

Hasil Pengukuran *Terrestrial Laser Scanner* untuk Deteksi Rekahan dalam kaitannya dengan Analisis Struktur Geologi (Studi Kasus Tebing Citatah 125, Jawa Barat)

Terrestrial Laser Scanner Measurement for Fracture Detection in correspond to Geological Structure Analysis (Case Study of Citatah Cliff 125, West Java)

Gusti Ayu Jessy Kartini¹, Irwan Gumilar², Budi Brahmantyo³, Brian Bramanto², Nia Haerani⁴

¹Jurusan Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Nasional, Jl. PKH. Hasan Mustapa No. 23 Bandung 40124 Indonesia

²Kelompok Keilmuan Geodesi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132 Indonesia

³Kelompok Keilmuan Geologi Terapan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132 Indonesia

⁴Badan Geologi, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi
Jln. Diponegoro No. 57 Bandung 40122 Indonesia

Naskah diterima 25 November 2017, selesai direvisi 27 Oktober 2018, dan disetujui 23 November 2018
e-mail: ayujessy@itenas.ac.id

ABSTRAK

Scanline adalah salah satu metode yang umum digunakan untuk mengobservasi dan mengukur rekahan pada suatu bidang permukaan, tetapi metode ini memiliki beberapa keterbatasan. Salah satunya adalah sulitnya melakukan sampling pada area ekstrim, seperti tebing terjal atau daerah rawan longsor, sehingga dapat membahayakan operator. Mengacu pada keterbatasan tersebut, *terrestrial laser scanner* (TLS) menjadi salah satu metode yang potensial untuk menutupi keterbatasan tersebut. TLS dapat merekam jutaan *point cloud* yang dapat merepresentasikan permukaan tanpa harus mengukurnya secara langsung, yang kemudian dapat menjadi metode pendukung dalam akuisisi data rekahan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi rekahan menggunakan TLS yang kemudian dibandingkan dan divalidasi dengan metode *scanline* (studi kasus: Tebing Citatah 125, Kabupaten Bandung Barat, Provinsi Jawa Barat). Penelitian ini dimulai dengan akuisisi data rekahan dengan menggunakan metode *scanline* dan TLS yang hasilnya kemudian dianalisis dengan diagram *rose*. Penelitian ini menghasilkan kesimpulan bahwa TLS memiliki potensi sebagai metode pendukung untuk akuisisi data rekahan. Hal tersebut dibuktikan dengan kemiripan hasil orientasi rekahan pada Tebing Citatah 125 menggunakan TLS terhadap hasil metode *scanline* pada orientasi rekahan arah timur laut-barat daya dengan kemiringan relatif tegak 30°-90°.

Kata kunci: Citatah 125, Rekahan, *Scanline*, *Terrestrial Laser Scanner*

ABSTRACT

Scanline is a commonly used method in observing and measuring fracture. Despite, field operator safety may be troubled in which extreme area and/or position are being sampled. To overcome this problem, *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) might be a prospective method as the device acquires millions of *point cloud* which represent the

surface without direct measurement and acquired data may also augment fracture data acquisition. This research is aimed to identify a fracture on Citatah Cliff 125 (West Bandung Regency, West Java Province) using TLS which later be compared and validated by Scanline data. This research starts from fracture data acquisition using scanline method and TLS. Its results will be analysed by rose diagram. Resulting Citatah Cliff 125 observation data by TLS showed reasonable similarity towards scanline data at Northeast-Southwest (NE-SW) with dip of 30-90 degrees. Therefore, TLS shall be a potential method in terms of fracture data acquisition.

Keywords: Citatah 125, Fracture, Scanline, Terrestrial Laser Scanner

PENDAHULUAN

Batugamping Formasi Rajamandala merupakan salah satu kunci proses dinamika dan perkembangan Cekungan Bandung (Maryanto, 2009). Formasi Rajamandala yang diperkirakan berumur Oligosen Akhir sampai Miosen Awal ini diduga merupakan perairan dangkal (Siregar, 2005). Formasi ini terdiri atas Anggota Batugamping dan Anggota Napal (Siregar, 2005).

Sebagai salah satu kawasan yang menjadi kunci proses dinamika Cekungan Bandung, diketahui bahwa struktur geologi di kawasan ini sangat rumit. Bahkan menjadi lebih kompleks terutama pada sebaran Batugamping Formasi Rajamandala. Hal ini ditafsirkan sebagai akibat dari sesar naik dengan arah relatif ENE-WSE dan sesar “*strike slip*” NW-SE (Siregar, 2005).

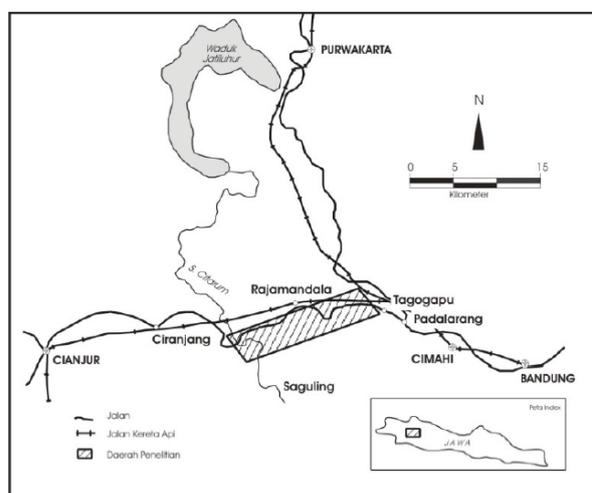
Mengingat kompleksitas struktur yang rumit tersebut, maka formasi Rajamandala dipilih menjadi area yang diteliti. Salah satu area yang diteliti adalah Pasir Pabeasan atau yang dikenal dengan Tebing Citatah 125. Melalui kenampakan singkapan yang ada diketahui bahwa struktur yang ada di Pasir Pabeasan didominasi oleh kekar dan kekar gerus.

