinat GCP dan sudut penangkapan foto udara menghasilkan kondisi dengan arah kedudukan dan posisi yang

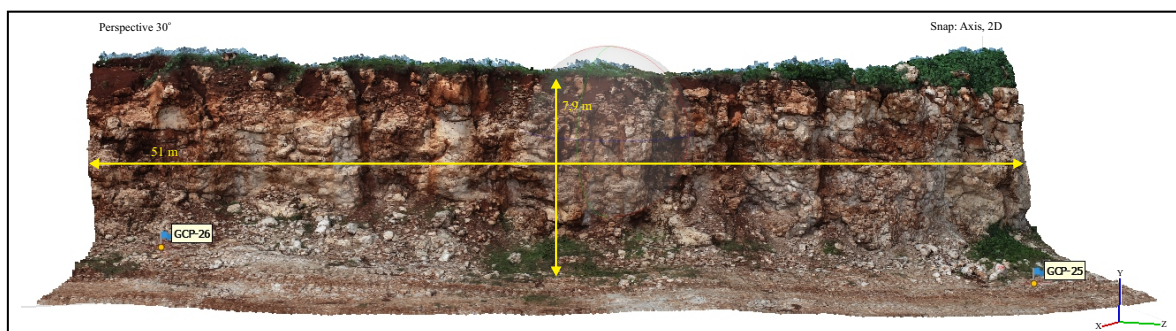
mendekati dengan kondisi aktual di lapangan. Pada pengolahan tersebut, dapat diketahui panjang dimensi lereng yang dilakukan analisis yaitu sebesar 51 meter dan tinggi 7,9 meter (Gambar 5).

Pada aplikasi *CloudCompare* ekstraksi data diskontinuitas pada lereng dilakukan secara semi otomatis melalui delineasi dan tracing dengan bantuan algoritma darkness. Aplikasi ini akan secara otomatis memposisikan hasil delineasi pengamat dengan tekstur muka lereng pada model 3D yang ada berdasarkan topografi bentukan model dan gelap terangnya. Kedudukan lereng (Gambar 6a) didapatkan sudut kemiringan dan arah kemiringan lereng sebesar $74^{\circ}/N58^{\circ}E$, dan kedudukan diskontinuitas seperti pada Gambar 6b.

Data hasil ekstraksi diskontinuitas sesuai dengan hasil delineasi dan *tracing* pada aplikasi *CloudCompare* dan tidak menunjukkan *behavior* atau sifat penciri yang dimiliki aplikasi yang berpengaruh pada hasil. Hal tersebut dikarenakan ekstraksi data masih dapat dikendalikan



Gambar 4. Kenampakan satuan litologi (a) batugamping kristalin dan (b) batugamping kapuran.



Gambar 5. Model 3D dense point cloud lereng batugamping kristalin (nampak dari depan dan sumbu Y sebagai utara).

sepenuhnya oleh pengamat (manusia) seperti pada pengukuran manual di lapangan, namun hanya dilakukan pada model 3D dense point cloud. Hasil ekstraksi dapat dilihat pada tabel 1.

Data diskontinuitas yang dimiliki lereng ini melalui ekstraksi aplikasi *CloudCompare* memberikan gambaran kontur streonet yang menunjukkan dominasi kerapatan atau densitas dari kedudukan titik diskontinuitas pada bagian arah NE dan SW seperti pada Gambar 7.

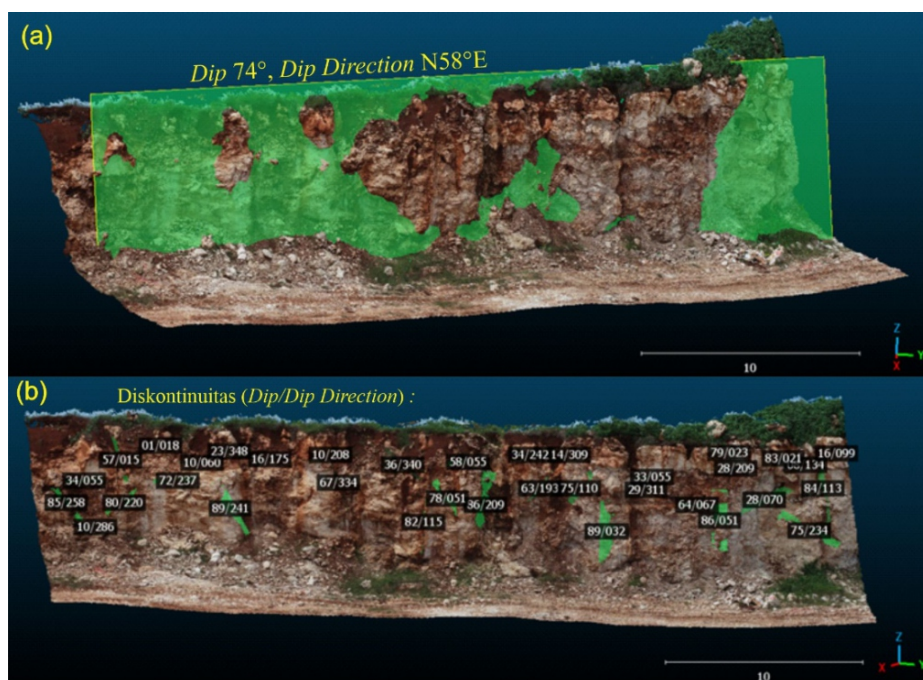
Ekstraksi data diskontinuitas pada aplikasi *Discontinuity Sets Extractor* (DSE) yang berbasis pada *matlab* dilakukan secara penuh oleh komputasi dengan pendekatan klasifikasi penggolongan arah kedudukan yang sama pada tiap kenampakan permukaan (kontur dan tekstur) melalui model 3D *dense point cloud* sebagai bidang diskontinuitas. Pendekatan tersebut memiliki asumsi arah kedudukan yang nampak pada permukaan juga akan menerus ke arah dalam. Hasil klasifikasi beberapa bidang diskontinuitas (ditunjukkan dalam warna yang berbeda) pada model 3D *dense point cloud* (Gambar 8) dengan pengelompokkan bidang diskontinuitas pada batas perbedaan maksimal 10° .

