

Deteksi Deformasi Vertikal Permukaan Jembatan Mulya Agung Tahun 2021 – 2022 Menggunakan Data Mobile Laser Scanner

Wulan Ratna Mayangsari^a Ruli Andaru^b

^aTeknologi Survei dan Pemetaan Dasar, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Indonesia
^bTeknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Research Article

DOI:

10.22146/jgst.v3i1.10253

correspondence:

wulanratna@mail.ugm.ac.id

Article history:

Received:

24-10-2023

Accepted:

31-07-2025

Published:

31-07-2025

ABSTRACT

The Terbanggi Besar - Pematang Panggang - Kayu Agung Toll Road (TBPPKA) is a part of the Trans-Sumatra Toll Road (JTTS) that has been operational since November 2019, necessitating road maintenance. Routine maintenance is carried out on all toll road assets, including the Mulya Agung Underpass Bridge on the TBPPKA Toll Road at KM 240+822. This study aims to analyze vertical deformations on the bridge's surface using Mobile Laser Scanner (MLS) as a step in bridge monitoring and maintenance efforts. MLS technology was chosen for its capability in fast and accurate scanning, making it effective for multi-epoch measurements. Data generated from the MLS measurements come in the form of a point cloud, which still needs to be registered using the Iterative Closest Point (ICP) method to ensure the data is in the same coordinate system. Based on the research results, the RMS accuracy value in the registration process is 0.021 meters out of a total of 596,963 points sampled. To determine the presence of vertical deformation, a significant test was conducted using the Student's t-test. Based on the significant test results with a 95% confidence level, the calculated t-value (2.705) was found to be greater than the tabulated t-value (2.010), indicating a significant change in elevation. The maximum elevation increase is 9.1 cm on the south side of the bridge, while the minimum decrease is -3.4 cm on the north side of the bridge. Vertical deformations occur at the end of the bridge connected to the road, which is attributed to repairs involving asphalt addition. The MLS method has proven to be effective in detecting vertical deformations on the bridge with a level of detection of 2 cm.

Keywords: toll road, underpass bridges, vertical deformation, Mobile Laser Scanner, Iterative Closest Point

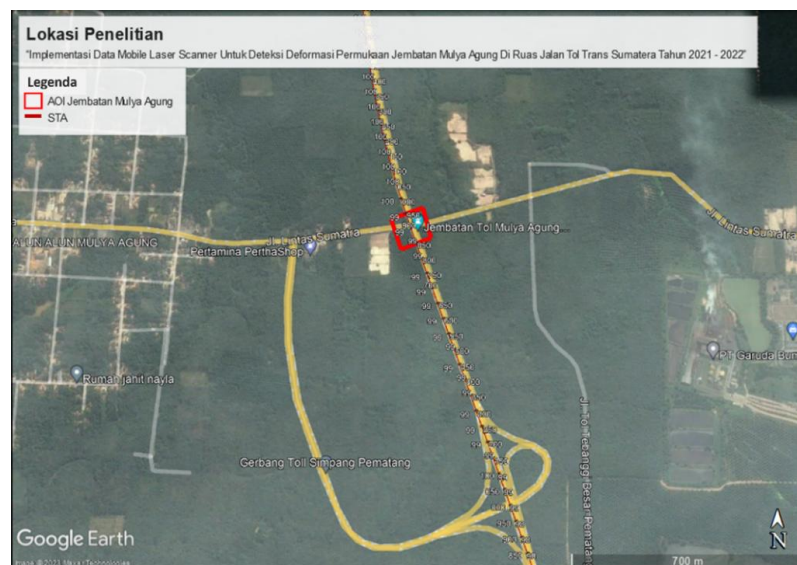
INTISARI

Ruas Jalan Tol Terbanggi Besar - Pematang Panggang - Kayu Agung (TBPPKA) adalah bagian dari Jalan Tol Trans Sumatera (JTTS) yang beroperasi sejak November, Tahun 2019. Ruas jalan tol tersebut mengharuskan adanya pemeliharaan jalan. Pemeliharaan rutin dilakukan pada seluruh aset jalan tol salah satunya Jembatan *Underpass* Mulya Agung di Ruas Tol TBPPKA KM 240+822. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis deformasi vertikal pada permukaan jembatan dengan menggunakan Mobile Lasers Scanner (MLS) sebagai langkah dalam upaya pemantauan dan pemeliharaan jembatan. Teknologi MLS dipilih karena kemampuannya dalam pemindaian yang cepat dan akurat sehingga efektif untuk digunakan dalam pengukuran multi-epoch. Data yang dihasilkan dari pengukuran MLS berupa data *point cloud* yang masih perlu dilakukan registrasi menggunakan metode *Iterative Closest Point* (ICP) untuk memastikan data berada pada sistem koordinat yang sama. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan akurasi nilai *RMS* pada proses registrasi sebesar 0,021 m dari total 596.963 points sampling. Untuk mengetahui adanya deformasi vertikal atau tidak, dilakukan uji signifikan menggunakan *Student's t-test*. Berdasarkan hasil uji signifikan dengan tingkat kepercayaan 95%, diperoleh nilai t-hitungan (2,705) yang nilainya lebih besar dari t-tabel (2,010) yang mengindikasikan adanya perubahan elevasi secara signifikan. Nilai maksimum kenaikan elevasi adalah 9,1 cm di sisi selatan jembatan, sedangkan penurunan minimum adalah -3,4 cm di sisi utara jembatan. Deformasi vertikal terjadi di ujung jembatan yang tersambung dengan jalan, yang terjadi karena perbaikan dengan penambahan aspal. Metode MLS terbukti efektif dalam mendeteksi deformasi vertikal pada jembatan dengan level of detection sebesar 2 cm.

