



Evaluasi Kinerja dan Keandalan Teknologi Lidar Sebagai Solusi *Monitoring* Deformasi Massa Batuan pada Tambang Bawah Tanah

Performance Evaluation and Reliability of Lidar Technology As a Solution for Monitoring Rock Mass Deformation in Underground Mines

Ilham Nurhakim

Program Studi Teknologi Pertambangan Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung
email: nhakimilham10@gmail.com

INFO ARTIKEL

ABSTRAK

Kata Kunci: Kestabilan lubang bukaan, Evaluasi LIDAR, Deformasi, *Geotech Monitoring Lidar* (GML), *C-ALS Analysis*.

Penelitian ini berfokus pada penggunaan teknologi *Light Detection and Ranging* (LIDAR) dalam pemantauan deformasi massa batuan di tambang bawah tanah. Tambang bawah tanah dengan kelas massa batuan yang rendah sering menghadapi tantangan geoteknik secara signifikan yang dapat mempengaruhi kestabilan dan keamanan operasi penambangan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja dan keandalan teknologi LIDAR melalui penggunaan instrumen *Geotech Monitoring Lidar* (GML) dalam pemantauan deformasi massa batuan di salah satu tambang bawah tanah PT XYZ yang terletak di Kabupaten Halmahera Utara, Provinsi Maluku Utara. Hasil dari penelitian ini mengungkapkan bahwa GML mampu memberikan data deformasi massa batuan dengan tingkat akurasi tinggi. Instrumen ini mampu menghasilkan data dalam bentuk *point cloud* yang memungkinkan analisis mendalam terhadap perubahan geometri dan deformasi massa batuan. Berdasarkan

hasil pemantauan menggunakan GML pada area penelitian, besar dan laju deformasi di area lubang bukaan horizontal (*bottom chamber*) dinyatakan relatif stabil menurut Cording (1974), *Ground Control Management Plan* (GCMP) PT XYZ, dan Zhenxiang (1984). Namun, penelitian ini juga mengidentifikasi beberapa keterbatasan GML, terutama dalam pemantauan lubang bukaan vertikal seperti *vertical raise*. Untuk mengatasi keterbatasan ini, peneliti merekomendasikan penggunaan instrumen C-ALS (*Cavity Auto Scanning Laser*) sebagai alternatif yang lebih efektif dalam menganalisis stabilitas lubang bukaan *vertical raise*. C-ALS memungkinkan pemantauan konvergensi yang penting untuk mengevaluasi stabilitas *raise* dengan lebih akurat. Secara keseluruhan, temuan penelitian ini menegaskan bahwa teknologi LIDAR memiliki potensi besar dalam pemantauan deformasi massa batuan di tambang bawah tanah. Namun, pemilihan instrumen yang sesuai dengan jenis lubang bukaan yang diteliti adalah langkah penting untuk memastikan pemantauan deformasi dan stabilitas yang akurat. Pemantauan yang berkelanjutan sangat penting untuk menjaga keamanan dan efisiensi operasi penambangan, khususnya dalam tambang bawah tanah dengan kelas massa batuan yang rendah. Dengan terus memperbaiki dan mengembangkan teknologi LIDAR serta instrumen pemantauannya, industri pertambangan dapat lebih efektif mengelola risiko dan meningkatkan operasi tambang bawah tanah.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords: *Underground Stability, Evaluation of LIDAR, Geotech Monitoring Lidar (GML), deformation, C-ALS Analysis.*

This research focuses on the application of Light Detection and Ranging (LIDAR) technology for monitoring deformations in underground mining. Underground mines with low rock mass rating frequently encounter significant geotechnical challenges that can have substantial implications for the stability and safety of mining. This study aims to comprehensively assess the performance and reliability of LIDAR technology through the

utilization of the Geotech Monitoring Lidar (GML) instrument in one of PT XYZ's underground mines located in North Halmahera Regency, North Maluku Province. The results of this study demonstrate that GML is highly effective in providing precise data on rock mass deformations. The instrument generates data in the form of a point cloud, allowing for detailed analysis of changes in rock mass geometry and deformations. Based on the monitoring carried out using GML, it was determined that the amount and velocity of deformations were relatively stable according to the classifications defined by Cording (1974), PT XYZ's Ground Control Management Plan (GCMP), and Zhenxiang (1984). Nonetheless, the study also identifies certain limitations of GML, particularly in the context of monitoring vertical openings like vertical raises. To address these limitations, the research recommends the adoption of the Cavity Auto Scanning Laser (C-ALS) instrument as a more effective alternative for assessing the stability of vertical raises. C-ALS enables critical convergence monitoring, enhancing the precision of raise stability evaluations. In summary, this research underscores the significant potential of LIDAR technology for monitoring rock mass deformations in underground mining operations. Nonetheless, the selection of instruments tailored to the type of opening is a critical step to ensure precise monitoring of deformations and stability. Continuous monitoring is essential for upholding mining safety and efficiency. Through ongoing enhancements and refinements in LIDAR technology, the mining industry can more effectively mitigate risks and optimize the performance of underground mining operations.

