



PENGUKURAN RQD MENGGUNAKAN METODE FOTOGRAMETRI DENGAN SMARTPHONE DI EKS-TAMBANG MANGAN BAWAH TANAH

RQD MEASUREMENT USING PHOTOGAMMETRY METHOD WITH SMARTPHONE IN EX-UNDERGROUND MANGANESE MINE

K. B. Baroto^{*1}, S. Saptono²

¹⁻²Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, UPN "Veteran" Yogyakarta

¹⁻²Jl. SWK 104 (Lingkar Utara), Yogyakarta 55283 Indonesia

e-mail: *112220158@student.upnyk.ac.id

ABSTRAK

RQD merupakan salah satu analisis geoteknik empiris yang umum dilakukan dalam mengetahui kualitas massa batuan di lapangan. Secara konvensional, pengukuran ini dapat dilakukan dengan dua metode, yakni dari hasil *core drilling* dan pengukuran orientasi diskontinuitas dari *scanline*. Metode *scanline* memerlukan kontak langsung dengan massa batuan yang diamati dan memiliki risiko keselamatan bagi pengukurnya apabila dilakukan di area rawan, seperti lereng atau dinding terowongan. Selain itu, kekurangan lainnya adalah cukup memakan waktu baik ketika di lapangan maupun dalam pengolahan data pasca-pengukuran. Penelitian ini dimaksudkan untuk mengukur RQD dengan metode yang lebih efisien, *safety*, dan *user-friendly* dengan algoritma komputasi yang diakuisisi dengan metode fotogrametri menggunakan *smartphone*. Fotogrametri dilakukan dengan memanfaatkan *software* Polycam untuk pengambilan foto sejumlah 150-200 foto per titik observasi di Eks-Tambang Mangan Bawah Tanah Kliripan. Luaran dari fotogrametri berupa 3D *triangular mesh* akan diskalakan ulang dengan objek yang telah diketahui ukurannya sebagai acuan dan di-export ke dalam format 3D *point cloud* untuk kemudian diorientasikan ulang ke arah utara magnetik guna memvalidasi pengukuran *dip* dan *dip direction* massa batuan. Hasil 3D *point cloud* yang sudah tervalidasi ini kemudian diseleksi untuk menghilangkan pengaruh vegetasi dan dilakukan *assisted-tracing* berdasarkan *curvature algorithm* dari *plugin* Compass yang terdapat pada *software* CloudCompare untuk membentuk bidang orientasi diskontinuitas dari *point cloud* massa batuan. RQD dihitung berdasarkan *scanline* virtual yang dibuat di 3D *point cloud*, hasilnya memiliki rata-rata nilai 24,21% untuk *scanline* horizontal dan termasuk pada kategori *very poor*, serta rata-rata di angka 43,49% untuk *scanline* vertikal yang termasuk pada kategori *poor*.

Kata kunci: 3D scanning, diskontinu, fotogrametri, RQD, smartphone

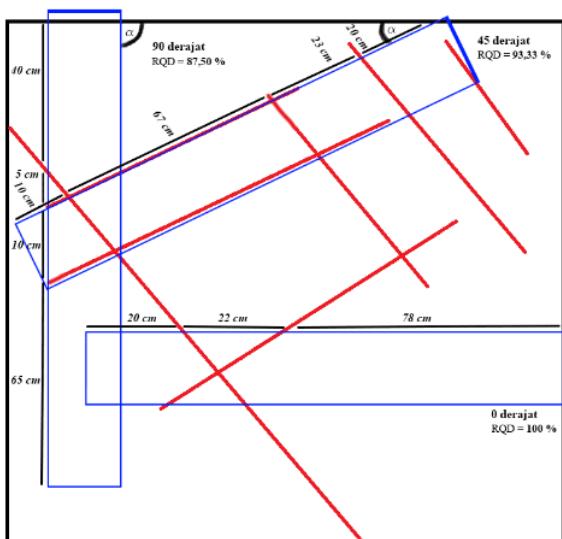
ABSTRACT

RQD is one of the empirical geotechnical analyses commonly used to determine the quality of rock masses in the field. Conventionally, this measurement can be done using two methods, namely from core drilling results and measuring the orientation of discontinuities from scanlines. The scanline method requires direct contact with the rock mass being observed and poses a safety risk to the measurer when carried out in hazardous areas, such as slopes or tunnel walls. In addition, another drawback is that it is quite time-consuming both in the field and in post-measurement data processing. Therefore, this study aims to measure RQD using a more efficient, safe, and user-friendly method with a computational algorithm acquired by photogrammetry using a smartphone. Photogrammetry was carried out using Polycam software to take 150-200 photos per observation point at the Kliripan Underground Manganese Mine. The output of photogrammetry in the form of a 3D triangular mesh will be rescaled with objects of known size as a reference and exported into a 3D point cloud format to then be reoriented towards magnetic north to validate the dip and dip direction measurements of the rock mass. The validated 3D point cloud results were then selected to eliminate the influence of vegetation and assisted tracing was performed based on the curvature algorithm from the Compass plugin in CloudCompare software to form a plane of discontinuity orientation from the rock mass point cloud. RQD was calculated based on virtual scanlines created in the 3D point cloud, with results averaging 24.21% for horizontal scanlines, which classified into the very poor category, and 43.49% for vertical scanlines, which classified into the poor category.