Kata kunci: jalan tol, jembatan *underpass*, deformasi vertikal, Mobile Laser Scanner, *Iterative Closest Point*

1. Pendahuluan

Jembatan Mulya Agung merupakan salah satu aset jalan tol yang terletak di Ruas Tol TBPPKA KM 240+822 dengan lokasi yang ditunjukkan pada Gambar 1. Jembatan tersebut termasuk jenis jembatan *underpass* yang memiliki terowongan pada bagian bawahnya. Jembatan ini termasuk salah satu aset jalan tol yang krusial karena penggunaannya yang luas dan peran pentingnya sebagai bagian utama dari jaringan infrastruktur. Pemeliharaan jembatan dengan pemantauan secara berkala menjadi penting untuk memastikan kondisi jembatan karena kondisinya yang bisa berubah karena potensi beban berat yang melintas dan faktor lainnya (Schlögl dkk., 2022). Karena hal tersebut, maka dalam jangka panjang permukaan jembatan dapat mengalami deformasi vertikal, sehingga penting untuk melakukan pemantauan guna memastikan bahwa aset tersebut selalu dalam kondisi yang baik dan dapat berfungsi secara optimal.



Gambar 1. Lokasi Jembatan Mulya Agung. Kotak merah merupakan lokasi dari jembatan yang akan dilakukan penelitian.

Terdapat beberapa teknologi pemindai laser yang dapat digunakan untuk pemantauan jembatan dan jalan tol, seperti *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) dan *Mobile Laser Scanner* (MLS). Teknologi TLS mampu menciptakan model struktur jembatan dan jalan dengan akurasi tinggi melalui pengukuran *non*-kontak, menghasilkan data *point cloud* dengan resolusi spasial yang tinggi, dan melakukannya dengan cepat (Liu dkk., 2020). Namun, pada pemantauan jalan tol yang panjang, diperlukan teknologi yang dapat mempercepat proses akuisisi data, dan dalam konteks ini, teknologi TLS mungkin kurang efisien. Sebagai alternatif, digunakan teknologi *Mobile Laser Scanner* (MLS), yang merupakan pengembangan dari sistem pemindai laser yang terpasang pada kendaraan bergerak, seperti mobil. Teknologi ini memiliki kemampuan untuk menghasilkan data dengan cepat, menghasilkan data dalam bentuk *point cloud* 3D dengan kerapatan tinggi, dan menyediakan informasi yang lengkap tentang objek yang dipindai (Puente dkk., 2013). MLS hanya dapat merekam objek yang terletak pada permukaan. Oleh karena itu, teknologi MLS menjadi solusi yang efektif dalam pemeliharaan jalan tol dan jembatan, karena mampu melakukan pemindaian data dalam waktu yang singkat, terutama diperlukan dalam situasi pemantauan jalan tol dan jembatan yang panjang.

Dalam penggunaan data MLS untuk mendeteksi deformasi vertikal, ditemukan kesenjangan antara dua data MLS yang menyebabkan perubahan elevasi yang signifikan, bahkan melebihi. Oleh karena itu, registrasi diperlukan untuk mengatasi kesenjangan ini (Liu dkk., 2020). Beberapa metode tersedia untuk meregistrasi data *point cloud*, termasuk metode *point sampling* dan *Iterative Closest Point* (ICP). Dalam metode *point sampling*, titik-titik sampel dibuat untuk menghasilkan perbedaan elevasi yang akan digunakan untuk koreksi data (Rahmadiansyah, 2022). Namun, metode ini melibatkan proses manual dan perhitungan terpisah, sehingga kurang efisien dalam registrasi data *point cloud*. Di sisi lain, registrasi *point cloud* dengan metode *Iterative Closest Point* (ICP) melibatkan proses otomatisasi dengan parameter-parameter seperti tumpang tindih akhir yang diharapkan, jumlah iterasi, serta pengaturan translasi dan rotasi. Meskipun parameter ini memerlukan penyesuaian *trial and error*, metode ini lebih efisien dalam memproses data karena otomatisasi perangkat lunak, sehingga dapat

mengatasi kesenjangan dan menggabungkan data *point cloud* MLS dua *epoch* dengan cepat (Liu dkk., 2020). Oleh karena itu, dalam penelitian ini, analisis deformasi vertikal pada permukaan Jembatan Mulya Agung akan dilakukan menggunakan data dari pengukuran MLS sebagai bagian dari upaya pemantauan dan pemeliharaan jembatan.

1.1. Jembatan Underpass

Jembatan merupakan suatu bagian dari konstruksi yang digunakan untuk meneruskan jalan yang melalui suatu halangan dengan posisinya yang lebih rendah. Halangan ini dapat berupa sungai ataupun jalan raya (Pasaribu dkk., 2019). *Underpass* sendiri merupakan jalan melintang yang berada di bawah suatu jembatan atau jalan yang digunakan sebagai jalur alternatif guna mengurangi kemacetan. Gambar jembatan *underpass* dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Jembatan *Underpass*.

Salah satu peran penting jembatan sebagai bangunan pelengkap jalan adalah menjaga kelancaran koneksi antara ruas jalan yang berbeda. Oleh karena itu, sangat penting bahwa bangunan jembatan memiliki fungsi yang baik sebagai pelengkap jalan. Pada Ruas Tol TBPKKA, termasuk di dalamnya objek jembatan, dilakukan pemeriksaan rutin setiap tahun untuk memastikan struktur jembatan masih aman untuk lalu lintas serta memastikan tidak timbul suatu kondisi yang tidak lazim sehingga membutuhkan penyelidikan, pemeliharaan, atau penanganan darurat yang muncul dari tahun sebelumnya serta memastikan bahwa pemeliharaan rutin telah dilakukan secara efektif di jembatan tersebut (Wardana dkk., 2005).