Hasil ekstraksi data diskontinuitas pada aplikasi DSE ini menunjukkan kecenderungan benar-benar mengikuti alogaritma pendekatan yang dimiliki aplikasi tersebut yaitu mengasumsikan arah kedudukan yang terlihat pada permukaan juga menerus hingga dalam permukaan lereng. Pendekatan tersebut akan cukup rancu ketika permukaan lereng yang dimiliki mempunyai kontur dan tekstur yang terbentuk secara tidak natural. Data diskontinuitas dapat dilihat pada Tabel 2.

Data diskontinuitas yang dimiliki oleh hasil ekstraksi menggunakan aplikasi DSE memiliki gambaran bentuk kontur streonet dengan densitas penyebaran titik diskontinuitas yang tinggi di arah NE (Gambar 9).

Analisis Kinematika Lereng dilakukan dengan parameter sudut geser dalam 34° (PT. Solusi Bangun Indonesia Pabrik Tuban Tbk., 2022). Kedudukan lereng diketahui dengan nilai *strike* = $N328^\circ E$, *dip* = 74° , dan arah kemiringan lereng = $N58^\circ E$.

Kinematika untuk keruntuhan bidang memberikan signifikansi sebesar 14,29% (Gambar 10 a) dengan titik kritis yang masuk pada zona

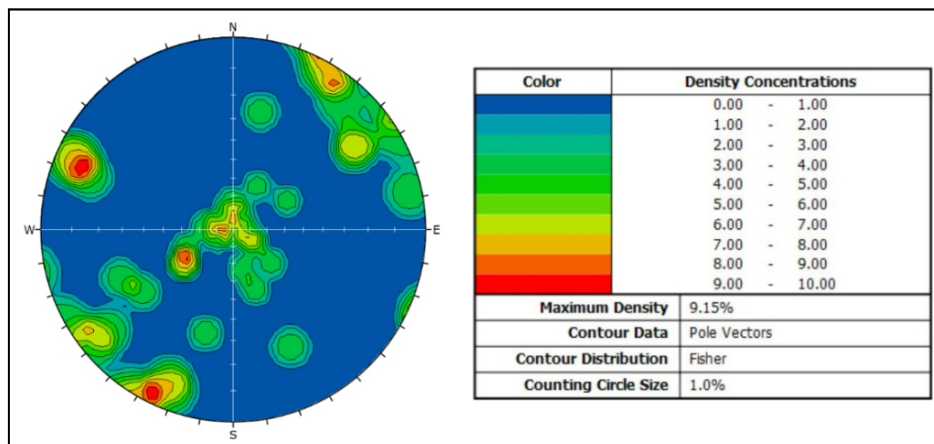


Gambar 6. (a) Kedudukan lereng dan (b) hasil ekstraksi data kedudukan diskontinuitas pada lereng (sumbu Y sebagai utara)

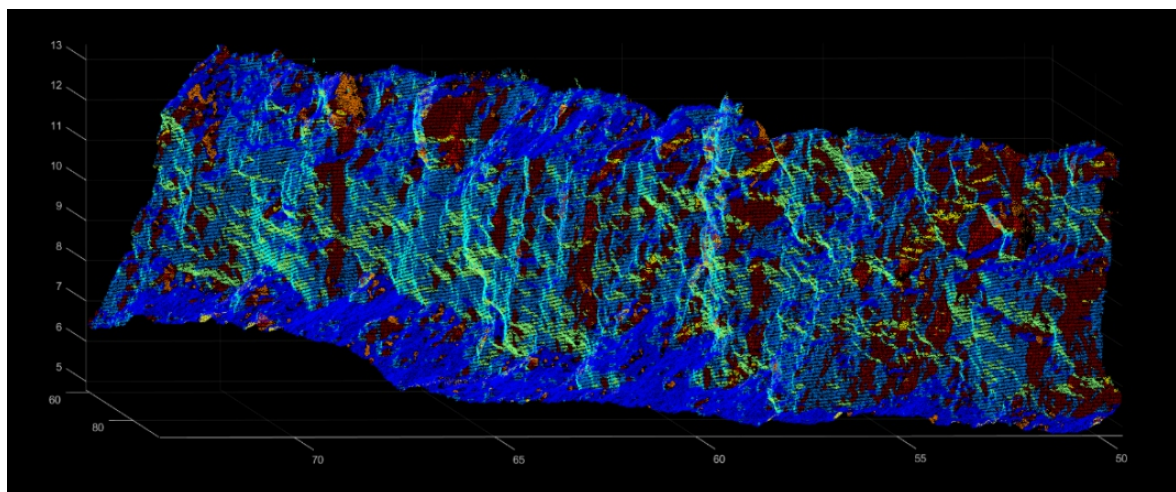
Analisis Keruntuhan Lereng dengan Metode Structure from Motion (SfM)
pada Lereng Tambang Batugamping di Tuban, Jawa Timur