Keywords: 3D scanning, Discontinuity, Photogrammetry, RQD, Smartphone

PENDAHULUAN

RQD (*Rock Quality Designation*) merupakan salah satu metode klasifikasi massa batuan yang awalnya dirumuskan oleh Deere, et. al. (1967) [1] melalui pengukuran *core drilling* dari hasil pengeboran. Persamaannya didapat dari perbandingan panjang *core* yang lebih dari 100 mm dengan total panjang *core* per *run* dalam persen. Semakin RQD mendekati angka 100 %, maka kualitas massa batuan akan dinilai semakin baik kondisinya. Namun, karena penilaian ini hanya dirumuskan berdasarkan hasil *core drilling*, metode pengukuran RQD ini memiliki beberapa kelemahan, yakni hasil interpretasi yang diberikan akan dipengaruhi oleh orientasi dan arah dari lubang bor. Jadi, meskipun diukur dari massa batuan yang sama, metode ini dapat memberikan nilai persentase yang berbeda-beda seperti yang dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Visualisasi Nilai RQD pada Variasi Orientasi Lubang Bor di Massa Batuan yang Sama

Metode kalkulasi ini selanjutnya dikembangkan lebih lanjut oleh Priest & Hudson (1976) [2] agar RQD dapat dihitung melalui pengukuran orientasi pada *outcrop* di lapangan dengan menggunakan persamaan (1) seperti berikut.

$$RQD = 100 e^{-0.1 \lambda} (0,1 \lambda + 1) \quad (1)$$

Nilai ini dihitung berdasarkan nilai λ yang merupakan jumlah *joint* per meter dan $1/\lambda$ yang merupakan rata-rata dari *spacing* (*mean discontinuity spacing*) bidang diskontinu di lapangan. Selanjutnya, diketahui dari penelitian Knapen & Slob (2005) bahwa pengukuran orientasi *dip* dan *dip direction* massa batuan di lapangan dapat diakuisisi menggunakan 3D *scanning* berbasis

instrumen *ground-based laser scanning*. Dengan demikian, bidang diskontinunya dapat diukur secara komputasi melalui 3D *model* yang di-*convert* ke dalam format *point cloud* [3]. Hasil ini menjadi dasar acuan bahwa dengan metode fotogrametri, analisis serupa dapat direplikasi dan dilakukan menggunakan instrumen yang lebih *low-cost* seperti *smartphone*.

Analisis komputasi ini didukung dengan dikembangkannya *open-source software* yang dapat mengolah 3D *triangular mesh* dan 3D *point cloud* seperti *CloudCompare* yang dapat dimanfaatkan menjadi *tools* untuk mengolah hasil fotogrametri massa batuan dan melakukan analisis orientasi *dip* dan *dip direction*-nya [4]. Merujuk dari Thiele, et. al. (2017) metode *assisted-tracing* dengan *plugin* pengolahan *point cloud* serupa juga dinilai mampu meningkatkan efisiensi waktu pengolahan sebesar 35-65% [5]. Hal ini menunjukkan bahwa analisis orientasi secara komputasi akan lebih menguntungkan untuk dilakukan dibandingkan dengan pengukuran secara manual.

Sejalan dengan ini, Singh, et. al. (2021) [6] juga telah membandingkan pengukuran algoritma beberapa *software* pengolahan *point cloud* secara semi-otomatis dan otomatis dengan menggunakan alat *laser scanner* pada beberapa *software* yang salah satunya merupakan *CloudCompare*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa analisis orientasi dari *plugin* *Compass CloudCompare* sudah mampu memberikan hasil yang cukup akurat (dengan *error* rata-rata <2%). Luaran ini mendukung potensi penggunaan *CloudCompare* untuk penelitian lebih lanjut dalam pengukuran RQD massa batuan yang akan dilakukan.

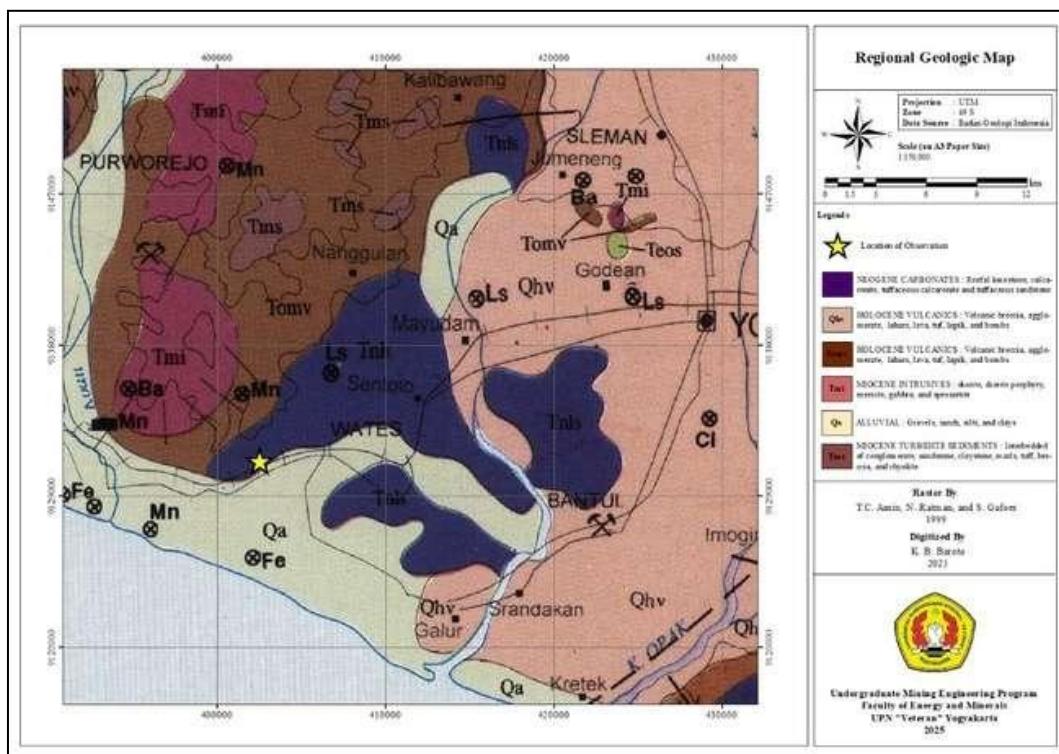
Meskipun komputasi menawarkan efisiensi, validasi akurasi tetap harus menjadi prioritas utama. Penelitian oleh Pack, et. al. (2021) [7] menyimpulkan bahwa pengukuran diskontinuitas digital akan lebih valid jika setidaknya dua jenis pengukuran dilakukan untuk membandingkan hasilnya dan memperoleh orientasi *joint set* yang lebih relevan dengan kondisi lapangan. Sehingga, penelitian ini akan melakukan dua kali pengukuran, yakni secara komputasi dan manual sebagai bentuk validasi luaran analisisnya. Kesimpulan yang sama juga didapat dari Riquelme, et. al. (2016) [8] guna membandingkan luaran analisis orientasi antara dua *open-source software* dalam mengolah data *point cloud* massa batuan. Hasil komparasi tersebut memberikan korelasi positif tiap *open-source software* dan memberikan *error* kurang dari 5° untuk pengukuran *dip* dan *dip direction*-nya [7].