1.2. Deformasi Vertikal Permukaan

Deformasi merujuk pada perubahan bentuk, posisi, dan dimensi suatu objek (Kuang, 1996). Dalam konteks ini, deformasi juga dapat diartikan sebagai perubahan posisi atau bentuk dari titik yang diamati, baik secara absolut atau relatif. Jika pergerakan titik diamati berdasarkan perilakunya sendiri disebut sebagai gerakan absolut, sedangkan jika dilihat dari titik lain disebut sebagai gerakan relatif (Prawir et al. 2019). Deformasi vertikal yang terjadi pada jalan maupun jembatan biasanya terjadi karena distribusi beban lalu lintas berupa umur dari jalan, kekuatan serta kualitas dari jalan itu sendiri. Pada permukaan jalan dan jembatan, deformasi vertikal terdeteksi pada bagian permukaan (perkerasan jalan) yang mengalami kerusakan.

1.3. Iterative Closest Point (ICP)

Algoritma *Iterative Closest Point* (ICP) merupakan metode registrasi data *point cloud* yang banyak digunakan untuk meregistrasi *point cloud* yang tidak beraturan (Oskin dkk., 2012). Pada dasarnya, konsep dari ICP ini adalah melakukan rotasi dan translasi dari transformasi rigid secara *iterative* guna meminimalkan jarak antara pasangan titik terdekat (Rajendra dkk., 2014).

Pada satu set data *point cloud*, transformasi rigid dapat dinyatakan dalam matriks rotasi R (t_x , t_y , t_z) dan matriks translasi T (α , β , γ), yang mengubah *point cloud* pada posisi dan jarak (Rajendra dkk., 2014). Dalam ruang 3D, matriks rotasi (R) dan translasi (T) dapat dinyatakan dalam persamaan 1 berikut.

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T = [t_x \quad t_y \quad t_z]$$

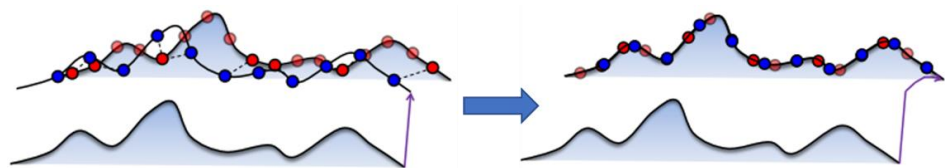
Dalam hal ini, α, β, γ : sudut perpindahan rotasi sepanjang X, Y, Z dan t_x, t_y, t_z : besar perpindahan.

Metode ICP menggunakan fungsi kesalahan untuk menghitung rotasi (R) dan translasi (T) antara p_i dan q_i dengan meminimalkan jumlah dari kuadrat jarak (Jafari, 2016). Rumus fungsi eror yang digunakan dalam metode ICP disajikan dalam persamaan 2 sebagai berikut.

$$E(R, t) = \min_{R, t} \sum_i \|p_i - (Rq_i + t)\|^2 \quad (2)$$

Dalam hal ini, $p_i \in P$: titik dari *point cloud* 3D referensi dan $q_i \in Q$: titik dari *point cloud* target.

Tahapan ini melibatkan rekonstruksi manual secara parsial tergantung dengan kasar atau halusny kesesuaian yang diinginkan. Banyak sedikitnya iterasi yang digunakan akan mempengaruhi kesesuaian jarak antara P dan Q (Jafari, 2016). Gambar 3 menunjukkan hasil dari pemrosesan menggunakan algoritma ICP dengan beberapa proses iterasi.



Gambar 3. Hasil dari algoritma *Iterative Closest Point* (ICP).

1.4. Uji Student's t-test

Untuk mengetahui perubahan signifikan terhadap data elevasi dilakukan dengan menggunakan metode *Student's t-test*. Syarat untuk menggunakan uji t (*test dependent*) adalah uji perbandingan antara dua pengamatan berpasangan seperti sebelum dan sesudah. Selain itu, pada pengujian parametrik memiliki ketentuan bahwa pada sampel terdiri atas satu set data dengan dua pengamatan, data bersifat kuantitatif, serta data memiliki distribusi normal (Rosalina dkk., 2018). Pada penelitian ini, untuk uji *t-test* pada data perubahan elevasi dilakukan menggunakan rumus pada persamaan 4 berikut (Ghilani, 2017).

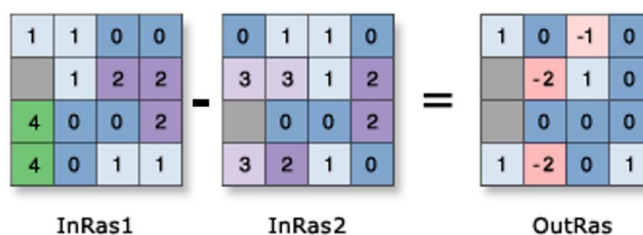
$$t_{\text{-hitung}} = \frac{\bar{\Delta z} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{n}} \quad (3)$$

Dalam hal ini, $t_{\text{-hitung}}$: nilai t hasil perhitungan, $\bar{\Delta z}$: rata-rata selisih elevasi, μ_0 : nilai sebenarnya dari parameter, σ : simpangan baku dan n : jumlah sampel.

Pada uji signifikansi perubahan elevasi pada *epoch* data MLS dilakukan dengan tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,025$). Apabila diperoleh nilai $t_{\text{-hitung}} > t_{\text{-tabel}}$ maka pada data terdapat perubahan yang signifikan sehingga mengindikasikan terjadinya deformasi vertikal permukaan pada data (Andaru dkk., 2022).

1.5. Subtract surface

Proses *subtract surface* merupakan sebuah metode pengolahan data raster yang membandingkan dua *surface* yang terletak di lokasi yang sama sehingga menghasilkan *surface* baru (ArcGIS, n.d.). Dalam metode ini melibatkan penggabungan dua *surface* yang dibentuk dari data MLS 2021 dan 2022 dengan syarat utama yaitu kedua *surface* harus memiliki ukuran piksel yang sama agar tidak terjadi pergeseran pada *surface* yang akan digabungkan. Konsep dari proses ini adalah mengurangi nilai piksel yang terletak pada posisi yang sama seperti yang tersaji dalam Gambar 4.