1. PENDAHULUAN

Pada area tambang bawah tanah yang memiliki sifat material dengan kelas massa batuan yang rendah, seringkali muncul indikasi masalah geoteknik yang membutuhkan perhatian khusus. Ketika lubang bukaan

dibuat pada tambang bawah tanah, tegangan alamiah pada massa batuan akan mengalami redistribusi, meninggalkan tegangan sisa sebagai dampaknya. Perilaku dan penyebaran distribusi tegangan (*stress*) dan deformasi yang terjadi akan berdampak pada kestabilan di area

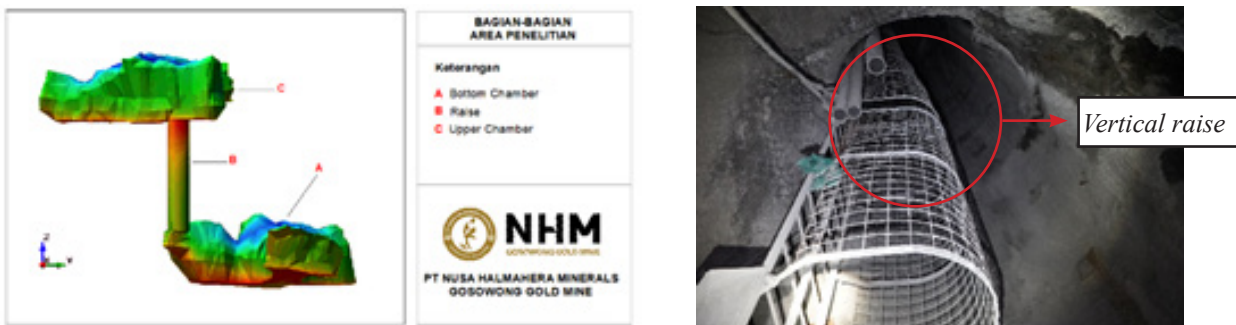
lubang bukaan. Selain itu, menurut Firaz et al., (2018), aktivitas penambangan bawah tanah, terutama di sekitar lokasi lubang bukaan akan selalu menghadapi tantangan deformasi dan ketidakstabilan pada massa batuan.

Deformasi massa batuan pada tambang bawah tanah merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi keamanan dan efisiensi operasi penambangan. Apabila penanganannya terlambat, maka akan dapat merusak infrastruktur tambang, mengganggu kegiatan produksi, atau bahkan menimbulkan korban jiwa. Oleh karena itu, *monitoring* deformasi massa batuan secara terus-menerus dan akurat sangat penting untuk mencegah dan mengatasi potensi bahaya tersebut.

Selama beberapa dekade terakhir, perkembangan teknologi pemantauan geoteknik telah menghadirkan inovasi signifikan dalam pemahaman tentang stabilitas kondisi di dalam tambang bawah tanah (Macciotta, 2021). Salah satu teknologi yang telah terbukti efisien adalah *Light Detection and Ranging*

(LIDAR), yang memungkinkan pengumpulan data yang sangat akurat mengenai perubahan geometri dan deformasi yang terjadi secara berkala di area tambang tersebut (Lee & Choi, 2019). Teknologi LIDAR adalah sebuah metode pemindaian jarak jauh berbasis laser yang mengumpulkan data titik koordinat dari permukaan suatu area dalam tiga dimensi (3D) dengan tingkat resolusi yang tinggi dan data ini sering disebut sebagai “*point cloud*” (Slaker, 2015). LIDAR adalah sebuah teknologi *optical remote sensing* yang mampu mengukur jarak serta posisi lokal dari target dengan tingkat akurasi yang tinggi (Hu, 2013). LIDAR juga memiliki keunggulan dalam hal fleksibilitas, mobilitas, dan kemampuan untuk mengukur area yang sulit dijangkau oleh metode konvensional.

Namun, teknologi LIDAR juga memiliki beberapa keterbatasan dan tantangan dalam penerapannya di tambang bawah tanah. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kinerja dan keandalan LIDAR antara lain



Gambar 1. Bagian-Bagian Area Penelitian (Dokumentasi Pribadi)

adalah geometri lubang bukaan yang bervariasi, pengambilan data, dan metode analisis yang digunakan. Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi kinerja dan keandalan teknologi LIDAR sebagai solusi *monitoring* deformasi massa batuan yang efektif pada tambang bawah tanah.