Sebelumnya, pengukuran fotogrametri massa batuan menggunakan *smartphone* pernah dilakukan oleh Riggs, et. al. (2025) dalam membandingkan pemindaian 3D berbasis *smartphone* terintegrasi LiDAR dan fotogrametri dengan *smartphone* tanpa LiDAR. Hal ini dilakukan untuk mengukur ketebalan singkapan massa batuan. Hasilnya, akurasi dari LiDAR jauh lebih mengungguli

fotogrametri non-LiDAR dengan *error* kurang dari 5 cm [9]. Poin penting yang akan diaplikasikan dalam metode kalibrasi penelitian ini adalah perlunya *rescaling* dan *realigning* pada model 3D hasil pemindaian tanpa bantuan LiDAR. Sehingga, pada penelitian ini akan digunakan sebuah skala berupa kertas A4 (210 x 297 mm) dengan tanda panah yang akan di-*setting* di setiap lokasi observasi sebagai kalibrasi arah utara dan acuan skala model 3D yang belum sesuai dengan ukuran massa batuan sesungguhnya.

Berdasarkan hasil dan bahasan dari penelitian sebelumnya, penelitian ini akan mengaplikasikan *workflow 3D scanning* yang telah dilakukan pada [1] dan [10] untuk mendapatkan analisis orientasi dan pengukuran RQD dari persamaan (1) dengan

memanfaatkan *open-source software CloudCompare* [4] dalam pengolahan *point cloud* hasil fotogrametri dari *smartphone* non-LiDAR. Penskalaan ulang 3D *triangular mesh* akan dilakukan pada Polycam yang terinstalasi pada *smartphone* instrumen pengambilan data untuk memastikan *point cloud* massa batuan memiliki relevansi ukuran dengan massa batuan yang diukur. Selanjutnya, *spacing* dari bidang diskontinu massa batuan akan dihitung menggunakan rata-rata dari *linear fracture frequency* guna menghitung λ dan dikomparasikan antara pengukuran komputasi dengan manual di lapangan [7]. Sehingga, fokus utama dari penelitian ini adalah untuk mengatasi tantangan validasi 3D *model* massa batuan [9] untuk mencapai hasil yang akurat dengan hanya menggunakan perangkat *smartphone* non-LiDAR yang lebih terjangkau.



Gambar 2. Peta Geologi Regional [14]

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di area eks tambang mangan bawah tanah Kliripan, yang secara administratif terletak di Dusun Kliripan, Kelurahan Hargorejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia. Lokasi tersebut secara geografis terletak antara $110^{\circ} 10' 00''$ E – $110^{\circ} 16' 02''$ E dan $7^{\circ} 40' 05''$ S – $7^{\circ} 52' 10''$ S [11]. Secara historis, wilayah ini dulunya merupakan pusat penambangan mangan di Pulau Jawa yang menerapkan *room and pillar* sebagai metode penambangan bawah tanah [12]. Pusat

pertambangan ini terletak di daerah dengan jenis batuan calcarenite dalam Formasi Sentolo, yang merupakan bagian dari Zona Pegunungan Jawa Selatan. Peta geologi regional dapat dilihat pada Gambar 2 yang menunjukkan lokasi pengamatan berada di zona ungu (bagian dari Karbonat Neogen) [13].

Zona ungu ini terdiri dari batugamping terumbu, *calcarenite* (batugamping klastik), dan *calcarenite* tufan yang berperan sebagai *host rock* pada endapan mangan di lokasi penelitian. Massa batuan di Kliripan memiliki ciri diskontinuitas yang terdiri atas bidang perlapisan

(bedding plane) dari batuan sedimen dan rekahan-rekahan yang memisahkan *intact rock* (batuan utuh). Diskontinuitas ini menjadi penciri bahwa lokasi ini merupakan daerah yang dulunya berada area laut di struktur sekunder yang timbul akibat aktivitas tektonik setelah lithifikasi batuan [13]. Pegungan Kulon Progo terbentuk akibat kompresi oleh gaya tektonik dari arah tenggara yang menyebabkan bidang lapisan di lokasi penelitian cenderung memiliki kontinuitas dalam arah NNE-SSW. Gaya tektonik ini menyebabkan deformasi massa batuan berupa *dip* dan *fracturing* di lokasi penelitian, dengan arah *strike* dominan mengarah ke barat daya (berdasarkan analisis diagram rosette) dan *dip direction* mengarah ke barat laut [14].