Gambar 4. Konsep Perhitungan *Subtract* .

Pada deteksi deformasi vertikal pada permukaan jembatan ini, informasi dari *surface* di ekstraksi dalam perubahan elevasi dengan nilai positif (kenaikan) atau negatif (*settlement*). Rumus perhitungan nilai rentang perubahan elevasi dapat dilihat pada persamaan 5 berikut ini.

$$\text{Nilai perubahan elevasi} = \text{Surface}_i - \text{Surface}_a \quad (4)$$

Dalam hal ini, Surface_i : data *surface* 2022 dan Surface_a : data *surface* 2021

Tujuan dari penggunaan metode *surface subtract* pada penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai perubahan elevasi pada objek jembatan Mulya Agung yang berada di Ruas Jalan Tol TBPPKA berdasarkan dua *epoch* data *point cloud* MLS. Perbedaan nilai elevasi tersebut mengindikasikan adanya deformasi vertikal pada permukaan Jembatan Mulya Agung.

2. DATA

Data yang digunakan untuk pengerjaan proyek akhir, di antaranya adalah data *point cloud* MLS tahun 2021 dan 2022 serta data penunjang lainnya seperti data *Plan drawing* dari Ruas Jalan Tol Ruas Terbanggi Besar - Pematang Panggang - Kayu Agung (TBPPKA) dalam format .dwg. Berdasarkan Kerangka Acuan Kerja (KAK) pengembangan jalan tol PT. Hutama Karya Tahun 2019, penentuan posisi pada alat MLS menggunakan GPS dengan akurasi horizontal dan vertikal sebesar $\leq 0,020$ m RMS (tanpa titik kontrol dan obstruksi). Datum yang digunakan adalah WGS-84 dengan Sistem Koordinat UTM Zona 48S dan untuk elevasi menggunakan bidang referensi ellipsoid.

Pada jalan tol TBPPKA, terdapat dua lajur (*track*) yaitu track A merupakan lajur jalan tol dari Terbanggi Besar menuju Pematang Panjang dan track B merupakan lajur jalan tol dengan arah sebaliknya. Pada pengukuran MLS periode 2022 hanya dilakukan pada satu lajur (*track* A), sehingga analisis deformasi permukaan Jembatan Mulya Agung hanya dilakukan pada lajur tersebut yaitu pada sisi jembatan bagian barat dengan panjang jembatan sebesar 45 m.

3. METODOLOGI

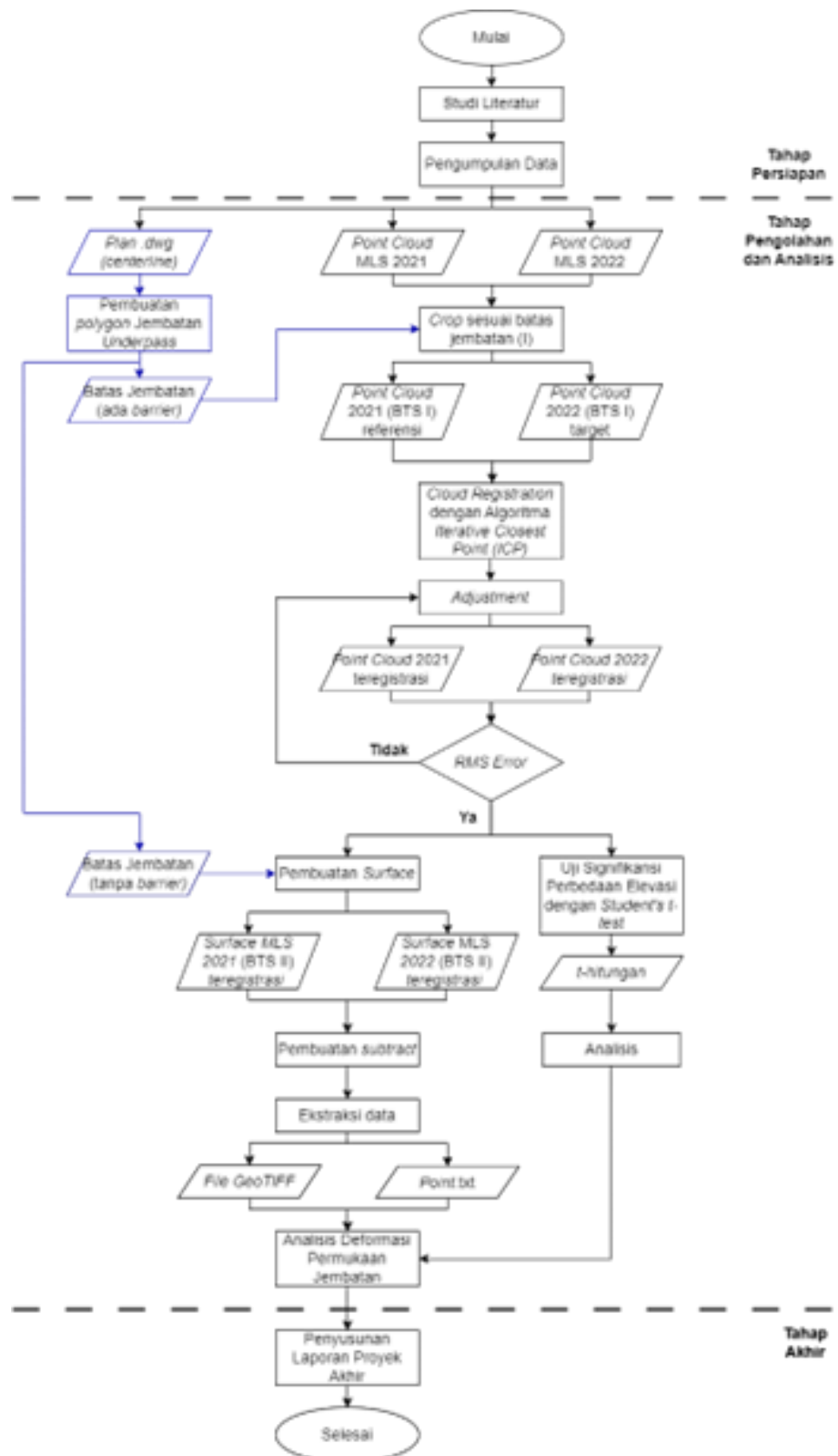
Tahapan pelaksanaan analisis elevasi ruas tol ini dapat dilihat pada diagram alir di Gambar 5.