Adapun evaluasi kinerja dan keandalan teknologi LIDAR ini dilakukan berdasarkan hasil penelitian penulis yang dilakukan di salah satu tambang bawah tanah PT XYZ di Kabupaten Halmahera Utara, Provinsi Maluku Utara. Area yang menjadi fokus studi pada penelitian ini adalah lubang bukaan *egress 4* yang terdiri dari *bottom chamber*, *vertical raise*, dan *upper chamber* yang terhubung langsung dengan *egress 3* (Gambar 1). Lubang bukaan pada lokasi penelitian berada pada kedalaman 270 m di bawah permukaan yang berfungsi sebagai jalur ventilasi udara segar (*fresh air base*).

2. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja dan keandalan teknologi LIDAR dalam *monitoring* deformasi massa batuan pada tambang bawah tanah. Sebelumnya, belum pernah dilakukan kajian serupa baik terkait penelitian stabilitas pada lubang bukaan vertikal maupun evaluasi kinerja dan keandalan teknologi LIDAR pada lubang bukaan di PT XYZ. Oleh karena itu, penelitian

ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan teknologi LIDAR sebagai solusi *monitoring* deformasi massa batuan pada tambang bawah tanah. Penelitian ini juga dapat memberikan informasi yang berguna bagi para praktisi dan peneliti di bidang penambangan bawah tanah tentang potensi, manfaat, dan tantangan dari teknologi LIDAR.

Penelitian ini menggunakan data LIDAR yang diperoleh dari hasil penelitian penulis sebelumnya yang dilakukan di salah satu tambang bawah tanah PT XYZ. Pada penelitian ini digunakan instrumen *Geotech Monitoring Lidar* (GML). Data LIDAR dianalisis secara otomatis menggunakan *software* instrumen dengan membandingkan besar dan laju deformasi dari setiap hasil *monitoring*. Selain itu, penelitian ini juga akan mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja dan keandalan LIDAR serta memberikan rekomendasi untuk meningkatkan kualitas pengukuran LIDAR di tambang bawah tanah.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini, penulis membagi metodologi penelitian yang terdiri dari empat tahap, yaitu:

3.1. Pengambilan data LIDAR

Tahap ini dilakukan dengan menggunakan instrumen GML yang dipasang di salah satu area lubang bukaan tambang bawah tanah PT

XYZ. Instrumen GML dapat mengukur besar dan laju deformasi massa batuan berdasarkan jarak antara sensor dan permukaan massa batuan dengan menggunakan laser. GML yang digunakan merupakan produk dari GroundProbe. Adapun Gambar 2 menunjukkan bagian-bagian dari instrumen GML.

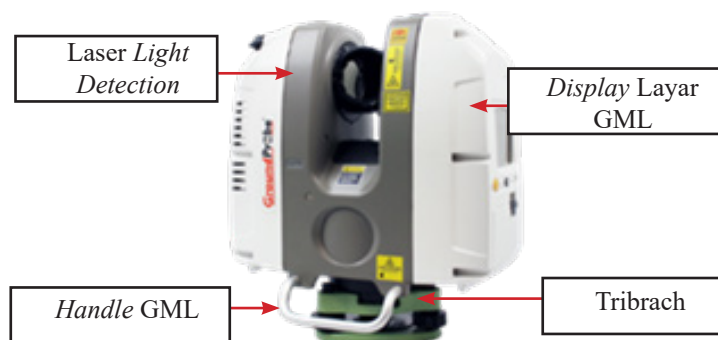
Untuk mendapatkan data yang besar dan kecepatan deformasi yang tinggi di area lokasi penelitian, langkah-langkah pengukuran berikut ini dilakukan menggunakan *Geotech Monitoring Lidar* (GML):

1. Pemasangan *target point* pada bagian dinding dilakukan sebagai langkah pertama.
2. Tripod dipasang dan diatur sehingga berada dalam posisi pusat dengan ketelitian minimal 30 detik.
3. Folder penyimpanan hasil pemindaian *monitoring* dibuat.

4. Data dari titik target yang telah dipasang sebelumnya diambil, dan proses pemindaian (*scanning*) dilakukan.

Pemantauan deformasi pada area *bottom chamber egress 4* dilaksanakan dengan menggunakan GML selama periode 25 hari, mulai dari tanggal 17 Januari hingga 10 Februari 2023. Proses ini melibatkan enam kali pemindaian. Di dalam area *egress 4*, empat titik target dipasang untuk memantau deformasi pada lubang bukaan area *bottom chamber*. Tujuan dari penempatan titik-titik target ini adalah untuk mengurangi faktor koreksi yang diperlukan saat membaca hasil dari GML (Hu, 2013).