Tabel 1. Data diskontinuitas hasil ekstraksi CloudCompare

Nama	Strike	Dip	Dip Direction	Nama	Strike	Dip	Dip Direction
measurements,10/286	196,1163	10,05758	286,1163	measurements,10/208	118,7707	10,25074	208,7707
measurements,34/055	325,4942	34,58427	55,49417	measurements,10/060	330,578	10,18041	60,57804
measurements,85/258	168,2652	85,23116	258,2652	measurements,89/241	151,6772	89,06467	241,6772
measurements,80/220	130,7437	80,96409	220,7437	measurements,78/051	321,4825	78,16463	51,48247
measurements,75/234	144,4356	75,37423	234,4356	measurements,63/193	103,6927	63,38984	193,6927
measurements,84/113	23,08863	84,19061	113,0886	measurements,08/134	44,11053	8,570933	134,1105
measurements,72/237	147,9805	72,22224	237,9805	measurements,16/099	9,062798	16,68811	99,0628
measurements,14/309	219,2534	14,06084	309,2534	measurements,28/070	340,0348	28,26847	70,03479
measurements,79/023	293,4945	79,60449	23,49447	measurements,89/032	302,927	89,82616	32,92704
measurements,33/055	325,2351	33,24504	55,23512	measurements,58/055	325,4213	58,87725	55,4213
measurements,67/334	244,8998	67,79963	334,8998	measurements,34/242	152,9691	34,7678	242,9691
measurements,86/209	119,1145	86,64732	209,1145	measurements,29/311	221,2495	29,926	311,2495
measurements,36/340	250,432	36,32305	340,432	measurements,83/021	291,6334	83,39775	21,63336
measurements,16/175	85,87886	16,77427	175,8789	measurements,75/110	20,51604	75,11826	110,516
measurements,86/051	321,3308	86,57549	51,33081	measurements,28/209	119,3759	28,58988	209,3759
measurements,23/348	258,9509	23,55384	348,9509	measurements,64/067	337,7524	64,23137	67,75237
measurements,01/018	288,6381	1,967321	18,63808	measurements,82/115	25,2953	82,62071	115,2953
measurements,57/015	285,1168	57,96485	15,11676				



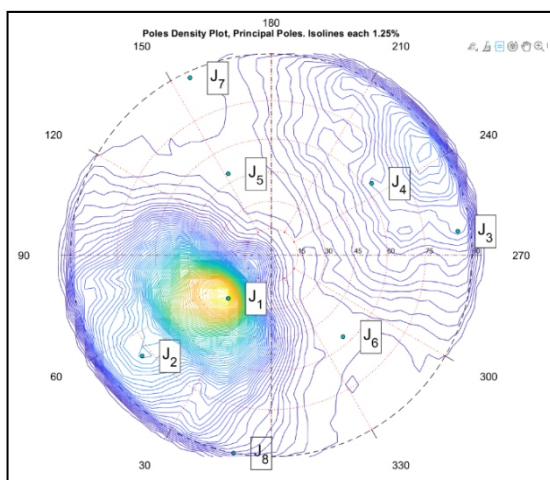
Gambar 7. Kontur streonet data diskontinuitas hasil ekstraksi CloudCompare.



Gambar 8. Klasifikasi bidang diskontinuitas hasil ekstraksi *Discontinuity Sets Extractor* (DSE).

Tabel 2. Data diskontinuitas hasil ekstraksi *Discontinuity Sets Extractor* (DSE)

Dip	Dip Direction	Density Contour %	Dip	Dip Direction	Density Contour %
33.7203	44.9979	2.3693	74.4353	327.8031	0.0313
78.3142	52.1278	0.7991	77.9249	312.613	0.0246
87.5112	235.1353	0.6052	88.203	155.314	0.0201
86.2158	262.7016	0.3663	74.4255	147.7923	0.0199
66.3435	259.5189	0.3611	88.7555	138.9333	0.0164
63.122	234.4751	0.3559	90	10.8433	0.0009
66.0488	203.7562	0.2498	90	98.4641	0.0006
49.1946	152.0884	0.0505	90	252.9875	0.0005
56.7138	318.5778	0.0474	90	169.1549	0.0002
64.6146	160.1915	0.0412			

Gambar 9. Kontur stereonet data diskontinuitas hasil ekstraksi *Discontinuity Sets Extractor* (DSE).

daylight envelope sebanyak 35 titik. Pada analisis kinematika untuk keruntuhan bidang, dapat terlihat memiliki *strike* bidang diskontinuitas sebagai bidang gelincir mendekati *dip direction* lereng, dan *dip* lereng yang lebih besar dari *dip* diskontinuitas, namun tidak memiliki *dip* bidang diskontinuitas (Gambar 10) yang lebih besar dibandingkan dengan sudut geser dalam (34°) sehingga tidak memenuhi syarat keruntuhan Hoek and Bray (1981).

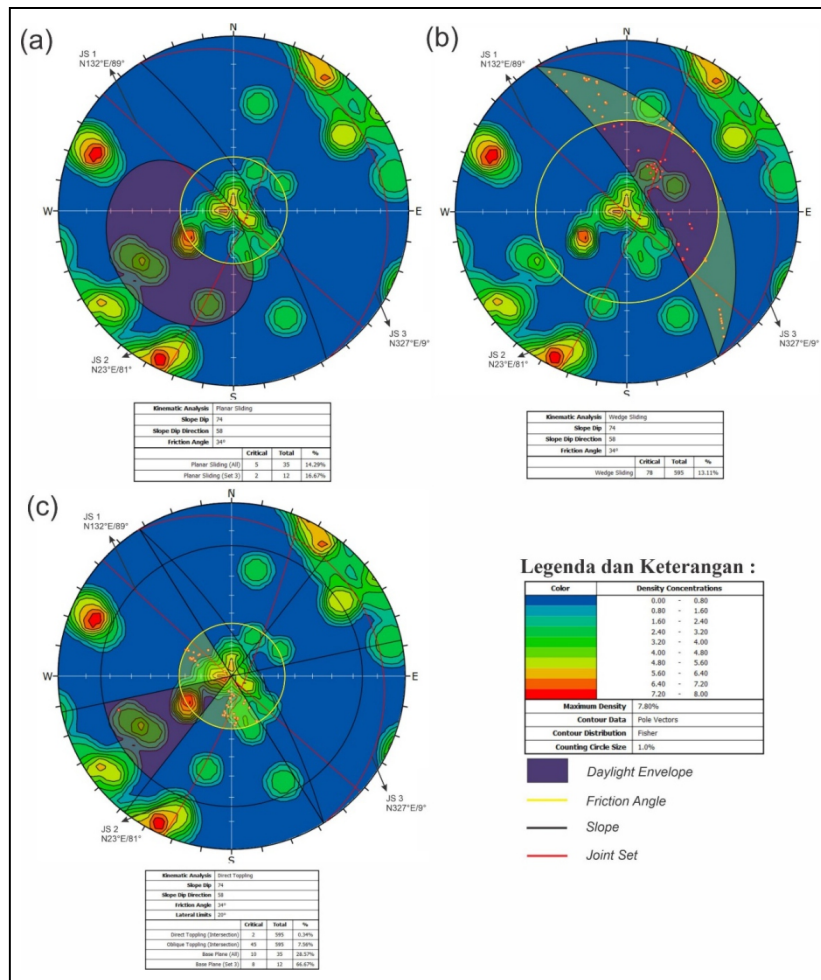
Kinematika untuk keruntuhan baji memberikan signifikansi sebesar 13,11% dengan titik kritis sebanyak 78 titik pada zona *daylight envelope* (Gambar 10 b). Walaupun cukup banyak titik yang berada pada zona tersebut, ternyata tidak