Berikut ini merupakan tahapan-tahapan penelitian yang dilakukan:

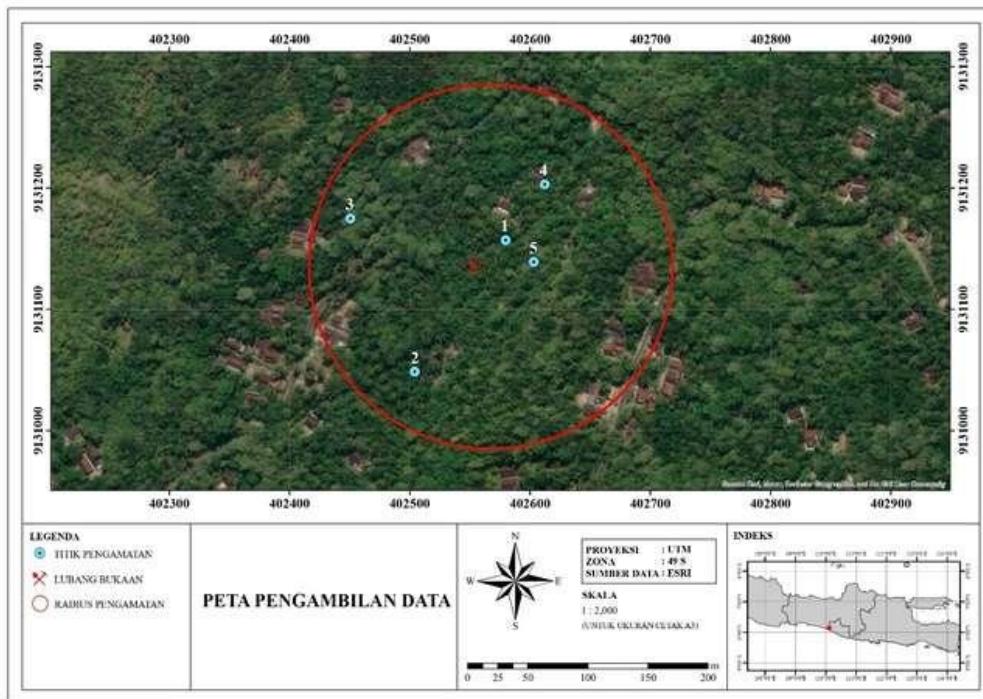
1. Studi Literatur

Literature review dilakukan dalam memahami konteks penelitian mengenai pemanfaatan fotogrametri sebagai media pengambilan data orientasi *dip* dan *dip direction* massa batuan. *Highlight* yang akan diambil dari penelitian sebelumnya adalah pengembangan dan keterbaruan yang dapat dilakukan pada penelitian ini, seperti

potensi pengukuran RQD yang dapat dilakukan dari 3D *point cloud* massa batuan dan penggunaan *smartphone* non-LiDAR sebagai media instrument akuisisi data dengan harga yang lebih terjangkau (*low-cost*) dan *user-friendly* bagi penggunanya.

2. Observasi Lapangan

Pengukuran orientasi massa batuan memerlukan adanya *outcrop* baik berupa *surface outcrop* maupun *underground outcrop* dari bekas lubang bukaan di sekitar tambang mangan Klieripan. Namun, karena ditutupnya seluruh akses lubang bukaan, maka fokus pengukuran akan dilakukan pada *surface outcrop*. Tujuan dari observasi lapangan adalah untuk menelusuri *outcrop* massa batuan yang dapat diukur dalam radius terdekat dari Lubang Bukaan Holiday (istilah penamaan untuk bekas pusat lubang bukaan penambangan mangan Klieripan) untuk merepresentasikan kualitas massa batuan dari RQD di area bekas tambang tersebut. Hasilnya didapat bahwa terdapat lima (5) titik pengamatan dengan rincian satu titik di utara, satu titik di selatan, satu titik di timur, satu titik di barat, dan satu titik terakhir di sisi timur dekat titik pusat penambangannya dengan radius kurang dari 150 meter. Peta pengambilan data dapat dilihat pada Gambar 3.



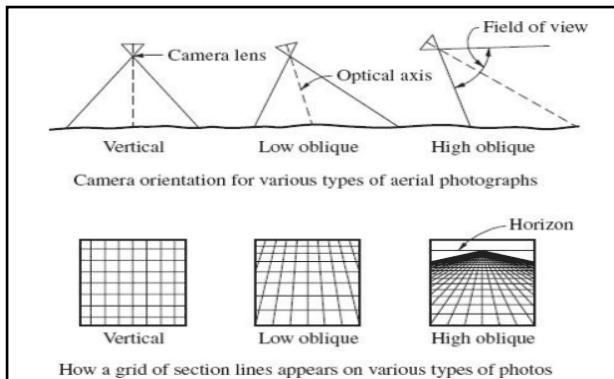
Gambar 3. Peta Pengambilan Data

3. Pengambilan Data

Akuisisi data dilakukan dengan metode fotogrametri menggunakan *smartphone* iPhone 11 yang telah diinstalasi dengan *software* Polycam sebagai aplikasi pengolahan *overlapping photos*-nya. Metode

fotogrametri dilakukan berdasarkan rekomendasi yang juga diterapkan pada *aerial photography* di mana foto massa batuan diambil dari tiga sudut yang berbeda, yakni *vertical angle*, *high oblique*, dan *low oblique* yang dapat dilihat pada Gambar 4 [15]. Tiap

titik observasi menghasilkan 150-200 foto untuk 3-5 meter panjang dan 1-2 meter tinggi area pengukuran.