3.1. Pelaksanaan

Pengolahan data dilakukan untuk menghasilkan informasi terkait deformasi vertikal pada permukaan jembatan, sebagai berikut.

- a. Pembuatan poligon batas area jembatan berdasarkan interpretasi data MLS serta informasi letak Jembatan Mulya Agung yang ada pada data *plan drawing*.
- b. Pemotongan data *point cloud* MLS 2021 dan 2022 berdasarkan data poligon batas area jembatan menggunakan menu clip yang ada pada perangkat lunak Global Mapper.
- c. Registrasi data *point cloud* MLS 2021 dan MLS 2022 menggunakan metode *Iterative Closest Point* (ICP) dengan perangkat lunak CloudCompare untuk menghilangkan gap diantara kedua *epoch* data tersebut.
- d. Uji signifikansi perbedaan elevasi dari kedua *epoch* data MLS dilakukan dengan *Student's t-test*, untuk mengetahui ada atau tidaknya deformasi vertikal pada permukaan jembatan.
- e. Pembuatan *surface* dari masing – masing data MLS 2021 dan 2022.
- f. Pembuatan *subtract surface* (mengurangkan *surface* MLS 2022 dengan *surface* MLS 2021) dan ekstraksi data menjadi data point (x, y, z) untuk memperoleh nilai deformasi permukaan untuk dilakukan analisis perhitungan selanjutnya menggunakan Excel.
- g. Analisis deformasi permukaan jembatan.

Melakukan analisis berdasarkan hasil *subtract* dari data MLS 2021 dan 2022, adanya perubahan elevasi mengindikasikan terjadinya deformasi vertikal pada permukaan Jembatan Mulya Agung.



Gambar 5. Diagram alir.

4. Hasil dan Pembahasan

Data MLS 2021 dan MLS 2022 dilakukan pengecekan gap dengan melihat tampilan dari potongan melintang. Pengecekan ini bertujuan untuk memastikan kualitas dari data *point cloud* 2021 dan 2022 sudah saling menyatu atau tidak. Untuk mengetahui nilai dari gap tersebut maka dilakukan perhitungan dengan menggunakan *point sampling*. *Point sampling* dibuat secara acak dan menyebar diseluruh area Jembatan Mulya Agung dengan jumlah sebanyak 253 *point sample*. Dari 253 *point sample* tersebut, 231 *point sample* menunjukkan nilai negatif dan 22 *point sample* menunjukkan nilai positif. Berdasarkan Hasil dari analisis yang telah dilakukan pada data *point sampling* menunjukkan bahwa nilai rata-rata dari gap data elevasi (-) adalah sebesar -5,0 cm dan rata-rata gap data elevasi (+) adalah 10,3 cm seperti yang disajikan dalam Tabel 1.

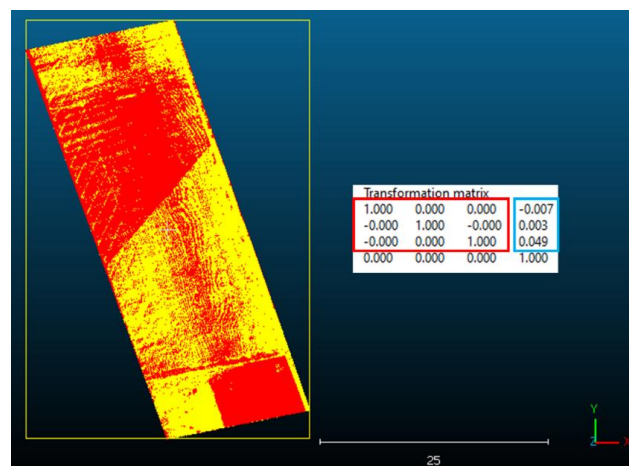
Tabel 1. Hasil Analisis Gap Data Dengan *Point sampling*

Analisis Gap Data Elevasi	Nilai (cm)
Nilai Minimal Gap Data Elevasi	- 6,6
Nilai Maksimal Gap Data Elevasi	46,0
Rata-rata Gap Data Elevasi (-)	-5,0
Rata-rata Gap Data Elevasi (+)	10,3

Berdasarkan hasil dari pengecekan gap pada data MLS 2021 dan MLS 2022, posisi barier pada kedua data masih belum menyatu sehingga perlu dilakukan proses registrasi. Registrasi yang dilakukan menggunakan metode *Iterative Closest Point* (ICP), dengan ringkasan parameter seperti yang ditampilkan pada Tabel 2 berikut. Hasil dari proses registrasi yang dilakukan berdasarkan parameter final pada Tabel 1 diperoleh nilai RMS sebesar 0,021 m dari total *point sampling* yang dihitung sebesar 596.963 points. Selain nilai RMS tersebut, hasil lainnya berupa hasil perhitungan yang diterapkan pada matriks transformasi serta data hasil dari *point cloud* yang berhasil dilakukan registrasi dengan metode ICP disajikan dalam Gambar 5.

Tabel 2. Parameter Registrasi Metode ICP

Parameter Dalam Metode Registrasi ICP	
Parameter	Nilai/Masukan
<i>To be aligned</i>	MLS 2022
<i>Reference</i>	MLS 2021
<i>Number of iteration / RMS difference</i>	20/1.0e-05 (default)
<i>Final Overlap</i>	50%
<i>Random sampling limit</i>	600.000
<i>Rotation</i>	XYZ
<i>Translation</i>	XYZ



Gambar 6. Hasil Proses Registrasi ICP.