memenuhi syarat untuk terjadinya keruntuhan baji karena tidak ada arah garis perpotongan joint set/ JS (*trend*) yang mendekati *dip direction* dari lereng ($N58^\circ E$). Nilai kedudukan perpotongan (*trend/plunge*) masing-masing garis bidang diskontinuitas (JS) pada JS 1 dengan JS 2 yaitu $N138^\circ E/81^\circ$, JS 2 dengan JS 3 sebesar $N132^\circ E/2^\circ$ dan JS 3 dengan JS 1 sebesar $N24^\circ E/7^\circ$ (Gambar 10).

Berbeda dengan analisis pada dua jenis keruntuhan sebelumnya, pada analisis kinematika untuk keruntuhan guling langsung memberikan signifikansi yang lebih besar dibandingkan kedua analisis keruntuhan sebelumnya yaitu sebesar 28,57% dengan titik kritis sebanyak 10 titik pada zona *daylight envelope* (Gambar 10 c). Syarat-syarat yang ada berdasarkan Hoek & Bray (1981) juga terpenuhi sepenuhnya, dimana *strike* bidang diskontinuitas JS 3 dengan *strike* lereng sebesar $N327^\circ E$ mendekati dengan *strike* lereng ($N328^\circ E$). Syarat lainnya, *plunge* perpotongan bidang diskontinuitas sebagai bidang gelincir harus lebih kecil dari *dip* permukaan lereng yang dikurangi dengan besar sudut geser dalam. *Plunge* dari perpotongan JS 2 dengan JS 3 (2°), dan JS 1 dengan JS 3 (7°), hal ini tentunya lebih kecil jika dibandingkan dengan besar sudut kemiringan lereng dikurangi sudut geser dalam yaitu $74^\circ - 34^\circ = 40^\circ$ sehingga memungkinkan untuk terjadinya keruntuhan guling langsung.

Pada analisis kinematika lereng berdasarkan data hasil ekstraksi diskontinuitas aplikasi DSE

Analisis Keruntuhan Lereng dengan Metode Structure from Motion (SfM)
pada Lereng Tambang Batugamping di Tuban, Jawa Timur

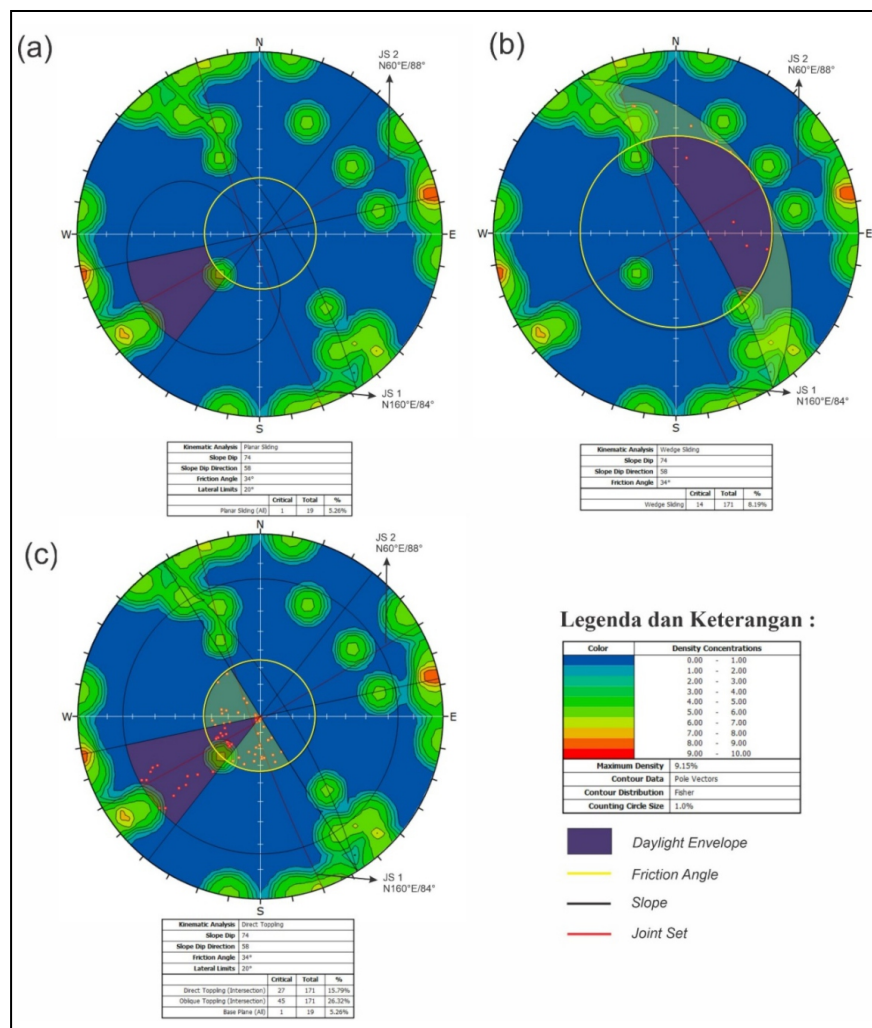


Gambar 10. Analisis kinematika untuk keruntuhan (a) bidang, (b) baji, dan (c) guling langsung (hasil ekstraksi *CloudCompare* via software *Dips*).