Mekanisme kerja LIDAR melibatkan pemindaian area tertentu pada interval waktu tertentu. Hasil pemindaian ini kemudian diukur, dibandingkan, dan dianalisis untuk



Gambar 2. *Geotech Monitoring Lidar* (GML)
(GroundProbe, 2023)

mendapatkan informasi tentang besarnya deformasi maksimum. Stabilitas lubang bukaan dievaluasi berdasarkan data pemantauan mengenai besar dan kecepatan deformasi maksimum.

3.2. Pengolahan data LIDAR

Tahap ini dilakukan dengan menggunakan software instrumen yang dapat mengolah data LIDAR secara otomatis. Software instrumen dapat mengkonversi data LIDAR menjadi data spasial 3D dengan resolusi tinggi. Software instrumen juga dapat melakukan registrasi data LIDAR dari berbagai waktu dan posisi untuk mendapatkan data LIDAR terpadu. Selain itu, software instrumen dapat melakukan koreksi geometrik dan atmosferik pada data LIDAR untuk menghilangkan distorsi dan gangguan yang mungkin terjadi.

3.3. Analisis Deformasi Massa Batuan

Tahap ini dilakukan dengan menggunakan *software* instrumen *Geotech Monitoring Lidar* (GML) yang dapat menganalisis data LIDAR secara terpadu untuk menghitung besar dan laju deformasi massa batuan. *Software* pada instrumen tersebut dapat membandingkan data LIDAR dari waktu ke waktu untuk mendeteksi perubahan geometri pada permukaan massa batuan di area lubang bukaan. Hasil analisis deformasi massa batuan akan ditampilkan dalam bentuk grafik.

3.4. Evaluasi kinerja dan keandalan LIDAR

Tahap ini dilakukan dengan menganalisis hasil pengukuran dan mengamati kondisi lapangan selama monitoring berlangsung. Dari tahap ini, diperoleh informasi tentang keterbatasan GML sebagai bahan perbaikan dalam monitoring deformasi massa batuan pada tambang bawah tanah dengan berbagai jenis lubang bukaan. Selain itu, tahap ini juga akan memberikan rekomendasi untuk meningkatkan kualitas pengukuran LIDAR di tambang bawah tanah.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Indikasi Ketidakstabilan dan Karakteristik Batuan

Di bawah ini adalah informasi yang diperoleh dari pengumpulan data mengenai tanda-tanda potensi ketidakstabilan dan karakteristik batuan di lokasi penelitian.

a. Indikasi Ketidakstabilan Area Penelitian

Terdapat beberapa indikasi ketidakstabilan yang mencakup *unravelling shotcrete* di area dinding *bottom chamber* dan munculnya tetesan air tanah dekat *bottom raise*. Kondisi ini telah menyebabkan penurunan kemampuan penyanggaan dan kekuatan properti material batuan. Indikasi-indikasi ini dapat dilihat pada Gambar 3.

Melalui pengamatan langsung di lokasi



Gambar 3 *Unravelling Shotcrete* di Area *Bottom Chamber* (Gambar A) dan Tetesan Air Tanah di Dekat *Vertical Raise* (Gambar B) (Dokumentasi Pribadi)

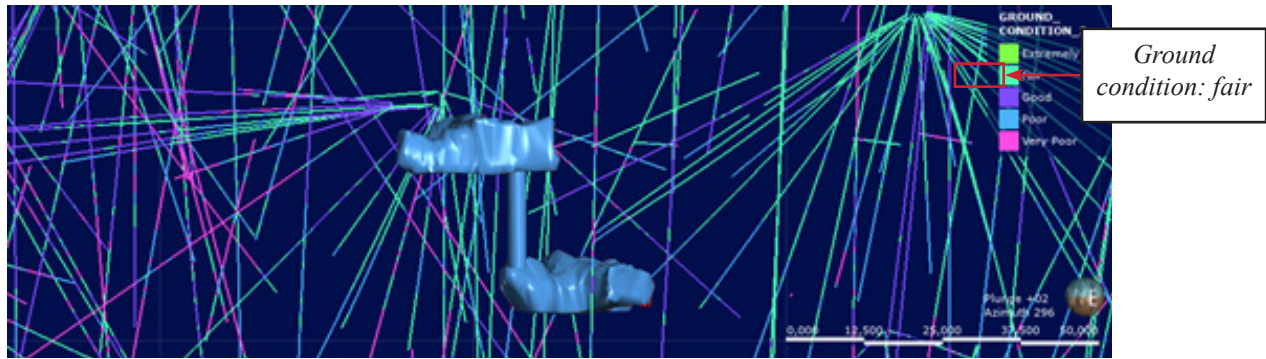
penelitian, ditemukan beberapa retak (*crack*) pada lapisan *shotcrete* yang jatuh dan tertahan oleh *wire mesh*. Di beberapa titik lainnya, *wire mesh* patah karena tidak mampu menahan beban dari retakan pada *shotcrete* yang jatuh. Indikasi ini dikenal sebagai *unravelling shotcrete*, yang merupakan tanda awal ketidakstabilan. Beberapa faktor dapat menyebabkan munculnya indikasi ketidakstabilan ini, salah satunya adalah penurunan kemampuan penyanggaan akibat hilangnya efek pembatasan (*confinement effect*). Hilangnya *confinement effect* ini bisa disebabkan oleh deformasi atau adanya infiltrasi air tanah yang terjadi di area penelitian.