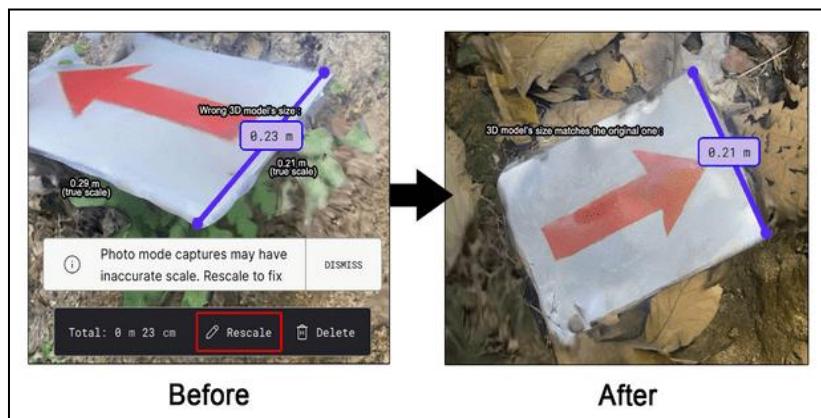


Gambar 4. Variasi Sudut Kamera [15]

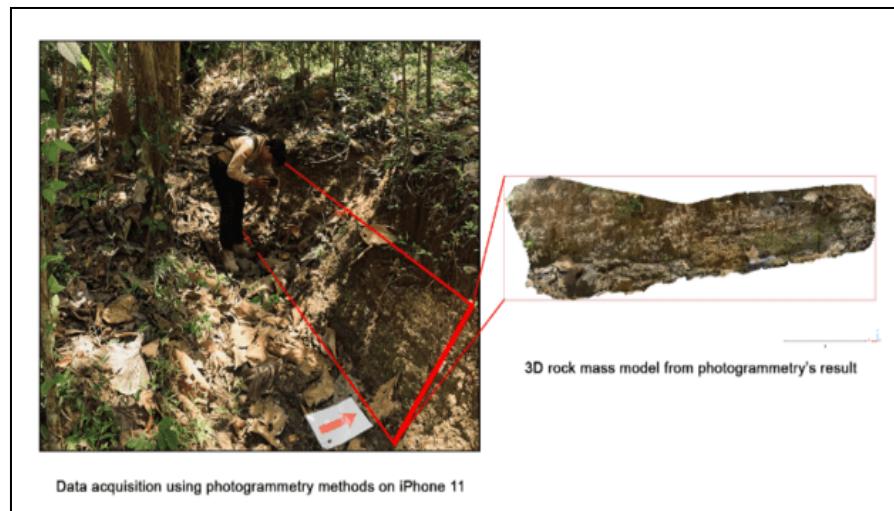
Sebelum fotogrametri dilaksanakan, massa batuan di titik observasi akan diberikan sebuah tanda berupa kertas A4 dengan tanda panah sebagai kalibrasi skala dan referensi pengutaraan dari 3D *triangular mesh* massa batuan yang akan terbentuk. Kalibrasi perlu dilakukan karena 3D massa batuan dari Polycam belum tereferensi secara spasial ke arah utara magnetik dan hanya tereferensi dari koordinat X, Y, Z bernilai 0, 0, 0 dari perspektif titik pengukurannya. Selain itu, 3D *triangular mesh* dimungkinkan memiliki *error* yang tinggi apabila tidak dilakukan penskalaan ulang karena instrumen pengambilan data belum terintegrasi dengan sistem LiDAR sebagai koreksi. Sehingga, tahapan ini dilakukan guna memudahkan *realigning* model pada tahap pengolahan data agar pengukuran *dip direction* mengacu pada arah utara magnetik dan memastikan ukuran massa batuan yang valid seperti yang terlihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Luaran dari fotogrametri massa batuan dapat dilihat pada Gambar 7.



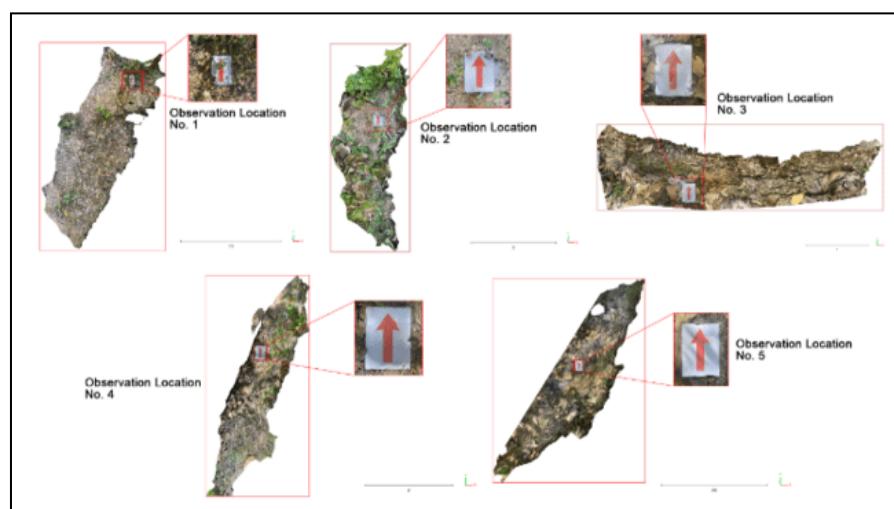
Gambar 5. Kalibrasi dan Pengutaraan Model dengan Kompas Geologi