memberikan signifikansi yang jauh berbeda dengan hasil aplikasi *CloudCompare*. Kinematika untuk keruntuhan bidang memberikan signifikansi sebesar 5,26% dengan titik kritis hanya 1 titik yang masuk pada zona *daylight envelope*, dari hal tersebut sudah sangat kecil kemungkinan terjadinya keruntuhan bidang. Pada analisis kinematika untuk keruntuhan bidang, dapat terlihat memiliki *strike* bidang diskontinuitas sebagai bidang gelincir pada JS 1 (Gambar 11 a) mendekati dip direction lereng, memiliki dip bidang diskontinuitas pada JS 1 dan JS 2 yang lebih besar dibandingkan dengan sudut geser dalam, namun tidak memenuhi syarat ketika dip lereng tidak lebih besar dari dip diskontinuitas sehingga tidak memenuhi syarat keruntuhan Hoek and Bray (1981).

Kinematika untuk keruntuhan baji memberikan sebesar 8,19% dengan titik kritis sebanyak 14 titik pada zona *daylight envelope* (Gambar 11 b). Berdasarkan hasil analisis, lereng ini tidak memenuhi syarat untuk terjadinya keruntuhan baji karena tidak ada arah garis perpotongan joint set/JS (*trend*) yang mendekati dip direction dari lereng (N58°E) karena nilai kedudukan perpotongan (*trend/plunge*) garis bidang diskontinuitas (JS) pada JS 1 dengan JS 2 yaitu N220°E/84° (Gambar 11).

Kedua analisis kinematika untuk keruntuhan dari keruntuhan bidang dan baji memberikan signifikansi yang rendah, begitu pula dengan analisis keruntuhan guling langsung ini yang sebesar 5,26% dengan titik kritis sebanyak 1 titik pada zona *daylight envelope* (Gambar 11



Gambar 11. Analisis kinematika untuk keruntuhan (a) bidang, (b) baji, dan (c) guling langsung (hasil ekstraksi *Discontinuity Sets Extractor* via software *Dips*).

c). Syarat pertama terpenuhi dimana *strike* bidang diskontinuitas JS 1 dengan *strike* sebesar $N 160^{\circ}E$ memiliki kenampakan paralel dengan *strike* lereng ($N328^{\circ}E$). Syarat lainnya, *plunge* perpotongan bidang diskontinuitas sebagai bidang gelincir harus lebih kecil dari dip permukaan lereng yang dikurangi dengan besar sudut geser dalam. *Plunge* dari perpotongan JS 1 dengan JS 2 yaitu 84° , hal ini tentunya tidak lebih kecil jika dibandingkan dengan besar sudut kemiringan lereng dikurangi sudut geser dalam yaitu $74^{\circ}-34^{\circ}=40^{\circ}$ sehingga memungkinkan untuk terjadinya keruntuhan guling langsung.

Pada analisis kinematika ini, sudah cukup jelas data diskontinuitas hasil ekstraksi oleh aplikasi DSE memberikan sebaran kontur diskontinuitas

yang berpusat di arah NE seperti pada Gambar 11, sehingga berakibat pada analisis kinematikanya yaitu sedikitnya jumlah titik kritis pada zona *daylight envelope* dan lebih banyak berada di zona *non-daylight envelope*. Berdasarkan hal tersebut dan analisis kinematika dan syarat keruntuhannya, tidak ada kemungkinan untuk terjadinya keruntuhan baik secara bidang, baji dan juga guling langsung.

Hasil analisis kinematika lereng dari masing-masing data diekstraksi dengan aplikasi *CloudCompare* dan *Discontinuity Sets Extractor* (DSE) yang diusulkan oleh Riquelme drr. (2014). Hasil analisis tersebut memiliki perbedaan yang dapat terlihat cukup signifikan. Pada nilai signifikansi keruntuhan jenis guling

langsung, hasil dari ekstraksi data *CloudCompare* menunjukkan nilai sebesar 28,57% yang merupakan nilai signifikansi terbesar dari ketiga jenis analisis keruntuhan, sedangkan pada hasil dari ekstraksi data DSE menunjukkan nilai signifikansi terendah untuk analisis keruntuhan guling langsung yaitu hanya sebesar 5,26% (Tabel 3). Pemenuhan syarat untuk 3 tipe keruntuhan yang dianalisis pun berbeda. Pada hasil dari ekstraksi data melalui *CloudCompare* ada jenis keruntuhan yang terpenuhi persyaratannya untuk terjadi keruntuhan yaitu untuk keruntuhan guling langsung (Hoek & Bray, 1981), sedangkan hasil dari ekstraksi data melalui DSE tidak menunjukkan adanya pemenuhan syarat untuk 3 jenis keruntuhan yang dianalisis (Tabel 4).