b. Rock Mass Rating (RMR)

Informasi mengenai klasifikasi massa batuan dengan metode *Rock Mass Rating* (RMR) diperoleh melalui kajian yang dilakukan oleh Departemen *Technical Service* PT XYZ

menggunakan teknik pengeboran geoteknik. Melalui hasil pengeboran geoteknik tersebut, selanjutnya diperoleh nilai RMR secara keseluruhan yang ada pada area *Egress 4*. Data tersebut kemudian diproses menggunakan perangkat lunak *Leapfrog Geo* untuk menghasilkan model geologi yang mencakup informasi tentang kelas massa batuan di lokasi penelitian, sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 4. Berdasarkan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Rusmansyah (2009), jenis massa batuan di lokasi penelitian yaitu andesit.

Klasifikasi kondisi batuan dilakukan secara lokal di Tambang Bawah Tanah XYZ dengan menggunakan sistem RMR1976 serta observasi kondisi lubang bukaan di lokasi penelitian. Data RMR diperoleh berdasarkan data sekunder pengeboran geoteknik yang dilakukan oleh PT XYZ. Berdasarkan informasi yang tercantum dalam Gambar 4, dapat disimpulkan bahwa bobot massa batuan di *Egress 4* masuk ke dalam



Gambar 4. Ground Condition Egress 4 (Dokumentasi Pribadi)

kelas massa batuan tipe II, yang dikenal sebagai “*fair rock*” (Departemen Technical Service PT XYZ, 2017). Informasi terkait kelas massa batuan pada area penelitian ini merupakan informasi penting dalam pemahaman lebih lanjut tentang stabilitas dan geoteknik di area tersebut.

4.2. Monitoring Deformasi Batuan

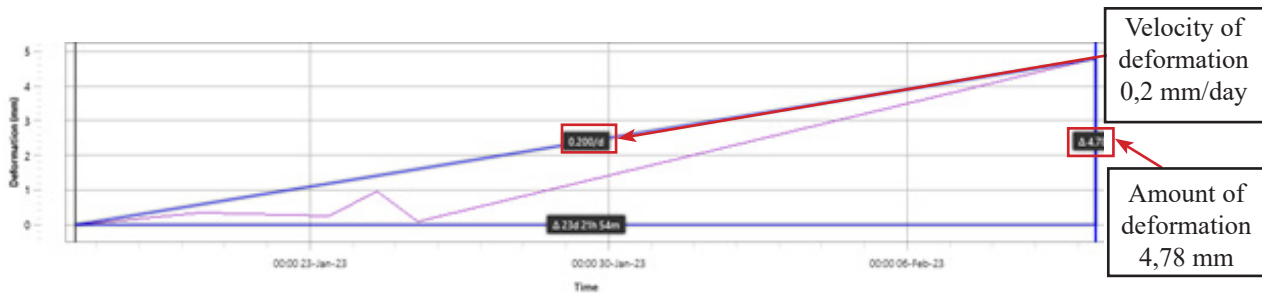
Hasil pemindaian (*scanning*) *monitoring* menggunakan GML menghasilkan data *point cloud* dengan jutaan koordinat. Setiap titik dalam data *point cloud* ini memiliki koordinat x, y, dan z yang tercatat. Tabel 1 berikut ini

memuat beberapa contoh data koordinat yang diperoleh dari pemantauan menggunakan GML:

Setiap pergerakan titik dapat terdeteksi dengan akurat saat data tersebut dibandingkan dengan hasil pemantauan sebelumnya melalui pengolahan data menggunakan perangkat lunak *GroundProbe*. Hasil pemantauan ini disimpan dalam folder penyimpanan khusus yang terkait dengan lokasi penelitian, memungkinkan akumulasi semua data *point cloud* untuk selanjutnya diproses menggunakan perangkat lunak *GroundProbe*. Melalui pengolahan data monitoring, kita dapat menghitung besar dan