Berdasarkan hasil dari matriks transformasi pada Gambar 5 serta mengacu pada persamaan 3, pada bagian matriks yang ditandai dengan kotak merah menunjukkan tidak adanya proses rotasi yang terjadi pada posisi x, y, z karena hasilnya berupa matriks identitas. Pada bagian matriks yang ditandai dengan kotak merah menunjukkan hasil dari proses translasi yang terjadi pada data *point cloud* MLS 2022. Pada posisi x mengalami translasi sebesar -0,007 m, posisi y mengalami translasi sebesar 0,003 m, dan pada posisi z mengalami translasi sebesar 0,049 m.

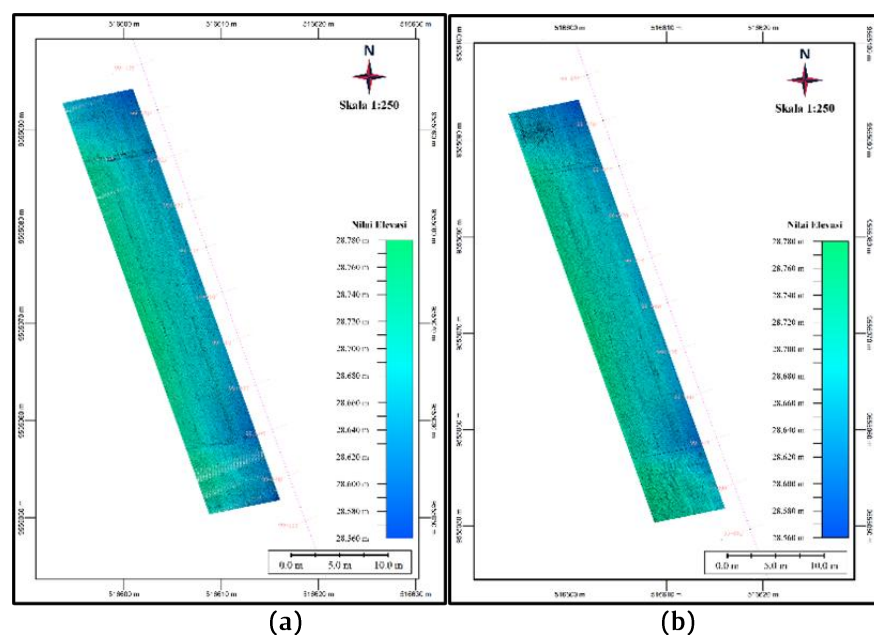
Uji signifikan dilakukan dengan menggunakan *Student's t-test* dengan mengambil 50 *point sample* untuk memperoleh nilai elevasi pada data MLS 2021 dan MLS 2022 sehingga diperoleh hasil selisih nilai elevasi beserta nilai rata-ratanya seperti yang terlihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Data Nilai Elevasi *Point sampling* untuk Uji Signifikansi

No	Elevasi (z1) MLS 2021 (m)	Elevasi (z2) MLS 2022 (m)	$\Delta z (z2 - z1)$
1	28,575	28,572	-0,003
2	28,598	28,596	-0,002
3	28,624	28,618	-0,006
4	28,642	28,643	0,001
5	28,670	28,668	-0,002
6	28,632	28,632	0
7	28,654	28,652	-0,002
8	28,671	28,673	0,002
9	28,695	28,696	0,001
10	28,575	28,572	-0,003
...	...	...	...
49	28,645	28,731	0,086
50	28,691	28,737	0,046
Rata-rata ((Δz))	28,682	28,690	0,008

Berdasarkan data pada Tabel 3, diperoleh nilai rata-rata dari perbedaan elevasi *point sample* MLS 2021 dan MLS 2022 senilai 8 mm. Selanjutnya, diperoleh nilai standar deviasi (σ) dari perhitungan kedua data elevasi senilai 2 cm. Nilai elevasi dari *point sample* kedua *epoch* data dikatakan berbeda secara signifikan jika hasil dari t-hitungan lebih besar t-tabel. Berdasarkan proses perhitungan yang telah dilakukan, dengan menggunakan tingkat kepercayaan 95% (t-tabel = 2,010) dihasilkan nilai t-hitungan dengan nilai 2,705. Hasil ini menunjukkan bahwa nilai t-hitungan > t-tabel, sehingga dapat disimpulkan bahwa terjadi perubahan yang signifikan pada dua *epoch* data MLS, sehingga untuk melihat nilai deformasi yang terjadi dilakukan dengan analisis *subtract surface*.

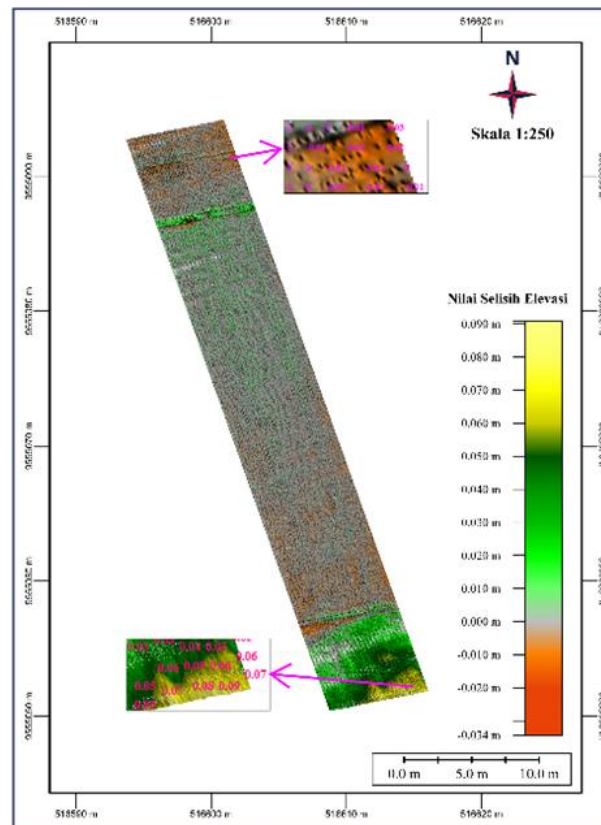
Masing-masing data MLS 2021 dan MLS 2022 teregistrasi dibuat *surface* menggunakan batas 2 area jembatan, sehingga nantinya akan terbentuk dua buah *surface*. Hasil dari *surface* yang ditampilkan pada Gambar 6 secara visual tidak terlalu menunjukkan adanya perbedaan antara data MLS 2021 dan MLS 2022. Perbedaan yang sedikit terlihat terjadi pada bagian yang ditandai dengan garis kuning sedangkan pada area lainnya tidak memiliki rentang perubahan elevasi yang signifikan apabila dibuat *subtract*.