Pada hasil ekstraksi data diskontinuitas pada Tabel 1 dan Tabel 2, jika dilakukan rata-rata terhadap hasil pengukurannya, berdasarkan pengolahan aplikasi *CloudCompare*, lereng memiliki diskontinuitas dengan nilai rata-rata *dip* sebesar 51,40° dan *dip direction* sebesar N157,57°E. Berdasarkan pengolahan dengan aplikasi DSE didapatkan nilai rata-rata nilai *dip* sebesar 74,50° dan *dip direction* sebesar N186,18°E. Perbedaan nilai *dip* tersebut sampai mencapai >20°, yang

dapat dikatakan cukup besar. Adanya perbedaan yang jauh ini diakibatkan oleh cara bagaimana kedua aplikasi dalam ekstraksi data diskontinuitas itu bekerja. Pada aplikasi *CloudCompare* pengolahan delineasi diskontinuitas dibantu oleh alat *tracing* dan algoritma *darkness* pada *plugin compass* yang mempermudah pengamat dalam delineasi kedudukan diskontinuitas (Girardeu-Montaut, 2016; Tung drr, 2018; Nagendran drr, 2019). Selain itu, pengamat memiliki kontrol penuh dalam hasil ekstraksi data diskontinuitas (Buyer dan Schubert, 2021; Pack drr, 2021). Aplikasi ini juga memudahkan dalam melakukan koreksi dengan menghapus data terukur dan mendelineasi ulang. Aplikasi *CloudCompare* menunjukkan beberapa kelemahan seperti adanya kesalahan pengukuran dapat terjadi jika pengamat kurang teliti. Kelemahan lain adalah jelas tidaknya model 3D *point cloud* untuk dapat diamati bergantung pada saat pembentukan dan akuisisi data foto udara. Pada massa batuan yang kompleks, ekstraksi detail otomatis dari bidang permukaan pada massa batuan yang kompleks tidak didapatkan secara tepat dengan aplikasi *CloudCompare* saat ini (Daghigh drr, 2022).

Berbeda halnya dengan aplikasi *CloudCompare*, aplikasi DSE dapat mengekstraksi data kedudukan diskontinuitas secara otomatis dari komputasi berdasarkan topografis permukaan model 3D. Aplikasi ini mengelompokkan arah kedudukan yang sama yang terlihat di permukaan dengan kontur dan tekstur yang dimiliki lereng (dengan batas perbedaan derajat tertentu) dalam beberapa bidang diskontinuitas dan mengasumsikan arah kedudukan tersebut menerus hingga ke dalam (Suri drr, 2020). Selain itu, aplikasi ini belum bisa memberikan gambaran mengenai kemenerusan dan spasi diskontinuitas dengan akurat (Buyer dan Schubert, 2017; Suri drr, 2020). Hasil yang akan diperoleh bergantung sekali pada bagaimana kondisi permukaan lereng atau model yang akan diekstraksi. Kondisi optimal untuk melakukan ekstraksi data diskontinuitas dari aplikasi DSE yaitu permukaan terbentuk secara natural, batas-batas diskontinuitas jelas dan tidak terhalang oleh objek tertentu serta

Tabel 3. Signifikansi tipe keruntuhan lereng pada data hasil ekstraksi aplikasi *CloudCompare* dan *Discontinuity Sets Extractor* (DSE).

Metode Ekstraksi	Signifikansi Keruntuhan %		
	Bidang	Baji	Guling Langsung
<i>CloudCompare</i>	14,29	13,11	28,57
<i>Discontinuity Sets Extractor</i>	5,26	8,19	5,26

Tabel 4. Pemenuhan syarat keruntuhan berdasarkan Hoek & Bray (1981) dari data hasil ekstraksi aplikasi *CloudCompare* dan *Discontinuity Sets Extractor* (DSE).

Metode Ekstraksi	Pemenuhan Syarat Keruntuhan		
	Bidang	Baji	Guling Langsung
<i>CloudCompare</i>	Tidak	Tidak	Ya
<i>Discontinuity Sets Extractor</i>	Tidak	Tidak	Tidak

singkatan yang segar. Selain hal tersebut, hal yang perlu diperhatikan yaitu pengamat tidak memiliki kontrol secara penuh didalam pengolahan, namun masih dapat melakukan perubahan pada hasil klasifikasi bidang diskontinuitas pada *dense point cloud* dengan mengatur *range* nilai tertentu untuk menampilkan kelompok bidang diskontinuitas pada model 3D. Meskipun banyak keunggulan dari aplikasi model 3D diskontinuitas, hal ini tidak akan menggantikan pengambilan data langsung oleh ahli geologi yang berpengalaman dan memiliki *sense* geologi yang baik (Herrero drr, 2022). Misalkan ada kasus diskontinuitas yang tidak teramati di permukaan atau lebar bidang diskontinuitas tidak teramati dari model 3D, menghasilkan data yang tidak akurat. Oleh karena itu, kombinasi dari perkembangan teknologi baru dan pengetahuan geosaintis dapat memberikan optimalisasi dan efisiensi kerja khususnya dalam analisis diskontinuitas untuk kepentingan potensi kelongsoran suatu lereng dimasa mendatang.

KESIMPULAN

Penelitian ini mempunyai tujuan utama untuk memberikan gambaran ekstraksi data set diskontinuitas dengan menggunakan metode SfM. Ekstraksi data diskontinuitas diperlukan dalam analisis kinematika untuk menentukan potensi keruntuhan/ potensi longsor pada suatu lereng. Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa pengambilan data dengan UAV berbasis *Structure from Motion* (SfM) memberikan langkah pengambilan data diskontinuitas lebih cepat, efektif dan aman terutama pada daerah lereng yang sulit dijangkau. Dalam analisisnya, penggunaan metode ekstraksi data diskontinuitas dari SfM yaitu *CloudCompare* memberikan hasil potensi keruntuhan/ longsor lereng berupa longsor guling langsung dengan signifikansi titik kritis sebesar 28,57% dan memenuhi syarat analisis keruntuhan lereng. Potensi longsoran tersebut tidak didapatkan pada metode DSE dengan nilai signifikasi titik kritis kecil. Hasil yang didapatkan pada *CloudCompare* lebih