Untuk membuktikan hal tersebut, dilakukan akuisisi data rekahan. Para geologiawan pada umumnya melakukan pengukuran rekahan dengan metode *scanline*. Metode *scanline* adalah sebuah garis pada permukaan batuan yang digunakan untuk mengukur semua rekahan yang berpotongan dengan garis tersebut (Brady & Brown, 2004). Pada penelitian Herlambang (2014) disebutkan bahwa rekahan memiliki beberapa unsur, yaitu jenis, kedudukan, panjang, jarak atau spasi antar rekahan, bukaan, dan morfologi rekahan.

Dengan menggunakan metode *scanline*, rekahan dalam ukuran milimeter dapat terekam, karena datanya diperoleh secara langsung di lapangan. Namun, pengambilan data secara langsung di lapangan memiliki keterbatasan, salah satunya

adalah akuisisi datanya terbatas, dan hanya dapat memperoleh singkapan yang dapat dijangkau oleh manusia. Berdasarkan keterbatasan tersebut, maka diperlukan teknologi yang dapat mengatasi masalah tersebut. Salah satu teknologi yang berpotensi untuk mengatasi hal tersebut adalah *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). TLS dapat memberikan data geometri singkapan dengan cukup akurat, tetapi dari segi struktur geologi belum dapat dibuktikan kebenarannya.

Data hasil pengukuran TLS yang digunakan pada penelitian ini bersumber dari Lucianto, drr (2015). Data ini diakuisisi pada tahun 2015 untuk keperluan penelitian perbedaan intensitas gelombang laser dari TLS. Instrumen yang digunakan adalah Leica HDS Scanstation C10 yang termasuk bagian TLS jenis *static laser scanning* dengan rentang berkisar 150-1000 meter (*long range*). Penelitian ini bertujuan untuk mendeteksi unsur-unsur rekahan melalui hasil pengukuran TLS, perbandingannya dengan metode *scanline*, dan untuk mengetahui sejauh mana potensi TLS menjadi metode pendukung bagi pengambilan data rekahan. Penelitian ini dilakukan di Kampung Pamucatan, RT 02/19, Kelurahan Padalarang, Kecamatan Padalarang, Kabupaten



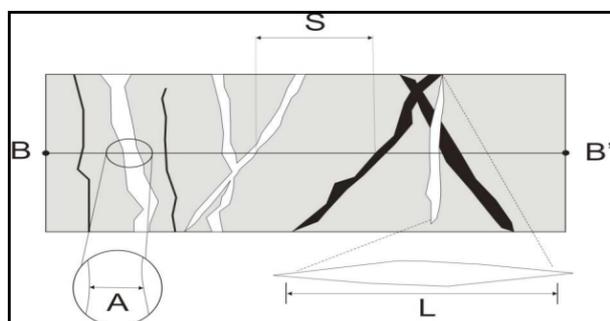
Gambar 1. Area penelitian Formasi Rajamandala (Siregar, 2005).

Bandung Barat, Jawa Barat. Lokasi penelitian secara geografis terletak pada 65°0'03,2" LS dan 107°27'12,2" BT (Gambar 1).

Batasan keilmuan geologi yang digunakan pada penelitian ini terbatas pada unsur-unsur rekahan, berupa kedudukan rekahan, panjang rekahan, dan spasi rekahan yang digunakan untuk menghitung intensitas dan densitas rekahan. Kedudukan rekahan seharusnya bersifat tiga dimensi, tetapi dalam penelitian ini data yang ada tidak menggambarkan bentuk tiga dimensi yang seharusnya. Data jurus yang dihasilkan TLS diolah dengan asumsi bahwa data tersebut diproyeksikan ke sebuah permukaan, sedangkan arah kemiringan tidak diperhitungkan dalam penelitian ini.

METODE PENELITIAN

Dalam keilmuan geologi, sebuah rekahan diakuisisi secara manual dengan menggunakan metode *scanline* dan *window scan*. Data yang diamati adalah unsur-unsur rekahan, mencakup jenis rekahan, kedudukan, panjang, spasi, bukaan, dan morfologi rekahan (Gambar 2).



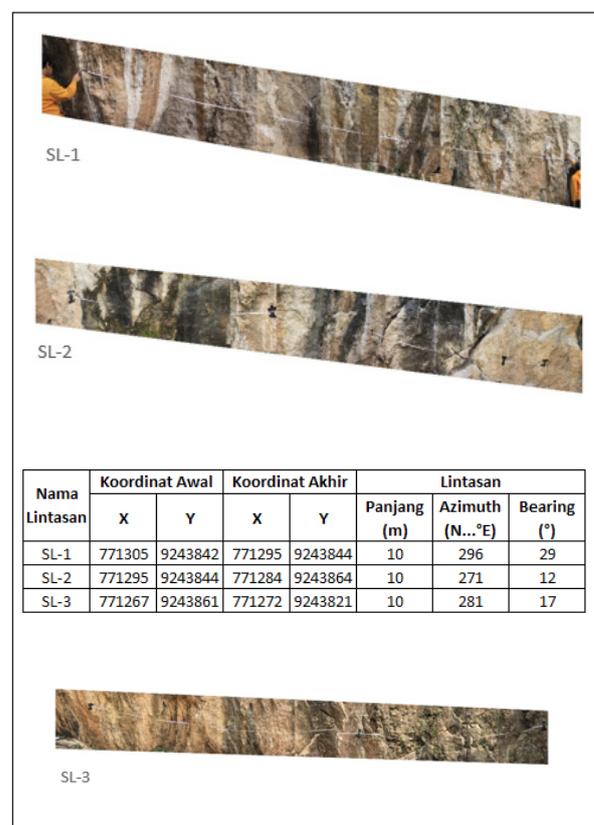
Gambar 2. Keterangan mengenai metode scanline, B-B': Scanline; A: Bukaan Rekahan; S: Spasi Rekahan; dan L: Panjang Rekahan (Sapiie, 1998 dalam Herlambang, 2014).