Tabel 1. Sampel Koordinat Hasil *Monitoring* GML

| No | X | Y | Z |
|----|---------|--------|---------|
| 1 | -0.0002 | 14.828 | -14.456 |
| 2 | -0.0002 | 14.912 | -14.504 |
| 3 | -0.0002 | 14.942 | -14.494 |
| 4 | -0.0002 | 1.498 | -14.498 |
| 5 | -0.0002 | 1.497 | -14.448 |



Gambar 5. Chart Besar dan Laju Deformasi Berdasarkan GML (Dokumentasi Pribadi)

laju deformasi pada titik yang mengalami pergerakan maksimum di area lokasi penelitian. Proses ini dilakukan secara otomatis dengan bantuan perangkat lunak *GroundProbe*. Dari pengolahan data tersebut, ditemukan bahwa besar deformasi maksimum mencapai 4,78 mm dengan laju deformasi sebesar 0,2 mm per hari (lihat Gambar 5).

Pemantauan menggunakan *Geotech Monitoring Lidar* (GML) telah memberikan wawasan yang sangat berharga tentang besar dan laju deformasi di area *bottom chamber egress 4*. Data yang dihasilkan dalam bentuk data *point cloud* dengan jutaan koordinat telah memungkinkan untuk melacak pergerakan titik dengan akurasi tinggi. Dari hasil pemantauan, terlihat bahwa pergerakan maksimum di *front wall area bottom chamber* mencapai 4,78 mm dengan laju deformasi sebesar 0,2 mm per hari. Deformasi tersebut termasuk ke dalam kategori sangat kecil dan relatif stabil menurut klasifikasi Cording pada 1974 yang dikutip oleh Hulwani et al., (2022), *Ground Control Management Plan* (GCMP) PT XYZ, dan

(Zhenxiang, 1984). Ini adalah informasi yang sangat penting dalam mengevaluasi stabilitas di lokasi penelitian.

Namun, saat menginterpretasikan hasil pemantauan, diperoleh informasi bahwa GML memiliki keterbatasan dalam pemantauan deformasi pada lubang bukaan vertikal seperti *vertical raise* di *egress 4*. Meskipun GML sangat efektif dalam memantau deformasi di permukaan batuan datar, keberadaan lubang bukaan vertikal seperti *vertical raise* dapat menjadi tantangan karena GML tidak dapat langsung mengakses area tersebut. Oleh karena itu, penting untuk menyadari bahwa hasil pemantauan dengan GML hanya mencakup area yang dapat dijangkau oleh alat pemindaian. Area yang tidak dapat dijangkau oleh GML, seperti *vertical raise*, memerlukan metode pemantauan tambahan yang lebih spesifik untuk mengukur deformasi di dalamnya. Ini mungkin termasuk penggunaan alat pemantauan lain yang dirancang khusus untuk lingkungan seperti itu.

Meskipun hasil pemantauan menunjukkan

bahwa area *bottom chamber egress* 4 saat ini dinyatakan stabil, perlu diingat bahwa pemantauan harus tetap dilakukan secara rutin untuk memastikan bahwa kondisi tersebut tetap terkendali. Hal ini khususnya penting mengingat keterbatasan GML dalam pemantauan deformasi di area-area tertentu. Pemantauan yang berkelanjutan akan membantu memastikan bahwa area *bottom chamber* tetap aman dalam jangka waktu yang lebih panjang.

4.3. Evaluasi Kinerja Teknologi LIDAR

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, diperlukan suatu evaluasi terkait kinerja instrumen GML agar kebutuhan untuk analisis deformasi massa batuan pada lubang bukaan dapat diperoleh secara efektif dan efisien sesuai dengan jenis lubang bukaan yang dilakukan pemantauan. Teknologi LIDAR pada instrument GML telah membuktikan diri sebagai alat yang sangat efektif dalam pemantauan deformasi dan stabilitas di Tambang Bawah Tanah PT XYZ. Keunggulan utama LIDAR mencakup:

- a. Fleksibilitas: LIDAR memiliki kemampuan untuk memantau perubahan dalam bentuk tiga dimensi pada area yang luas dan kompleks. Ini memungkinkan pemantauan yang sangat mendetail pada lokasi penelitian, termasuk pengukuran deformasi dan pergeseran batuan dengan presisi tinggi.
- b. Mobilitas: Alat pemantauan LIDAR dapat

dipindahkan dengan relatif mudah ke berbagai lokasi di dalam tambang bawah tanah. Ini memungkinkan pemantauan yang lebih luas dan dapat diakses di berbagai bagian tambang.