Gambar 7. Surface MLS 2021 (a) Dan Surface MLS 2022 (b).

Hasil dari *subtract* data MLS merupakan hasil pengurangan antara *surface* 2022 dengan *surface* 2021. Hasil ini menunjukkan nilai dari perubahan elevasi yang terjadi di area jembatan yang nantinya akan dianalisis terkait dengan deformasi permukaan yang terjadi. Hasil dari *subtract* ini dalam bentuk *.TIFF* dan data *point* seperti yang ditampilkan pada Gambar 7 sebagai berikut. Tampilan hasil *subtract* pada

Gambar 7 menunjukkan rentang perubahan elevasi yang disajikan pada gradasi warna tertentu. Warna abu-abu menunjukkan tidak adanya perubahan elevasi (bernilai 0 s.d. 1 atau 0 s.d. -1). Perubahan elevasi berupa penambahan elevasi (+) disajikan dalam gradasi warna hijau ke kuning. Selanjutnya pada informasi yang menunjukkan adanya penurunan elevasi (-) disajikan dalam gradasi warna oranye ke merah. Berdasarkan hasil *subtract* pada Gambar 7 juga menunjukkan adanya perubahan elevasi yang terjadi pada bagian ujung-ujung jembatan yang ditunjukkan adanya degradasi warna hijau ke kuning yang menunjukkan adanya kenaikan elevasi serta pada bagian-bagian tertentu menunjukkan adanya degradasi warna oranye ke merah yang menunjukkan adanya penurunan elevasi pada jembatan.



Gambar 8. Hasil Subtract Data (Dalam Satuan Meter).

Hasil dari *subtract* data MLS 2021 dan 2022 teregistrasi dilakukan analisis untuk mengetahui adanya deformasi permukaan pada Jembatan Mulya Agung. Hasil *subtract* data kemudian dilihat pada bagian histogram data untuk mengetahui sebaran dari nilai perubahan elevasi yang terjadi. Tampilan dari histogram data, disajikan pada Gambar 8 sebagai berikut. Berdasarkan analisis yang dilakukan pada tampilan visualisasi dan histogram, ditemukan adanya perubahan nilai elevasi yang menunjukkan adanya kenaikan dan penurunan pada permukaan Jembatan Mulya Agung. Selanjutnya, untuk lebih memperjelas terkait informasi tersebut maka dilakukan pengelompokan hasil penurunan dan kenaikan elevasi pada data point dengan kerapatan 0,1 m yang diperoleh dari proses *subtract* data ditampilkan pada Tabel 4 sebagai berikut.

Tabel 4. Hasil Pengolahan Point Elevasi

No	Rentang Perubahan Elevasi	Jumlah	Persentase
1	5,1 s/d 10 cm	859	2,60%
2	2,1 s/d 5 cm	1.944	5,89%
3	0 s/d 2 cm	16.477	49,92%
4	0 s/d -2 cm	13.718	41,56%
5	-2,1 s/d -5 cm	6	0,02%
6	-5,1 s/d -10 cm	0	0%
Total		33.004 point	
Elevasi Max (cm)		9,1 cm	
Elevasi Min (cm)		-3,4 cm	

Dari 33.004 point hasil ekstraksi *subtract* dengan kerapatan 0,1 m yang telah dilakukan perhitungan statistik sederhana pada Tabel 4 menghasilkan persentase penurunan elevasi pada rentang 0 cm s.d. -2 cm sebesar 41,56% dan pada rentang -2,1 cm s.d. -5 cm sebesar 0,02%. Untuk persentase kenaikan elevasi yang terjadi pada rentang 0 cm s.d. 2 cm sebesar 49,92%, selanjutnya pada rentang 2,1 cm s.d. 5 cm sebesar 5,89% dan pada rentang 5,1 cm s.d. 10 cm sebesar 2,60%. Hasil nilai perubahan elevasi minimum dan maksimum menunjukkan nilai yang sama dengan histogram yaitu adalah -3,4 cm dan 9,1 cm. Area yang mengalami deformasi vertikal pada permukaan terletak pada bagian-bagian ujung jembatan atau bagian sambungan dengan jalan yang dapat dilihat pada Gambar III.3. Hal tersebut, juga memengaruhi hasil persentase kenaikan yang diperoleh menjadi lebih besar dari pada penurunan. Penurunan yang nilainya sedikit bisa terjadi karena terdapat noise atau lubang pada area tersebut sehingga mengindikasikan terjadinya *settlement*. Kenaikan elevasi yang bisa jadi mengindikasikan terjadinya *uplift* (kenaikan muka tanah) ini juga bisa disebabkan adanya perbaikan pada bagian sambungan jalan dan jembatan yang mengakibatkan aspal pada sambungan tersebut lebih tinggi dari pada bagian sekitarnya.