Gambar 6. Rescaling 3D *Triangular Mesh* di Polycam



Gambar 7. Pengambilan Data dan Luaran dari Fotogrametri



Gambar 8. Validasi Arah Utara Magnetik



Gambar 9. Tracing Tool pada Plugin Compass CloudCompare

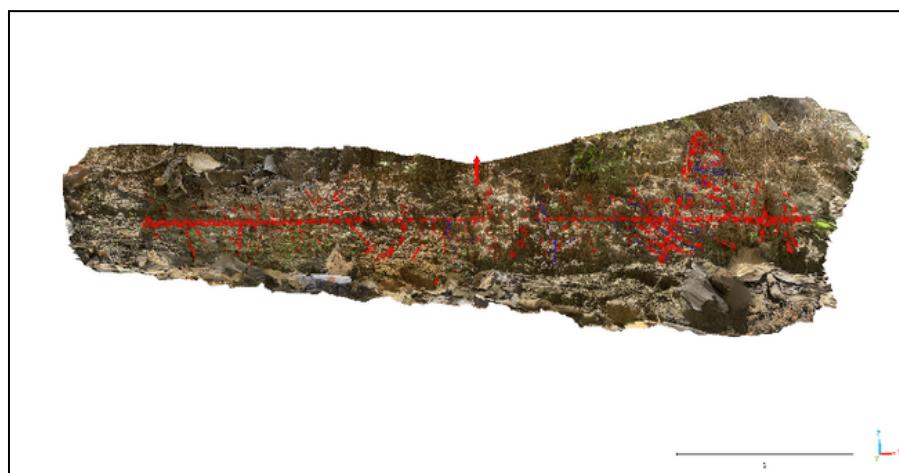
4. Pengolahan Data

Raw photogrammetry result dari Polycam kemudian di-export dalam format .obj untuk diolah lebih lanjut di *CloudCompare* untuk memasuki tahap *realigning*. *Realigning* dimaksudkan untuk mengatur ulang dan memastikan 3D massa batuan memiliki referensi ke arah utara magnetik (Gambar 8).

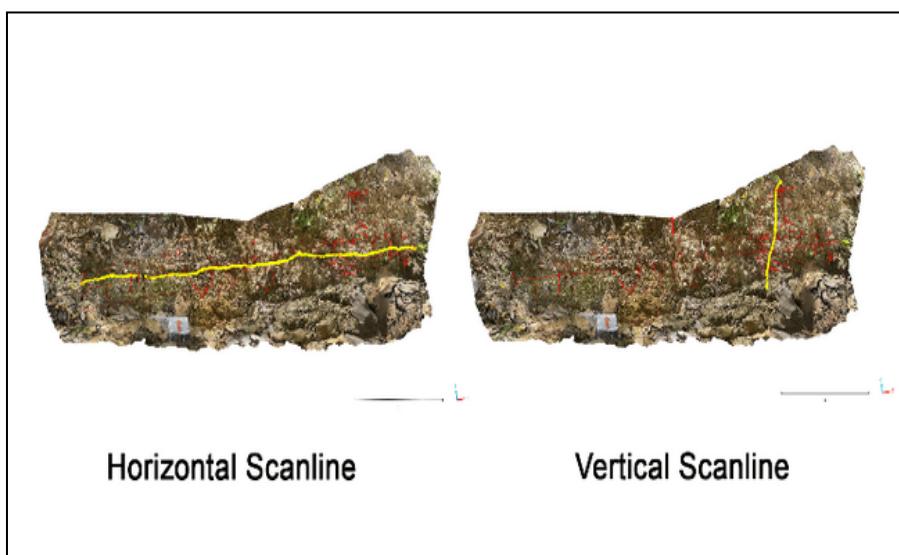
Setelah *realigning* selesai dan 3D massa batuan dipastikan telah tereferensi ke arah utara magnetik, proses analisis orientasi *dip* dan *dip direction* dapat dilakukan menggunakan *plugin Compass* yang memanfaatkan algoritma *curvature* dari titik *point cloud*. Namun, karena data dari Polycam masih berupa 3D *triangular mesh* diperlukan konversi menggunakan tool “*Points Sampling on Mesh*” yang dapat membuat titik-titik rapat dari bentuk triangulasi tekstur massa batuannya (*point cloud*). *Point cloud*

massa batuan kemudian di-*trace* berdasarkan kenampakan dan bentuk permukaan *point cloud*-nya pada bidang-bidang diskontinuitas yang berupa perlapisan (*bedding plane*) maupun rekahan (*fracture*) (Gambar 9). Algoritma *curvature* ini akan membentuk sebuah bidang planar dengan *attribute dip* dan *dip direction* yang dapat di-export dari setiap titiknya seperti yang dapat dilihat pada Gambar 10.

Hasil dari bidang-bidang yang terbentuk dan memiliki atribut *dip* dan *dip direction* ini kemudian akan dianalisis λ -nya berdasarkan garis *scanline* virtual yang dibuat secara vertikal dan horizontal di setiap titik observasinya. Tujuannya adalah sebagai acuan dalam mengukur *linear fracture frequency* atau *joints* per meter dari setiap lokasi observasinya. Visualisasi dari *scanline* virtual ini dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 10. Bidang Diskontinu Virtual dari 3D Massa Batuan



Gambar 11. *Scanline* Virtual Horizontal dan Vertikal

HASIL DAN PEMBAHASAN

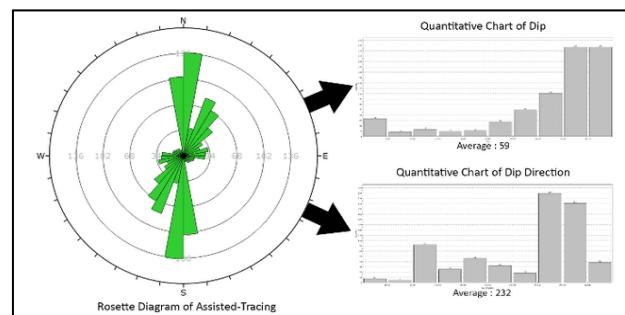
Analisis bidang diskontinu di lima titik observasi ini memberikan sejumlah 791 data orientasi *dip* dan *dip direction* dengan data *mean orientation set* atau *joint set* yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. *Joint Set* Tiap Lokasi Observasi