- c. Kemampuan Mengukur Area Sulit dijangkau: Salah satu keunggulan utama LIDAR adalah kemampuannya untuk mengukur area yang sulit dijangkau atau berbahaya bagi manusia. Dengan menggunakan instrumen GML, kita dapat memantau area-area yang mungkin sulit dijangkau oleh tenaga manusia, seperti *bottom chamber*, dengan aman dan efisien.
- d. Menyajikan hasil evaluasi kinerja dan keandalan teknologi LIDAR berdasarkan data yang diperoleh dari penelitian di Tambang Bawah Tanah PT XYZ.

Dalam rangka mengevaluasi kinerja instrumen GML, maka diperlukan juga untuk menganalisis faktor-faktor yang menjadi tantangan, keterbatasan, serta mempengaruhi kinerja dan keandalan instrument GML. Terdapat beberapa faktor yang dapat memengaruhi kinerja dan keandalan teknologi LIDAR di lingkungan tambang bawah tanah, termasuk:

- a. Geometri lubang bukaan yang beragam: Bentuk dan karakteristik lubang bukaan tambang dapat beragam, sehingga mengharuskan penyesuaian pemindaian dan pengaturan instrumen LIDAR yang

berbeda. Ini dapat mempengaruhi akurasi hasil pemantauan.

- b. Pengambilan data yang konsisten: Konsistensi dalam pengambilan data selama pemantauan sangat penting. Gangguan atau perubahan dalam pengaturan pemindaian dapat memengaruhi hasil dan menghasilkan data yang tidak konsisten.
- c. Metode analisis yang tepat: Pemilihan metode analisis yang tepat sangat penting. Kesalahan dalam metode analisis dapat menghasilkan interpretasi yang tidak akurat tentang deformasi dan stabilitas massa batuan.
- d. Interferensi sinyal: Interferensi sinyal dari faktor-faktor lingkungan seperti debu, uap air, atau penghalang fisik dapat memengaruhi kinerja LIDAR dan mengganggu pengumpulan data yang akurat.
- e. Perawatan dan kalibrasi: Perawatan dan kalibrasi rutin pada instrumen LIDAR sangat penting untuk menjaga keandalan alat dan akurasi hasil pemantauan.

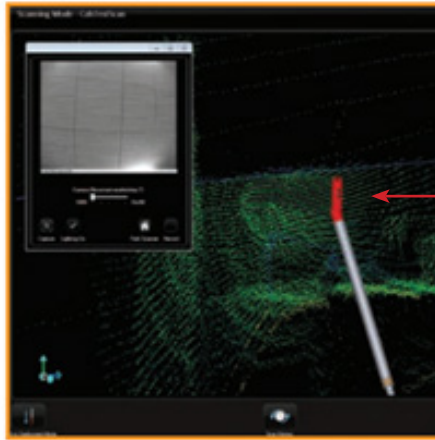
4.4. Tantangan Pemantauan Deformasi pada *Vertical Raise*

Selain pemantauan di area *bottom chamber*, dalam penelitian ini juga dilakukan upaya untuk memanfaatkan teknologi LIDAR melalui instrumen GML guna memonitor *vertical raise* di lokasi penelitian. Namun, hasil penelitian

menyimpulkan bahwa teknologi LIDAR pada GML ternyata tidak cukup efektif dalam menganalisis deformasi pada jenis lubang bukaan *vertical raise* yang khas di lokasi tersebut. Hal ini disebabkan oleh perbedaan karakteristik antara jenis lubang bukaan vertikal dan horizontal, di mana parameter penilaian stabilitasnya terfokus pada dinding (*wall*) *vertical raise*, yang tidak memiliki atap (*roof*) seperti lubang bukaan *horizontal bottom chamber*. Oleh karena itu, sistem kinerja yang dimiliki oleh instrumen GML tidak sesuai untuk analisis stabilitas berdasarkan deformasi pada jenis lubang bukaan *vertical raise*.

Sebagai solusi, maka direkomendasikan untuk mencoba uji coba (*trial*) penggunaan instrumen C-ALS (*Cavity Auto Scanning Laser*) untuk menganalisis stabilitas pada *vertical raise*. Instrumen ini memungkinkan pemantauan deformasi dengan cara membandingkan geometri awal dan akhir dari lubang bukaan *raise*. Dengan menggunakan C-ALS, maka dapat diukur besar konvergensi (*convergence*) yang dialami oleh lubang bukaan *raise*, yang merupakan parameter kunci untuk mengevaluasi stabilitasnya.