Pada penelitian ini, area Tebing Citatah 125 dibagi menjadi tiga area *scanline* dengan panjang 10 meter dan luas *window scan* masing-masing 1x1 meter (Gambar 3). Data rekahan tersebut dapat menghasilkan intensitas dan densitas rekahan dari area *scanline* yang telah diukur. Intensitas rekahan adalah jumlah rekahan di sepanjang garis *scanline*, sementara densitas rekahan adalah jumlah panjang rekahan alami dibagi luas area pengukuran (Toreno, 2015). Persamaan sederhana yang digunakan untuk menghitung intensitas dan densitas rekahan

adalah:

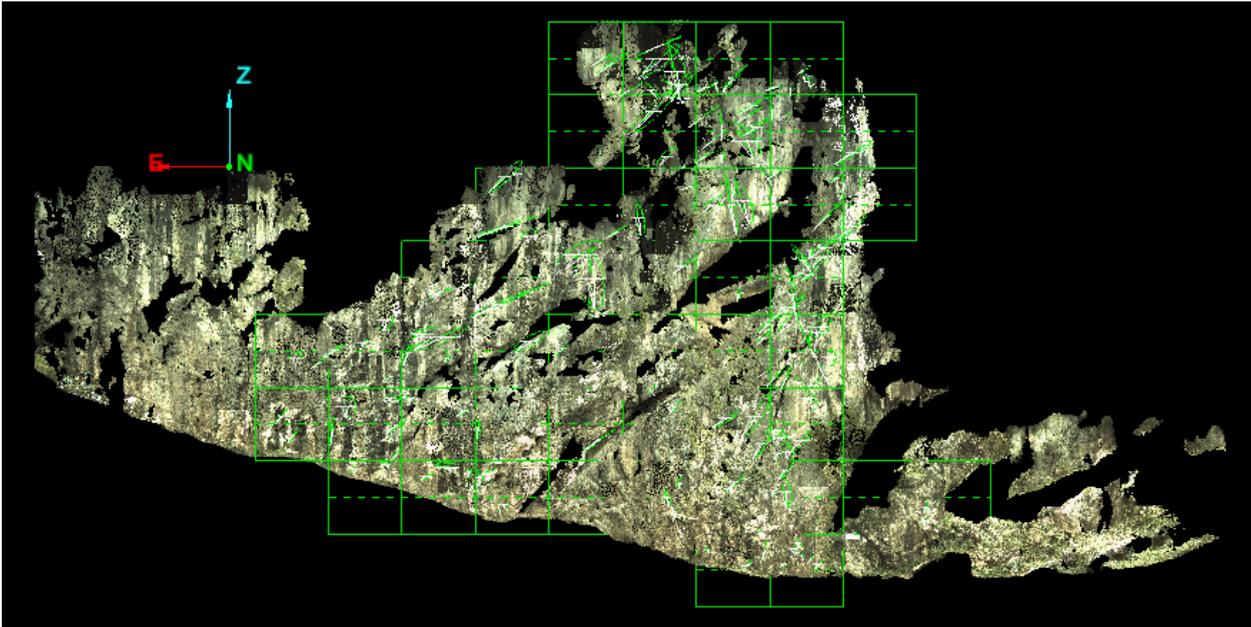
$$\text{Intensitas} = \frac{\text{Jumlah Rekahan}}{\text{Jarak Scanline}} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Densitas} = \frac{\text{Jumlah Panjang Rekahan}}{\text{Luas Area Pengukuran}} \dots\dots\dots(2)$$



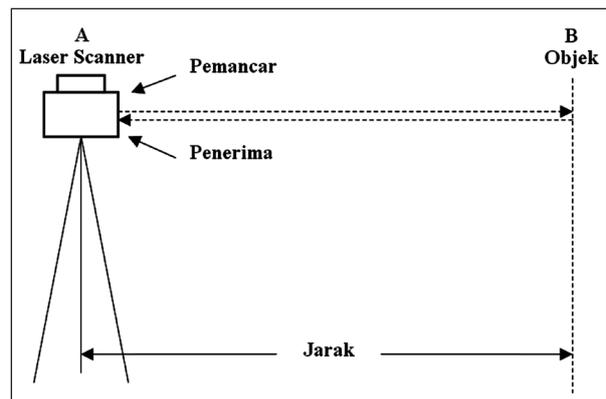
Gambar 3. Lintasan SL-1 sampai SL-3.

Untuk mengetahui potensi TLS sebagai teknologi pendukung akuisisi data rekahan, maka dilakukan analisis kelayakan data hasil pengukuran TLS milik Lucianto, drr (2015) untuk dijadikan sumber utama data *point cloud*. Data *point cloud* yang telah diregistrasi dan melalui tahapan *filtering* ini kemudian diidentifikasi rekahannya dengan menggunakan perangkat lunak Maptrek I-Site Studio. Proses identifikasi dilakukan dengan membagi citra Tebing Citatah 125 menjadi 8 area *scanline* dengan panjang 10-45 meter dan luas *window scan* masing-masing 5x5 meter (Gambar 4). Pada tiap area *scanline* dilakukan identifikasi rekahan secara manual, kemudian data rekahan diekstrak, sehingga diperoleh nilai jurus, kemiringan, dan panjang dari tiap rekahan.