mendekati kondisi lapangan karena pengamat memiliki andil yang besar dalam menentukan kedudukan diskontinuitas (Hafiz dan Setianto, 2019). Pada aplikasi DSE akan lebih cocok digunakan pada lereng batuan dengan bentuk permukaan yang natural dan terhindar dari rintangan atau permukaan dengan bentuk acak. Disarankan jika menggunakan metode ekstraksi data DSE seperti kondisi permukaan lereng di lokasi penelitian, diperlukan adanya klasifikasi bidang diskontinuitas secara manual. Klasifikasi ini berfungsi menentukan arah kedudukan diskontinuitas di model 3D DPC sebelum dilakukan analisis kinematika, agar mendapatkan hasil yang lebih baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kami berikan kepada PT. Solusi Bangun Indonesia Pabrik Tuban Tbk., karena telah memberikan kesempatan untuk melakukan kegiatan penelitian secara langsung di lapangan area bukaan tambang kuari batugamping. Ucapan terimakasih juga kami tuju-kan kepada para ahli bagian kuari di PT. Solusi Bangun Indonesia Pabrik Tuban Tbk., karena telah memberi masukan dan diskusi selama melaksanakan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Agisoft., 2022. *Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, v1.8*, Agisoft LLC.
- Ak, H. and Konuk, A., 2008, The effect of discontinuity frequency on ground vibrations produced from bench blasting: A case study, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 28, 686-694. doi:10.1016/j.soildyn.2007.11.006
- Alptekin, A. and Yakar, M., 2020. Determination of pond volume with using an unmanned aerial vehicle *Mersin Photogrammetry Journal*; 2(2); 59-63.
- Assali, P., Grussenmeyer, P., Villemin, T., Pollet, N., and Viguier, F., 2014. Surveying and

- modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry : Semiautomatic approaches for linear outcrop inspection, *Journal of Structural Geology*, doi: 10.1016/j.jsg.2014.05.014.
- Bolla, A., Beinat, A., Paronuzzi, P., and Peloso, C., 2021. Combined Field and Structure from Motion Survey to Identify Rock Discontinuity Sets of a Shallow Rockslide. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 906 (1), p.012103. IOP Publishing.
- Buyer, A. and Schubert, W., 2018. Joint trace detection in digital images. In: ISRM International Symposium-10th Asian Rock Mechanics Symposium. OnePetro.
- Carvajal, F., Agüera, F., and Pérez, M., 2011. Surveying a landslide in a road embankment using unmanned aerial vehicle photogrammetry. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII(Part 1/ C22), p.201-206.
- Chen, J., Zhu, and H., Li, X., 2016. Automatic extraction of discontinuity orientation from rock mass surface 3D point cloud. *Computers and Geosciences*, 95, p.18-31.
- Clapuyt, F., Vanacker, V., and Oost, K. V., 2016. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on structure-from-motion algorithms. *Geomorphology*, 260, 4-15. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.05.011.
- Daghighi, H., Tannant, D.D., Daghighi, V., Lichti, D.D., and Lindenbergh, R., 2022. A critical review of discontinuity plane extraction from 3D point cloud data of rock mass surfaces, *Computers & Geosciences* 169, 105241. doi: 10.1016/j.cageo.2022.105241.
- d'Oleire-Oltmanns, S., Marzloff, I., Peter, K.D., and Ries, J.B., 2012. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco, *Remote Sensing*, 4, p.3390-3416; doi:10.3390/rs4113390.
- Garcia-Luna, R., Senent, S., Jurado-Pina, R., Jimenez, R., 2019. *Structure from Motion Photogrammetry to Characterize Underground Rock Masses: Experiences from Two Real Tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, p. 262-273. doi: 10.1016/j.tust.2018.09.026.
- Giordan, D., Manconi, A., Tannant, D.D., and Allasia, P., 2015. UAV: Low-cost remote sensing for high-resolution investigation of landslides. In: *Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). IEEE*, pp. 5344-5347.
- Hafiz, A. dan Setianto, A., 2019. Application of Structure from Motion Method to Determine Direction of Slope Failure, *5th International Conference on Science and Technology (ICST)*, Yogyakarta, Indonesia, 2019, pp. 1-5.
- Herrero, M.J, P´erez-Fortes, A.P., Escavy, J.I, Insua-Ar´evalo, J.M., De la Horra, L., L´opez-Acevedo, F., and Trigos, L., 2022. 3D model generated from UAV photogrammetry and semi-automated rock mass characterization, *Computers and Geosciences*, 163, 105121.
- Hoek, E. dan Bray, J.W., 1981. *Rock Slope Engineering, Revised 3rd Edition*, The Institution of Mining and Metallurgy, London, p.341-351.
- ISRM, 1978. Commission on standardization of laboratory and field tests: Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min.*, 15(6), 319-368. doi: 10.1016/0148-9062(78)91472-9.
- Li X., Chen, Z., Chen, J., and Zhu, H., 2019. Automatic characterization of rock mass discontinuities using 3D point clouds, *Engineering Geology* 259, 105131 doi: 10.1016/j.enggeo.2019.05.008.
- Lindner, G., Schraml, K., Mansberger, R., and Hübl, J., 2016. UAV monitoring and documentation of a large landslide. *Appl Geomat*, 8(1), 1-11. doi: 10.1007/s12518-015-0165-0.
- Lucieer, A., de Jong, S. M., and Turner, D., 2014. Mapping landslide displacements using structure from motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography*, 38 (1), 97-116. doi: 10.1177/0309133313515293.