5. Kesimpulan

Penelitian “Deteksi Deformasi Vertikal Permukaan Jembatan Mulya Agung Tahun 2021 – 2022 Menggunakan Data Mobile Laser Scanner” yang telah dilakukan. Dapat disimpulkan, metode registrasi data *point cloud* menggunakan metode *Iterative Closest Point* (ICP) menghasilkan data MLS 2021 digunakan sebagai referensi, sedangkan data MLS 2022 digunakan sebagai data target. Diperoleh nilai RMS sebesar 0,021 meter dari total *point sampling* yang mencapai 596.963 titik. Ini menggambarkan kualitas registrasi data yang sangat baik. Selanjutnya, dilakukan uji signifikan dengan menggunakan *Student's t-test* pada tingkat kepercayaan 95%. Hasilnya menunjukkan nilai t-hitungan sebesar 2,705, yang melebihi nilai t-tabel sebesar 2,010. Hal ini mengindikasikan bahwa terdapat perubahan elevasi yang signifikan antara data MLS 2021 dan MLS 2022. Nilai perubahan elevasi minimum mencapai -3,4 centimeter pada sisi utara jembatan, sementara perubahan maksimum sebesar 9,1 centimeter terdapat pada sisi selatan jembatan. Area-area yang mengalami deformasi vertikal teridentifikasi terutama pada ujung-ujung jembatan dan pada bagian sambungan dengan jalan. Proses *subtract surface* memperlihatkan bahwa perubahan elevasi ini disebabkan oleh perbaikan jalan yang dilakukan. Hasil penelitian menegaskan bahwa metode pengukuran dengan *Mobile Laser Scanner* (MLS) terbukti efektif dalam mendeteksi deformasi vertikal pada permukaan jembatan. Analisis dua *epoch* data dilakukan dengan level of detection sebesar 2 centimeter, dan temuan-temuan ini memberikan kontribusi penting dalam pemantauan dan pemeliharaan jembatan Mulya Agung di Ruas Jalan Tol Trans Sumatera.

6. Ucapan Terima Kasih/Acknowledgment

Terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyelesaian penelitian ini terutama dari PT Hutama Karya yang telah memperbolehkan penulis dalam meneliti data Mobile Laser Scanner untuk keperluan penelitian analisis deformasi.

7. Daftar Pustaka

- Andaru, R., Rau, J. Y., Chuang, L. Z. H., & Jen, C. H. (2022). Multitemporal UAV Photogrammetry For Sandbank Morphological Change Analysis: Evaluations of Camera Calibration Methods, Co-Registration Strategies, and the Reconstructed DSMs. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 5924–5942. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3192264>
- Ghilani, C. D. (2017). *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis* (J. Wiley & I. Sons (ed.); 6 ed.). <https://doi.org/10.1002/9781119390664>
- Ihsanudin, M. (2020). Studi Perencanaan Ulang Struktur Bawah Jembatan Underpass Pada Simpang Karanglo Malang Dengan Menggunakan Secant Pile. Universitas Muhammadiyah Malang.
- Jafari, B. M. (2016). Deflection Measurement Through 3D *Point cloud* Analysis.
- Liu, M., Sun, X., Wang, Y., Shao, Y., & You, Y. (2020). Deformation Measurement of Highway Bridge Head Based on Mobile TLS Data. *IEEE Access*, 8, 85605–85615. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992590>
- Oskin, M. E., Arrowsmith, J. R., Corona, A. H., Elliott, A. J., Fletcher, J. M., Fielding, E. J., Gold, P. O., Garcia, J. J. G., Hudnut, K. W., Liu-Zeng, J., & Teran, O. J. (2012). Near-field deformation from the El Mayor-Cucapah earthquake revealed by differential LIDAR. *Science*, 335(6069), 702–705. <https://doi.org/10.1126/science.1213778>
- Pasaribu, B. C. H., Eratodi, I. G. L. B., Ariawan, P., & Wismanantara, I. G. N. N. (2019). Evaluasi Perencanaan Struktur Jembatan Underpass Simpang Tugu Ngurah Rai, Badung, Bali. *Jurnal Ilmiah TELSINAS*, 2(2), 63–72.

- Prawir, R. A., Yuwono, B. D., & Sudarsono, B. (2019). Studi Deformasi Waduk Pendidikan Diponegoro Tahun 2018. *Jurnal Geodesi UNDIP*, 8(1), 238–247.
- Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., & Arias, P. (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 46(7), 2127–2145. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.03.006>
- Rahmadiansyah, M. (2022). Analisis Perubahan Elevasi Ruas Tol Trans Sumatera Menggunakan Data Mobile Laser Scanner Tahun 2020 Dan 2021. Universitas Gadjah Mada.
- Rajendra, Y. D., Mehrotra, S. C., Kale, K. V., Manza, R. R., Dhumal, R. K., Nagne, A. D., & Vibhute, A. D. (2014). Evaluation of partially overlapping 3D *point cloud*' s registration by using ICP variant and cloudcompare. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, XL-8(1), 891–897. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-8-891-2014>.
- Rosalina, L., Oktarina, R., Rahmiati, & Saputra, I. (2018). Buku Ajar Statistika (Eliza (ed.); 1 ed.). CV. MUHARIKA RUMAH ILMIAH.
- Schlögl, M., Dorninger, P., Kwapisz, M., Ralbovsky, M., & Spielhofer, R. (2022). Remote Sensing Techniques for Bridge Deformation Monitoring at Millimetric Scale: Investigating the Potential of Satellite Radar Interferometry, Airborne Laser Scanning and Ground-Based Mobile Laser Scanning. *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 90(4), 391–411. <https://doi.org/10.1007/s41064-022-00210-2>.
- Wardana, P. K., Hidayat, L., Syamsudin, N., Irawan, R., & Irawan, R. R. (2005). Pengembangan Pemeriksaan Dan Pemeliharaan Jembatan (Kerjasama Dengan Jica, Jepang).