Gambar 4. Pembagian area hasil pemindaian untuk identifikasi rekahan

Terrestrial Laser Scanner merupakan sistem penginderaan jauh yang menganalisis jarak berdasarkan kembalinya pantulan sinar laser terhadap objek pengukuran (Soudarissanane, 2016). Aplikasi teknologi ini cukup sederhana, tetapi memiliki resolusi dan akurasi yang tinggi, perekaman berkecepatan tinggi, dan dapat mencakup area yang cukup luas (Slob, dr., 2007). Akurasi yang tinggi diperoleh dari sekumpulan titik yang memiliki kerapatan tertentu dan dapat membentuk permukaan atau *point cloud* yang merupakan hasil dari pengukuran TLS. Masing-masing titik tersebut memiliki nilai koordinat tiga dimensi (x,y,z) dan nilai intensitas (i) yang mewakili nilai pantulan dari objek yang dikenai oleh laser tersebut. Pada penelitian ini, alat yang digunakan adalah metode *Time-of-Flight* (TOF) atau *timed pulsed*. Prinsip kerjanya didasarkan pada waktu tempuh gelombang laser sejak dipancarkan hingga diterima kembali (Gambar 5).



Gambar 5. Laser *rangefinder* menggunakan metode *time pulsed* atau TOF (Shan & Toth, 2009).

dengan $\alpha = 0,05$ atau 95% pada dua arah.

$$H_0: \mu_{\text{TLS}} = \mu_{\text{SL}} \dots\dots\dots (3)$$

$$H_0: \mu_{\text{TLS}} \neq \mu_{\text{SL}} \dots\dots\dots (4)$$

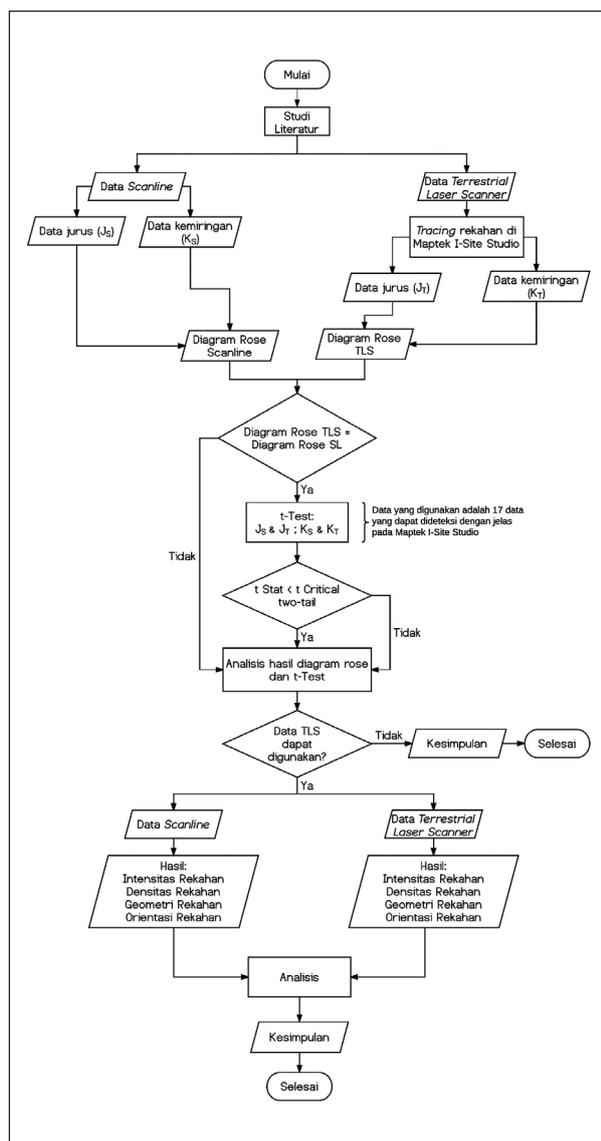
H_0 akan ditolak jika,

$$\left| \frac{\mu_{\text{TLS}} - \mu_{\text{SL}}}{\frac{s_{\mu}}{\sqrt{n}}} \right| > t_{\alpha/2, n-1} \dots\dots\dots (5)$$

Jika hasil uji menyatakan bahwa data TLS tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan data *scanline*, maka selanjutnya dilakukan perhitungan

intensitas dan densitas rekahan. Seluruh hasil kemudian dianalisis untuk memperlihatkan perbedaan hasil yang diperoleh dari kedua metode tersebut.

Secara garis besar penelitian ini dilakukan dengan tahapan seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan data rekahan alami pada singkapan telah dilakukan pada batugamping yang tersingkap di Tebing Citatah 125. Pengukuran linier *scanline* dan *window scan* memperlihatkan jenis rekahan alami berupa rekahan gerus dan kekar. Pengukuran dengan metode *window scan* dengan total luas

area 30m² menghasilkan 249 rekahan alami, yaitu 77 kekar dan 169 rekahan gerus. Jumlah rekahan alami sangat signifikan pada bagian barat Tebing Citatah 125. Dari keseluruhan data pengukuran, orientasi rekahan alami batuan dasar menunjukkan tiga arah dominasi timurlaut-baratdaya, baratlaut-tenggara, timur-barat dengan kemiringan relatif tegak antara 50°-90°.

Pengambilan data rekahan alami pada batugamping yang tersingkap di Tebing Citatah 125 juga telah dilakukan dengan mengidentifikasi melalui data *point cloud*. Proses identifikasi rekahan dibagi menjadi 8 bagian, dengan total luas area identifikasi 1200m². Dari hasil identifikasi rekahan, diperoleh 200 rekahan tetapi tidak dapat didefinisikan jenis rekahan alami yang diperoleh berdasarkan data *point cloud*. Orientasi rekahan yang ditampilkan data rekahan hasil identifikasi didominasi pada arah utara timur laut-barat daya dengan kemiringan antara 30°-90°. Perbandingan hasil antara kedua metode tersebut dapat dilihat pada gambar 7.