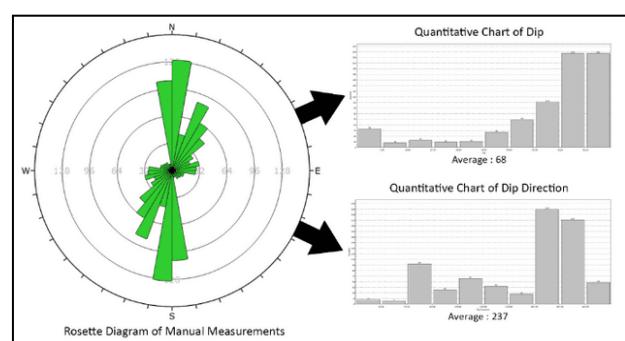
Lokasi Observasi No. 1		
Manual		
Set	Dip	Dip Direction
1	77	269
2	76	300
3	6	294
<i>Assisted-Tracing</i>		
1	80	270
2	59	296
3	6	293
Lokasi Observasi No. 2		
Manual		
1	79	273
2	77	89
<i>Assisted-Tracing</i>		
1	82	273
2	86	90
Lokasi Observasi No. 3		
Manual		
1	74	182
<i>Assisted-Tracing</i>		
1	55	173
Lokasi Observasi No. 4		
Manual		
1	87	269
2	87	91
<i>Assisted-Tracing</i>		
1	83	271
2	88	91
Lokasi Observasi No. 5		
Manual		
1	80	299
<i>Assisted-Tracing</i>		
1	78	297

Distribusi *dip direction* dari kedua pengukuran kemudian dikomparasikan dalam bentuk *rosette diagram* dan menghasilkan *apparent strike* yang mengarah ke NNE – SSW dengan dominasi umum ke arah N 180° E hingga N 210° E dengan rata-rata orientasi yang mengarah ke N 232° E untuk hasil dari *assisted tracing*. Nilai ini memiliki kesinambungan dengan hasil penelitian sebelumnya [12] di mana area Pegunungan Kulon Progo memiliki kecenderungan kontinuitas dalam arah NNE – SSW. Hasil yang serupa juga didapatkan dari pengukuran secara manual di mana dominasi arah umum *strike* juga mengarah pada N 237° E. *Rosette diagram* hasil *assisted tracing* dan pengukuran manual dapat dilihat pada Gambar 12 dan Gambar 13. Analisis dari *histogram* pada dua gambar tersebut menunjukkan bahwa antara hasil

kedua pengukuran memiliki *error rata-rata* senilai 9° untuk *dip* dan 5° untuk *dip direction*-nya.



Gambar 12. *Rosette Diagram* dari *Assisted-Tracing*



Gambar 13. *Rosette Diagram* dari Pengukuran Manual

Peningkatan *bias* terjadi pada *joint set* 2 di Lokasi Observasi No. 2 & *joint set* 1 di Lokasi Observasi No. 3 akibat pengaruh dari vegetasi yang lebat dan kondisi massa batuan yang sudah sangat terkekarkan akibat pelapukan (*highly fractured*) pada kedua *joint set*. Hal ini memberikan gangguan pada bentuk permukaan *rock mass point cloud* dan menyebabkan miskalkulasi *curvature algorithm* pada pembentukan bidang bantu orientasi diskontinu yang lebih sensitif pada pengaruh *dip angle*, apabila melihat dari *error rata – rata dip* yang lebih tinggi dibandingkan *dip direction*-nya. Keterbatasan ini menjadi kelemahan dalam metode *assisted-tracing point cloud* untuk menentukan orientasi diskontinuitas yang terganggu oleh vegetasi dan kondisi massa batuan yang sangat lapuk.

Perhitungan RQD yang dilakukan pada tiap massa batuan dilakukan dengan persamaan (1) dengan λ untuk tiap section-nya sebagai berikut:

- a) λ_1 horizontal = 126 joint / 5 m = 25,20 j/m
- b) λ_1 vertikal = 35 joint / 1,5 m = 23,33 j/m
- c) λ_2 horizontal = 68 joint / 2,9 m = 23,45 j/m
- d) λ_2 vertikal = 25 joint / 1 m = 25,00 j/m
- e) λ_3 horizontal = 209 joint / 4 m = 52,25 j/m
- f) λ_3 vertikal = 23 joint / 1 m = 23,00 j/m



$$\begin{aligned}
 g) \lambda_4 \text{ horizontal} &= 79 \text{ joint} / 5 \text{ m} = 15,80 \text{ j/m} \\
 h) \lambda_4 \text{ vertikal} &= 23 \text{ joint} / 2 \text{ m} = 11,50 \text{ j/m} \\
 i) \lambda_5 \text{ horizontal} &= 159 \text{ joint} / 3,2 \text{ m} = 49,69 \text{ j/m} \\
 j) \lambda_5 \text{ vertikal} &= 23 \text{ joint} / 1,5 \text{ m} = 15,33 \text{ j/m}
 \end{aligned}$$

Hasil kalkulasi RQD-nya memberikan hasil seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2. Hasil ini memberikan informasi bahwa area tambang mangan bawah tanah Kliripan memiliki nilai RQD dengan rentang 3,35-53,15 % dengan rata-rata di angka 24,21% untuk *scanline* horizontalnya. Sedangkan untuk *scanline* vertikalnya memiliki rentang nilai 28,74-68,09 dengan rata-rata di angka 43,49%. Nilai RQD pada *section* horizontal yang sangat rendah menunjukkan bahwa *scanline* tersebut memotong banyak set kekar sub-vertikal, sedangkan nilai RQD pada *section* vertikal yang lebih tinggi mengindikasikan bahwa *scanline* tersebut berjalan relatif sejajar dengan set kekar tersebut. Kondisi ini menunjukkan bahwa kualitas massa batuan di area eks-tambang mangan bawah tanah Kliripan ini tergolong dalam kualitas massa batuan yang buruk (*poor*) karena rata-rata didominasi ke dalam rentang RQD 25 hingga 50% [1].