- Mateos, R. M., Azañón, J. M., Roldán, F. J., Notti, D., Pérez-Peña, V., Galve, J. P., Pérez-García, J. L., Colomo, C. M., Gómez-López, J. M., Montserrat, O., Devantèry, N., Lamas-Fernández, F., and Fernández-Chacón, F., 2017. The combined use of PSInSAR and UAV photogrammetry techniques for the analysis of the kinematics of a coastal landslide affecting an urban area (SE Spain). *Landslides*, 14(2), 743-754. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0723-5>.
- Menegoni, N., Giordan, D., Perotti, C., and Tannant, D. D., 2019. Detection and geometric characterization of rock mass discontinuities using a 3D high-resolution digital outcrop model generated from RPAS imagery-Ormea rock slope, Italy. *Engineering geology*, 252, 145-163.
- Mukhlisin, M., Astuti, H.W, Kusumawardani, R., Wardihani, E.D, Supriyo, B., 2023. Rapid and Low Cost Ground Displacement Mapping Using UAV Photogrammetry, *Physics and Chemistry of the Earth*, Volume 130, June 2023, 103367.
- Micheletti, N., Chandler, J., and Lane, S., 2015. *Structure from motion (SfM) photogrammetry, Geomorphological Techniques (Online Edition)*. In: London, British Society for Geomorphology, p. 1- 12, ISSN 2047-0371.
- Nagendran, S.K., Ismail, M.A.M, and Tung, W.Y, 2019. Photogrammetry approach on geological plane extraction using *Cloud-Compare* FACET plugin and scanline survey. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, Volume 68, December 2019, pp. 151 - 158 DOI : <https://doi.org/10.7186/bgsm68201916>
- Niethammer, U., Rothmund, S., and Joswig, M., 2009. UAV-based remote sensing of the slow-moving landslide super-Sauze. In J.-P. Malet, A. Remaître, and T. Boogard (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Landslide Processes: From geomorphologic mapping to dynamic modelling* (pp.69-74). Strasbourg: CERIG Editions.
- Pack, G., Kieffer, D.S., Metzler, I., and Liu, Q., 2021. Approaches for the digital measurement of rock mass discontinuities, 1. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 833. IOP Publishing, 012059.
- Peterman, V., 2015. Landslide activity monitoring with the help of unmanned aerial vehicle. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-1/W4, 2015 International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 30 Aug-02 Sep 2015, Toronto, Canada, pp. 215-218.
- Pringgoprawiro, H., 1983. *Biostratigrafi dan Paleogeografi Cekungan Jawa Timur Utara "Suatu Pendekatan Baru"*, *Disertasi Doktor, Institut Teknologi Bandung*, 239 hal, tidak diterbitkan.
- PT Solusi Bangun Indonesia Tbk., 2022. *Peta Situasi Penambangan PT.Solusi Bangun Indonesia*, Tuban, skala 1:10.000.
- Riquelme, A.J., Abellán, A., Tomás, R., Jaboyedoff, M., 2014. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Comput. Geosci.* 68, 38-52. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014>.
- Riquelme, A., Cano, M., Tomás, R., and Abellán, A., 2017. *Identification of Rock Slope Discontinuity Sets from Laser Scanner and Photogrammetric Point Clouds: a Comparative Analysis*. Italy., *Symposium of the International Society for Rock Mechanics*, *Procedia Engineering*.191, 838 - 845.
- Riquelme, A., Tomás, R., Cano, M., Pastor, J.L. and Abellán, A., 2018. Automatic mapping of discontinuity persistence on rock masses using 3D point clouds. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(10), 3005-3028.
- Rocscience., 2018. *Dips User Manual Version 7.0*. Rockscience Inc.
- Sarro, R., Riquelme, A., García-Davalillo, J.C., Mateos, R.M, Tomás, R., Pastor, J.L., Cano, M., and Herrera, G., 2018, *Rockfall Simulation Based on UAV Photogrammetry Data Obtained during an Emergency Dec-*

- laration: Application at a Cultural Heritage Site, *Remote Sens.* 10, 1923. doi:10.3390/rs10121923.
- Shervais, K., 2016. *Structure from Motion (SfM) Photogrammetry Field Methods Manual for Students*. UNAVCO.
- Situmorang, R. L., Smith, R., dan Van Vessel, E. J., 1992. *Peta Geologi Lembar Jatirogo, Jawa, 1509 - 2, Skala 1:100.000*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Badan Geologi, Departemen Energi dan Sumberdaya Mineral, Bandung.
- Software Dips*. Akses online : <https://www.roscience.com/software/dips> (akses pada tanggal 10 juni 2023)
- Stead, D., Wolter, A., 2015. A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology, *Journal of Structural Geology* 74, 1-23.
- Suri, S., Juhari, A., Yaacob, S., Anua, N., & Zabidi, H., 2020. Rock slope discontinuity extraction from 3D point clouds: Application to an open pit limestone quarry. *Warta Geologi*, 46(2), 107-112. DOI : <https://doi.org/10.7186/wg462202011>
- Tanteri, L., Rossi, G., Tofani, V., Vannocci, P., Moretti, S., Casagli, N., 2017. Multitemporal UAV survey for mass movement detection and monitoring. M. Mikoš et al. (eds.), *Advancing culture of living with landslides*. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-53498-5_18.
- Tung, W.Y, Nagendran, S.K., Ismail, M.A.M, 2018. 3D rock slope data acquisition by photogrammetry approach and extraction of geological planes using FACET plugin in *CloudCompare*, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 169, 012051 doi :10.1088/1755-1315/169/1/012051
- Turner, D., Lucieer, A., & de Jong, S. M., 2015. Time series analysis of landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 7(2), 1736-1757. <https://doi.org/10.3390/rs70201736>.
- Van Bemmelen, R.W., 1949. *The Geology of Indonesia*. Martinus Nijhoff, The Hague, Netherlands, v. IA, 732 h.
- Vrublová, D., Kapica, R., Jiráňková, E., & Struś, A., 2015. Documentation of landslides and inaccessible parts of a mine using an unmanned UAV system and methods of digital terrestrial photogrammetry. *GeoScience Engineering*, 61(3), 8-19.
- Wang, W., Zhao, W., Chai B., Du, J., Tang, L., Yi, X., 2022. Discontinuity interpretation and identification of potential rockfalls for high-steep slopes based on UAV nap-of-the-object photogrammetry, *Computers & Geosciences*, 166, 105191. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105191>
- Yakar, M, Ulvi. A, Yiğit. AY, Alptekin, A., 2022. Discontinuity set extraction from 3D point clouds obtained by UAV Photogrammetry in a rockfall site, *Survey Review*, <https://doi.org/10.1080/00396265.2022.2119747>.