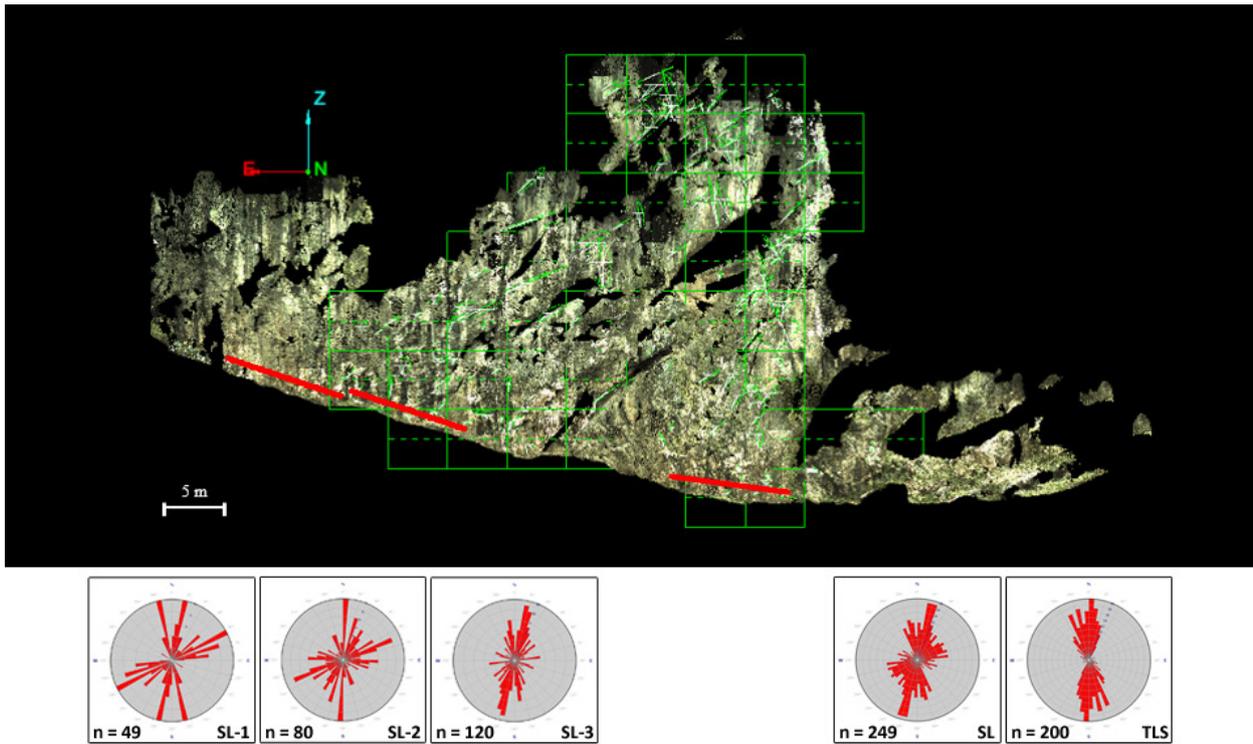
Intensitas dan densitas rekahan yang dihasilkan oleh metode *scanline* dan *window scan* pada Tebing Citatah 125 dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2. Nilai intensitas diperoleh dari pengolahan linier *scanline* dengan menggunakan Persamaan 1. Nilai densitas diperoleh dari pengolahan *window scan* dengan menggunakan Persamaan 2.

Tabel 1. Intensitas Rekahan (*Scanline*)

No.	Scanline	Panjang Scanline (m)	Jumlah Rekahan	Intensitas (/m)
1	SL1	10	7	0,700
2	SL2	10	21	2,100
3	SL3	10	37	3,700

Tabel 2. Densitas Rekahan (*Scanline*)

No.	Window Scan	Luas Window scan (1x5 m)	Jumlah Rekahan	Densitas (m/m ²)	Rata-rata Panjang (m)
1	SL-1.1	5	20	0,920	0,230
2	SL-1.2	5	29	2,401	0,414
3	SL-2.1	5	50	3,109	0,311



Gambar 7. Diagram rose pada area *window scan* Tebing Citatah 125 dan diagram rose seluruh data rekahan yang diperoleh melalui akuisisi menggunakan kedua metode.

4	SL-2.2	5	30	2,319	0,387
5	SL-3.1	5	75	5,372	0,358
6	SL-3.2	5	45	2,472	0,275

Sama halnya dengan pengolahan data rekahan hasil scanline, maka data rekahan hasil identifikasi ini kemudian diolah dengan Persamaan 1 dan 2. Hasilnya adalah berupa nilai intensitas dan densitas dari masing-masing area. Nilai intensitas dan densitas rekahan hasil indentifikasi ini dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Intensitas Rekahan (TLS)

No	Scan-line	Panjang Scanline (m)	Jumlah Reka-han	Intensitas (/m)
1	1	20	5	0,250
2	2	25	5	0,200
3	3	30	6	0,200
4	4	30	5	0,167
5	5	40	9	0,225
6	6	40	9	0,225
7	7	45	3	0,067

8	8	10	0	0,000
---	---	----	---	-------

Tabel 4. Densitas Rekahan (TLS)

No	Window Scan	Luas Window Scan (m ²)	Jumlah Reka-han	Densitas (m/m ²)	Rata-rata Panjang (m)
1	1	100	19	0,320	1,687
2	2	125	17	0,254	1,868
3	3	150	21	0,276	1,969
4	4	150	19	0,245	1,938
5	5	200	37	0,236	1,278
6	6	200	31	0,211	1,362
7	7	225	39	0,125	0,722
8	8	50	17	0,173	0,510

Dari hasil yang telah dipaparkan, ada beberapa hal yang perlu dianalisis untuk membuktikan kualitas data rekahan yang dihasilkan dari identifikasi di point cloud pada perangkat lunak Maptek I-Site Studio. Berikut ini adalah beberapa hal yang dianalisis.