Perkembangan penggunaan metode laser secara tiga dimensi semakin canggih dan digunakan dalam berbagai kebutuhan industri tambang. Salah satunya yaitu penggunaan 3D *cavity detection* dalam instrumen C-ALS. Instrumen C-ALS (*Cavity Auto Scanning Laser*)



Point Cloud
Data

Gambar 6
C-ALS Instrument
(Renishaw, 2014)

adalah alat pemantauan yang dikembangkan khusus untuk analisis stabilitas pada lubang bukaan vertikal seperti *vertical raise* di lingkungan tambang bawah tanah. Instrumen ini bekerja dengan prinsip pemindaian laser yang otomatis dengan menghasilkan *point cloud data* yang akurat untuk mengukur geometri lubang bukaan secara berkala. Penggunaan C-ALS dalam industri pertambangan terbukti efektif dan sudah mulai banyak digunakan seperti dalam penelitian terkait pengaplikasian C-ALS untuk mendeteksi dan memodelkan geometri lubang bukaan tambang bawah tanah yang dilakukan oleh XI-ling, dkk pada tahun 2008.

Penggunaan instrumen yang sesuai dengan jenis lubang bukaan yang diteliti adalah langkah penting dalam memastikan pemantauan deformasi dan stabilitas yang akurat. Khususnya di lingkungan tambang bawah tanah yang memiliki geometri dan jenis

lubang bukaan yang beragam. Rekomendasi untuk menggunakan C-ALS sebagai alternatif teknologi pemantauan adalah langkah yang sangat tepat untuk mencapai tujuan tersebut.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan berdasarkan penelitian penggunaan teknologi LIDAR pada instrumen GML, diperoleh beberapa kesimpulan terkait evaluasi kinerja dan keandalan instrumen tersebut sebagai berikut:

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi LIDAR, khususnya GML, dapat digunakan untuk memantau deformasi massa batuan dalam kondisi tambang bawah tanah. Hasil pemantauan menyediakan data deformasi secara akurat dan memberikan gambaran yang jelas tentang perubahan massa batuan seiring waktu. Deformasi yang diamati di lokasi penelitian, terutama di area *bottom chamber*,

berada dalam kategori deformasi yang aman berdasarkan standar *Ground Control Management Plan* PT XYZ.

Penelitian ini juga mengidentifikasi bahwa teknologi LIDAR pada instrumen GML memiliki keterbatasan dalam menganalisis deformasi pada jenis lubang bukaan *vertical raise* yang khas di lokasi penelitian. Oleh karena itu, rekomendasi diberikan untuk menggunakan instrumen C-ALS (*Cavity Auto Scanning Laser*) sebagai alternatif untuk menganalisis stabilitas *raise* dengan lebih efektif.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Departemen Technical Service PT XYZ. (2017). *Ground Control Management Plan (GCMP) Tambang Bawah Tanah Kencana*. PT NHM.
- Firaz, F. M., Lewier, E. S., Killo, K. L., & Yusias, A. e. (2018). Analisis Kestabilan Lubang Bukaan Tambang Bawah Tanah Menggunakan Metode Elmen Hingga. *Bulletin of Scientific Contribution: GEOLOGY*, 205-212.
- GroundProbe. (2023, 11 01). *GroundProbe* . Retrieved from LIDAR: <https://www.groundprobe.com/lidar/>
- Hu, H. (2013). Deformation monitoring and modeling based on LiDAR data for slope stability assessment Von der Fakultät für Georesourcen und Materialtechnik der Rheinisch -Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors de. 16-17.
- Hulwani, Z., Sulistianto, B., Widodo, N. P., Septiyanto, E., & Musyafiq, A. N. (2022). Analisis Kestabilan Terowongan Menggunakan Data Pemantauan Deformasi Massa Batuan Dengan Total Station Pada Terowongan Kereta Api Notog. *Jurnal GEOSAPTA*, 45.
- Lee, S. J., & Choi, S. O. (2019). Analyzing the Stability of Underground Mines Using 3D Point Cloud Data and Discontinuum Numerical Analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 1-20.
- Macciotta, R. (2021). Remote sensing applications for landslide monitoring and investigation in western canada. *Remote Sensing*, 1-23.
- Renishaw. (2014). *Cavity Auto-scanning Laser System Plan new projects*.
- Rusmansyah. (2009). Analisis Kestabilan Lubang Bukaan Di Sub 7 dan Sub 8 Sebagai Lubang Undercut Untuk Metode Penambangan Underhand Cut & Fill di Daerah Kencana Oleh PT Nusa Halmahera Mineral Kabupaten Halmahera Utara Provinsi Maluku Utara. *Institut Teknologi Bandung*, 10-23.

- Slaker, B. A. (2015). Monitoring underground mine displacement using photogrammetry and laser scanning. *Virginia Polytechnic Institute and State University*, 144.
- XI-ling, L., Xi-bing, L., Fa-bent, L., Guo-yan, Z., & Yu-hui, Q. (2008). 3D cavity detection technique and its application based on cavity auto scanning laser system. *Journal of Central South University of Technology*, 285-288.
- Zhenxiang, X. (1984). Tunnel Design Method Using Field Measurement Data. 221-229.