Tabel 2. Hasil Kalkulasi RQD

No.	Section	%	e	λ	RQD
1	Horizontal			25,20	28,33
	Vertikal			23,33	32,33
2	Horizontal			23,45	32,07
	Vertikal			25,00	28,74
3	Horizontal	100	2,718	52,25	3,35
	Vertikal			23,00	33,09
4	Horizontal			15,80	53,15
	Vertikal			11,50	68,09
5	Horizontal			49,69	4,15
	Vertikal			15,33	54,68

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai pengukuran RQD dari hasil fotogrametri menggunakan *smartphone* non-LiDAR, didapatkan nilai *error* rata-rata sebesar 5° untuk *dip direction* dan 9° untuk *dip angle*-nya. Hal ini menunjukkan bahwa pengukuran secara *assisted* memiliki sensitivitas yang lebih tinggi pada pengukuran *dip angle* massa batuan sehingga diperlukan ketelitian lebih dalam pengukurannya. Merujuk pada Matsimbe (2021), nilai *error* yang masih kurang dari ambang batas toleransi (<15°) ini masih dapat diterima dan memberikan peluang bagi metode fotogrametri menggunakan *smartphone* dapat dikembangkan lebih lanjut untuk

diaplikasikan di lapangan secara lebih lanjut [16]. Arah pengembangan penelitian dapat dilakukan dengan pertimbangan untuk menggunakan *smartphone* yang terintegrasi dengan LiDAR dalam penelitian selanjutnya.

Nilai RQD di area eks-tambang mangan bawah tanah Kliripan memberikan informasi bahwa kualitas massa batuannya tergolong buruk (*poor*) apabila merujuk pada Deere, et. al. (1967). Kondisi ini sejalan dengan litologi *calcarenite* di lokasi penelitian yang bersifat *porous* (berpori tinggi) dan menjadi penyebab tingginya porositas batuan. Hal ini menjadi kerentanan yang mempercepat terjadinya pelapukan. Besarnya porositas juga dapat menginduksi tekanan internal yang memicu pembentukan rekanan mikro sehingga berakhir pada penurunan kualitas massa batuan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Deere, D.U. & Miller, D.W. (1967). *The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice, Classification Systems for Engineering Purposes*. ASTM STP, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 91-101.
- [2] Priest, S. D. & Hudson, J. A. (1976). Discontinuity Spacings In Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13(5), 135-148.
- [3] Knapen, B. V. & Slob, S. (2006). Identification and Characterisation of Rock Mass Discontinuity Sets Using 3D Laser Scanning. *The 10th IAEG International Congress, Nottingham, United Kingdom*.
- [4] Gura, D., Karamysheva, E., & Phsidatok, A. (2024). Using CloudCompare Software Editing Tools for Processing A Three-Dimensional Point Cloud of An Urban Development Site. *ITM Web of Conferences*.
- [5] Thiele, S. T., Grose, L., Samsu, A., Micklethwaite, S., Vollgger, S. A., & Cruden, A. R. (2017). Rapid, Semi-Automatic Fracture, and Contact Mapping for Point Clouds, Images and Geophysical Data. *Solid Earth*, 8, 1241–1253.
- [6] Singh, S. K., Banerjee, B. P., & Raval, S. (2023). A Review of Laser Scanning for Geological and Geotechnical Applications in Underground Mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 33(2), 133-154.
- [7] Pack, G., Kieffer, D. S., Metzler, I., & Liu, Q. (2021). *Approaches for The Digital Measurement of Rock Mass Discontinuities*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science
- [8] Riquelme, A., Tomas, R., Cano, M., & Abellán, A. (2016). Using Open-Source Software for Extracting Geomechanical Parameters of A Rock Mass from 3D Point Clouds: Discontinuity Set Extractor and SMRTTool. *Conference Paper of ISRM International Symposium - EUROCK 2016 in Ürgüp, Turkey*.

- [9] Riggs, A., Hook, M. V., Romero, P., Larson, E., & Testa, M. (2025). Testing the Accuracy of Polycam® 3D Scanning Software on LiDAR and Optical Photogrammetry Devices in Field Research. *The Professional Geologist*, 62(1), 14-18.
- [10] Adjiski, V., Panov, Z., Popovski, R. & Karanakova, S. R., (2021). Application of Photogrammetry for Determination of Volumetric Joint Count as a Measure for Improved Rock Quality Designation (RQD) Index. *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials*, 2, 12-21.
- [11] Harjanto, A. (2021). Karakteristik Mangan (Mn) di Daerah Kliripan dan Sekitarnya, Desa Hargorejo Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 4(1), 30-36.
- [12] Higasinaka, H., Asikin, S., & Soebedo, R. (1969). Geological and Geophysical Investigations of The Kliripan Manganese Field, Central Java. *Bulletin of National Institute of Geology and Mining*, Bandung, 2(1), 25-36.
- [13] Amin, T. C., Ratman, N., & Gafoer, S., (1999). Peta Geologi Lembar Jawa Bagian Tengah, Skala 1:500.000, Puslitbang Geologi, Bandung-Indonesia.
- [14] Widagdo, A., Pramumijoyo, S., & Harijoko, A. (2019). Pengaruh Tektonik Kompresional Baratlaut-Tenggara terhadap Struktur Bidang Perlapisan, Kekar, Sesar, dan Lipatan di Pegunungan Kulon Progo-Yogyakarta. *Jurnal GEOSAPTA*, 5(2), 81-91.
- [15] Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014). *Elements of Photogrammetry with Application in GIS*. New York: McGraw Hill Education.
- [16] Matsimbe, J. (2021). Comparative Application of Photogrammetry, Handmapping and Android Smartphone for Geotechnical Mapping and Slope Stability Analysis. *Open Geosciences*, 13, 148-165.