Perbandingan Sampel Rekahhan *Scanline* dan TLS

Analisis awal yang dilakukan adalah untuk mengetahui perbedaan antara rekahhan yang dihasilkan metode *scanline* dan TLS. Kedua metode ini dibandingkan dengan mengambil beberapa sampel rekahhan yang ada di *scanline* maupun TLS. Ada 17 rekahhan yang terlihat jelas pada hasil pemindaian yang kemudian dijustifikasi dengan menghitung residu dari kedua pengukuran tersebut. Pada Tabel 5 diperlihatkan nilai residu dari kedua pengukuran tersebut.

Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa ada empat nilai yang memiliki residu yang cukup tinggi. Faktor utama yang mempengaruhi nilai yang cukup tinggi adalah pada proses pengolahan data pada Maptek I-Site Studio. Untuk mencari nilai jurus dan kemiringan, dilakukan proses penarikan garis pada bidang rekahhan yang dimaksud. Jika rekahhan tersebut berbentuk lurus maka tidak terlalu berdampak besar. Namun, jika bentuk rekahhannya melengkung, maka dapat dipastikan akan memberikan nilai yang cukup berbeda dengan yang dihasilkan *scanline*. Hal ini terjadi karena secara otomatis Maptek I-Site Studio akan

menarik tren umum setelah proses penarikan garis pada bidang rekahhan, yang kemudian akan menjadi bidang maya rekahhan tersebut. Identifikasi manual yang dilakukan oleh operator juga dapat memperbesar nilai residu karena menjadi salah satu faktor kesalahan.

Nilai residu yang besar juga dapat dipengaruhi pada referensi yang digunakan. Jika pada metode *scanline*, proses pengambilan data rekahhan dilakukan secara detil oleh mata manusia, sehingga dapat melihat bidang yang membentuk rekahhan tersebut. Sebaliknya dengan metode TLS, rekahhan hanya dilihat tanpa dapat menganalisis bagaimana terbentuknya. Prosesnya akuisisi data rekahhannya pun sangat bergantung pada *point cloud* yang tersebar di sekitar area penarikan garis.

Untuk membuktikan bahwa data TLS tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan data *scanline*, maka dilakukan uji statistik dengan menggunakan uji-t. Dari hasil pengujian diperoleh nilai yang mengatakan bahwa data TLS tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Hal ini dapat dibuktikan dengan nilai $t_0 > t_{0;05;16}$, baik untuk jurus maupun kemiringan. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 5. Hasil pengukuran scanline dan TLS beserta nilai residu.

No	Nama	Scanline (°)		TLS (°)		Selisih (°)	
		Jurus	Kemiringan	Jurus	Kemiringan	Δjurus	Δkemiringan
1	FRAC1	6	48	346,138	53,173	19,862	-5,173
2	FRAC2	149	52	132,4	50,819	16,600	1,181
3	FRAC3	41	74	7,028	57,581	33,972	16,419
4	FRAC4	203	42	188,929	42,676	14,071	-0,676
5	FRAC5	0	35	11,294	28,781	-11,294	6,219
6	FRAC6	0	60	7,405	50,604	-7,405	9,396
7	FRAC7	346	22	355,368	24,567	-9,368	-2,567
8	FRAC8	20	74	359,299	77,79	20,701	-3,790
9	FRAC9	55	56	44,088	48,137	10,912	7,863
10	FRAC10	210	56	228,19	52,355	-18,190	3,645
11	FRAC11	15	45	33,017	37,409	-18,017	7,591
12	FRAC12	227	87	209,203	86,849	17,797	0,151
13	FRAC13	313	34	319,081	31,039	-6,081	2,961
14	FRAC14	33	66	43,457	87,875	-10,457	-21,875
15	FRAC15	335	40	333,629	32,831	1,371	7,169
16	FRAC16	118	65	98,471	62,912	19,529	2,088
17	FRAC17	308	36	350,632	44,733	-42,632	-8,733
TOTAL						31,371	21,869
RATA-RATA						1,845	1,286
VARIANSI						381,332	73,127
STANDAR DEVIASI						19,528	8,551

Tabel 6. Uji-t

	Jurus-SL	Jurus-TLS	Kemiringan-SL	Kemiringan-TLS
Rata-rata	139,941	138,096	52,471	51,184
Variansi	16954,559	18891,019	295,515	361,026
Data Observasi	17	17	17	17
Standar Deviasi ($\Delta_{SL} - \Delta_{TLS}$)	19,528		8,551	
Korelasi Pearson	0,991		0,893	
Derajat Kebebasan	16		16	
Nilai t	0,390		0,620	
Area penolakan	2,120		2,120	

Sebaran Data Rekahan Scanline dan TLS Berdasarkan Panjang dan Bukaan Reka-han

Jika dikorelasikan dengan data panjang rekahan, dapat dilihat pada Gambar 8 bahwa data panjang rekahan untuk *scanline* berkisar antara 0-150 cm. Dengan jumlah data yang paling tinggi dikisaran 20-40 cm. Hal ini memperlihatkan bahwa data *scanline* sangat mendominasi untuk rekahan dengan ukuran di bawah 50 cm yang sulit diidentifikasi dengan menggunakan perangkat lunak Maptek.

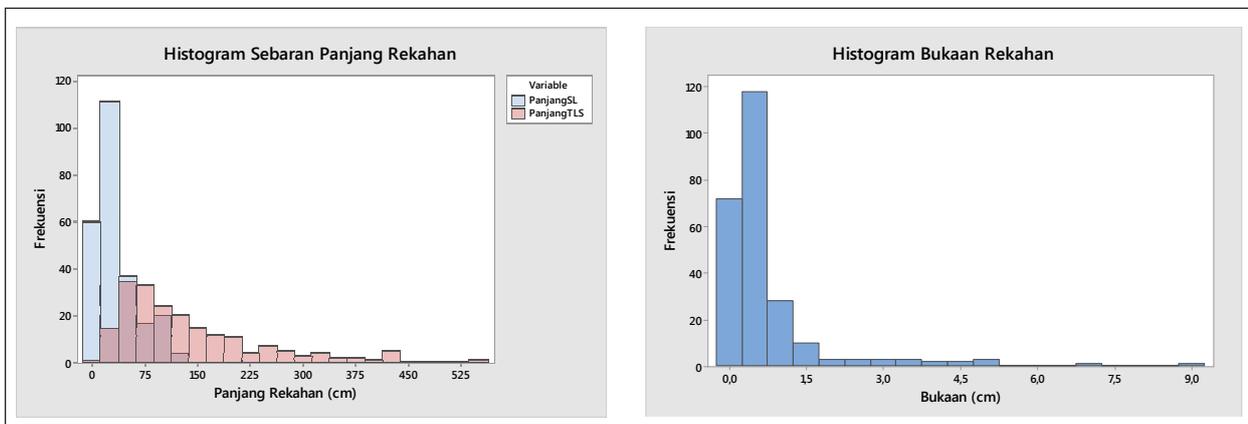
Sementara data panjang rekahan yang dihasilkan TLS tersebar merata dari ukuran 25-500 cm. Rekahan-rekahan pada ukuran ini tampak sangat jelas di perangkat lunak Maptek, tidak hanya di area yang dapat diukur dengan *scanline* tetapi pada area yang sulit dijangkau manusia. Hal ini memperlihatkan bahwa data TLS dapat menjadi penunjang data *scanline* pada area-area yang tidak dapat diukur dengan *scanline*. Tetapi rekahan dengan ukuran 0-20 cm sama sekali tidak diperoleh.

Pada proses pengolahan data, bukaan rekahan tidak dapat diidentifikasi. Hal ini dikarenakan bukaan rekahan yang diobservasi pada pengukuran *scanline* ternyata didominasi dengan bukaan dibawah 1,5 cm. Beberapa bukaan yang berukuran diatas 4 cm dapat dilihat pada pengolahan *point cloud*. Sebaran bukaan rekahan dapat dilihat pada Gambar 8.

Hasil ini dapat dikaitkan dengan resolusi pemindaian alat Leica HDS Scanstation C10. Pada jarak pemindaian yang berkisar 0-50m, jarak antar titik-titik dalam *point cloud* sebesar 4,5mm. Hal ini menjadi salah satu alasan, mengapa rekahan di bawah 20cm tidak terlalu tampak jelas pada *point cloud*.

Identifikasi Rekahan pada *Point Cloud*

Berkaitan dengan proses identifikasi rekahan dengan menggunakan data *point cloud*, ternyata muncul beberapa kelebihan dan kekurangan selain



Gambar 8. Histogram Sebaran Panjang Rekahan dan Sebaran Bukaan Rekahan

yang dapat dilihat pada Gambar 9. Penggunaan data *point cloud* untuk identifikasi rekahan dapat memudahkan operator, karena data tidak perlu diolah ke dalam bentuk permukaan atau *meshing*. Selain memudahkan, penggunaan data *point cloud* ini juga meringankan kinerja memori komputer.

Kaitannya tidak hanya dengan kinerja komputer, melainkan juga dengan rekahan yang diidentifikasi. Rekahan-rekahan yang memiliki ukuran lebih dari 30 cm dapat dilihat dengan jelas. Namun, bukaan rekahan tidak dapat diidentifikasi karena saat kumpulan *point cloud* tersebut diperbesar, titik-titik yang sebelumnya memperlihatkan rekahan akan menjadi tidak jelas.

Gambar memperlihatkan proses penarikan garis tersebut. Warna merah merupakan area yang dapat diukur dengan menggunakan metode *scanline* yang kemudian nilainya dimasukkan pada hasil pindai Tebing Citatah 125. Garis hijau merupakan tren umum yang sebelumnya telah dijelaskan, kemudian terbentuklah bidang maya yang digunakan untuk mengestimasi nilai jurus dan kemiringan.

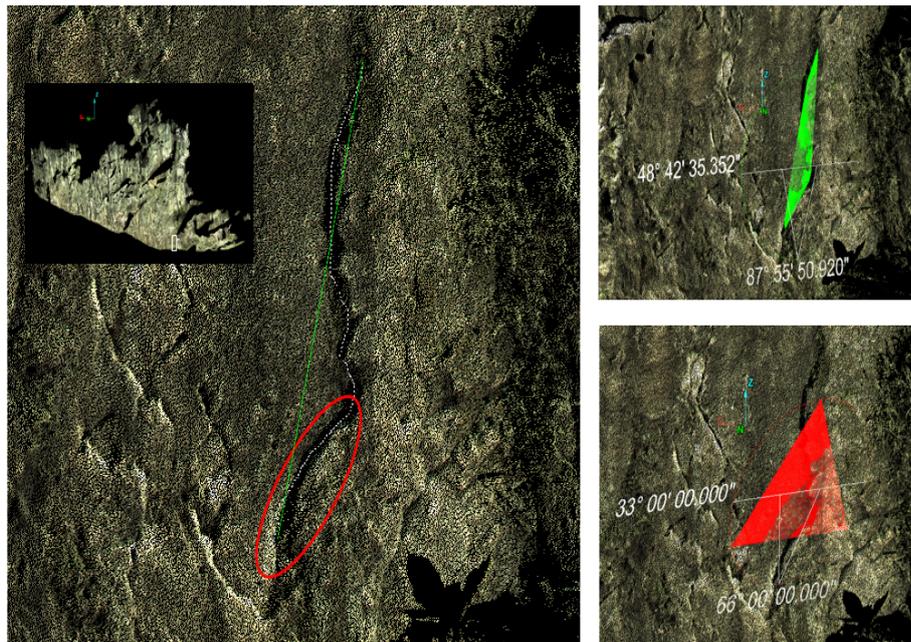
Kekurangan dan Kelebihan TLS

Secara umum dapat disimpulkan bahwa TLS memiliki kelebihan dan kekurangan yang perlu dipertimbangkan dalam proses identifikasi rekahan. Beberapa diantaranya dirangkum pada Tabel 7.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan pada pembahasan, dapat disimpulkan bahwa unsur-unsur rekahan dapat diperoleh dengan menggunakan TLS dan dapat memberikan hasil berupa kedudukan rekahan, intensitas rekahan, dan densitas rekahan. Hasil validasi menggunakan uji-t dengan $\alpha=0,05$ tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara hasil identifikasi rekahan menggunakan TLS dengan yang dihasilkan oleh metode *scanline*. Hal ini dikuatkan juga dengan nilai korelasi Pearson yang menunjukkan variabilitas data di antara keduanya relatif kecil. Hasil diagram *rose* dari kedua metode menunjukkan arah dominasi yang sama, yaitu timur laut-barat daya dengan kemiringan relatif tegak antara 30° - 90° . Mengacu pada hasil uji-t dan diagram *rose*, maka metode TLS berpotensi untuk menjadi pendukung untuk metode *scanline* dengan pertimbangan bahwa TLS hanya dapat memperoleh rekahan dengan ukuran >25 cm dengan kenampakan citra yang mendukung. Selain itu, interpretasinya tetap harus diawasi geologiawan.

Dari hasil penelitian dan kesimpulan yang dihasilkan, diperoleh beberapa saran yang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya. Untuk mendapatkan data rekahan dibawah 20 cm dan memperoleh ketelitian yang lebih detil, diperlukan penelitian TLS terkait proses pemindaian, seperti jarak, posisi, dan waktu pemindaian. Untuk



Gambar 9. Proses penarikan garis pada Maptek I-Site Studio

Tabel 7. Kelebihan dan Kekurangan TLS

No.	Kelebihan	Kekurangan	Saran/Solusi
1	Mampu mengidentifikasi rekahan dengan panjang 20-500 cm	Rekahan dengan panjang dibawah 20 cm tidak dapat terlihat dengan jelas	Menggunakan TLS dengan tipe short range
2	Area pengukuran tidak terbatas	Jarak pengukuran mempengaruhi cakupan area pemindaian	Melakukan survei pendahuluan yang lebih komprehensif, sehingga peletakan alat maupun target lebih tepat
3	Mempersingkat waktu pengukuran	Pengolahan data cukup menyita kinerja komputer	Membagi pengolahan menjadi beberapa bagian dalam ukuran yang lebih kecil
4	Mampu memberikan informasi orientasi dan panjang rekahan	Tidak dapat memberikan informasi spasi dan bukaan rekahan	Penggunaan TLS dengan tipe short range
5	Mampu memberikan nilai kemiringan	Tidak dapat memberikan arah kemiringan	Menggunakan instrumen pengukuran lainnya untuk dapat memperoleh keseluruhan bidang tebing dan membuat algoritma baru
6	Identifikasi dilakukan dalam bentuk point cloud secara semi-otomatis	Rekahan tidak dapat diidentifikasi secara otomatis pada seluruh bidang tebing	Pembuatan algoritma metodologi proses identifikasi rekahan

mendapatkan seluruh area tebing, diperlukan instrumen pengukuran lainnya seperti *airborne laser scanner* atau wahana pengukuran udara lainnya. Untuk mendefinisikan nilai intensitas pada batuan, diperlukan penelitian pada beragam jenis batuan untuk mengetahui rentang nilai intensitas batuannya. Untuk memperoleh data rekahan secara otomatis, diperlukan penelitian terkait metodologi proses identifikasi rekahan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) dan Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika ITB. Ucapan terima kasih kepada Bapak Agus Lukmanul Hakim dari PT. ASABA (Divisi Survei) sebagai penyedia perangkat lunak Maptek I-Site Studio. Terima kasih kepada Abdulhaq Kamil, Arnanda Aditya Budhi Aptama, dan Jaka Satria Perwana yang telah membantu proses akuisisi data rekahan di Tebing Citatah 125.

DAFTAR PUSTAKA

Brady, B. H. G. and Brown, E. T., 2004. *Rock Mechanics*, New York: Kluwer Academic

Publishers.

Herlambang, A., 2014. *Analisis Distribusi Rekahan dan Stilolyte Menggunakan Data Singkapan dan Data Sumur Pada Batugamping Formasi Rajamandala di Area Cikamuning, Padalarang, Jawa Barat, Indonesia*, Bandung: s.n.

Lucianto, A. E., Gumilar, I., Abidin, H. Z. and Haerani, N., 2015. *On the Use of Terrestrial Laser Scanner for Rock and Surface Analysis (Case Study: Citatah Cliffs 48 and 125)*. Bandung, AIP Publishing.

Maryanto, S., 2009. Pendolomitan Batugamping Formasi Rajamandala di Lintasan Gua Pawon, Bandung Barat. *Jurnal Geologi Indonesia*, September, Vol. 4(No. 3), pp. 203-213.

Shan, J. and Toth, C. K., 2009. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. Boca Raton: CRC Press.

Siregar, M. S., 2005. Sedimentas dan Model Terumbu Formasi Rajamandala di Daerah Padalarang - Jawa Barat. *RISSET - Geologi dan Pertambangan*, Jilid 15(No. 1), pp. 61-81.

Slob, S., Hack, H. R. G. K., Feng, Q., Turner, A. K., and Röshoff, K. 2007. *Fracture Mapping*

using 3D Laser Scanning Techniques.
Lisbon, Portugal, Taylor & Francis Group,
pp. 299-302.

- Soudarissanane, S. S., 2016. *The Geometry of Terrestrial Laser Scanning: Identification of Errors, Modeling and Mitigation of Scanning Geometry*, Orleans: Gilderprint.
- Toreno, E. Y., 2015. *Karakteristik dan Distribusi Rekahan Alami, Studi Analog pada Singkapan Batuan Dasar Cekungan Ombilin, Sumatra Barat*, Bandung: Institut Teknologi Bandung.