

ANALISIS PENERAPAN *REALITY CAPTURE* BERBASIS FOTOGRAMETRI SEBAGAI ALTERNATIF PEMANTAUAN DEFORMASI BENDUNGAN

Bhima Dhanardono^{1*}, Didit Puji Riyanto², Suhardi²,
Wahyu Prasetyo², Wahyu Apriyoga³

¹Program Studi Teknologi Konstruksi Jalan dan Jembatan, Politeknik PU

²Program Studi Teknologi Konstruksi Bangunan Air, Politeknik PU

³Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana

*bhimadesign@pu.go.id

Pemasukan: 7 September 2023 Perbaikan: 9 Nopember 2023 Diterima: 14 Nopember 2023

Intisari

Penerapan *Reality Capture* untuk pemantauan deformasi dapat dilakukan dengan menggunakan *laser scanner* atau fotogrametri. Kelebihan metode fotogrametri adalah jauh lebih murah dalam aspek biaya investasi alat dan lebih cepat dalam pengambilan data terutama jika menggunakan wahana udara. Tetapi dalam pemantauan deformasi tentu mempertimbangkan tingkat akurasi pengukuran. Seberapa akurat hasil pengukuran deformasi menggunakan fotogrametri akan menjadi salah satu aspek yang menentukan layak tidaknya fotogrametri sebagai alternatif pengganti *laser scanner* untuk pemantauan deformasi. Penelitian ini akan menilai akurasi hasil pengukuran deformasi menggunakan metode fotogrametri menggunakan *Unmanned Aerial Vehicle* dibandingkan dengan pengukuran terestris yang dilakukan dengan menggunakan *Robotic Total Station*. Studi kasus penelitian ini adalah bendungan Randugunting di Kabupaten Blora, Jawa Tengah. Pemantauan deformasi bendungan difokuskan pada sebelas patok geser di lereng sisi hilir bendungan. Pengukuran deformasi dari fotogrametri dilakukan pada posisi patok geser yang didapat dari penampang bendungan hasil rekonstruksi *point cloud*. Hasil pengujian akurasi dengan menggunakan *Root Mean Squared Error* (RMSE) sebesar 0.238, menunjukkan bahwa pengukuran deformasi dengan metode fotogrametri akurasinya tinggi. Meskipun terdapat selisih nilai deformasi terhadap pengukuran terestris, tetapi secara umum terdapat kecenderungan laju deformasi yang serupa. Akurasi pengukuran fotogrametri dapat ditingkatkan salah satunya dengan *updating* nilai koordinat titik referensi yang digunakan setiap siklus pemantauan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa *Reality Capture* berbasis fotogrametri dapat diterapkan sebagai alternatif pemantauan deformasi bendungan.

Kata Kunci: Fotogrametri, Deformasi, Bendungan, Randugunting,

Latar Belakang

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan *Reality Capture* berbasis fotogrametri sebagai alternatif dalam usaha pemantauan deformasi konstruksi bendungan. *Reality Capture* adalah metode pengumpulan data yang terbaik dan

paling akurat tentang kondisi nyata sesungguhnya secara detail tiga dimensi (Almukhtar, Saeed, Abanda, & Tah, 2021). *Reality Capture* adalah metode yang meningkatkan efisiensi, akurasi dan keselamatan untuk mendapatkan data tiga dimensi (salah satunya berupa *point cloud*) dari obyek konstruksi menggunakan *laser scanner* atau fotogrametri, baik dengan instrumen yang dipasang pada *hand held*, tripod maupun *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) (Fobiri, Musonda, & Muleya, 2022). Pemanfaatan fotogrametri untuk *Reality Capture* telah dilakukan oleh (Tolle et al., 2022) dengan studi kasus pada Candi Badut di Malang. Pada penelitian menunjukkan bahwa fotogrametri dapat digunakan untuk pembuatan model 3D bangunan secara efisien. Penelitian yang serupa telah dilakukan menggunakan teknologi *laser scanner* dan *digital imagery* untuk monitoring bendungan timbunan tanah yang menghasilkan akurasi sampai dengan level sentimeter termasuk memodelkan tekstur permukaan bendungan yang menjadi aset berharga dalam interpretasi fenomena penilaian keamanan (Berberan, Marcelino, Boavida, & Oliveira, 2007).

Seperti halnya pemindaian menggunakan *laser scanner*, fotogrametri juga memungkinkan rekonstruksi posisi, orientasi, bentuk dan ukuran obyek eksisting tetapi berdasarkan multi citra yang menghasilkan antara lain koordinat titik-titik tiga dimensi dan model geometri digital (Kraus, 2000). Salah satu kelebihan metode fotogrametri menggunakan UAV dibanding dengan pengukuran terestrial yaitu dapat diaplikasikan untuk pengukuran deformasi pada obyek atau kondisi lingkungan terutama pada kasus dimana waktu yang tersedia tidak memungkinkan dilakukannya pengukuran secara geodetik (Luhmann, Robson, Kyle, & Harley, 2011). Penerapan fotogrametri untuk keperluan pengukuran yang teliti perlu menggunakan titik kontrol tanah atau *Ground Control Point* (GCP) yaitu obyek titik nyata di lapangan yang tampil di citra dan memiliki nilai koordinat tiga dimensi akurat sebagai koreksi koordinat pada citra berjumlah setidaknya 3 titik yang tersebar posisinya membentuk konfigurasi segitiga (Linder, 2016). Meskipun *laser scanner* dan fotogrametri tersebut sama-sama menghasilkan *point cloud* yang bisa dimanfaatkan untuk pemantauan deformasi, tetapi karena teknologi yang diusung sangat berbeda, maka harga alat *laser scanner* jauh lebih mahal mencapai 100 kali lipat harga UAV untuk fotogrametri. Seberapa akurat potensi fotogrametri sebagai alternatif pengganti *laser scanner* untuk pemantauan deformasi adalah permasalahan yang akan diangkat oleh penulis dalam penelitian ini. Lingkup penelitian ini yaitu analisis akurasi antara pengukuran deformasi metode fotogrametri menggunakan UAV terhadap pengukuran deformasi secara terestris menggunakan alat *Robotic Total Station* (RTS) pada periode bulan Maret sampai dengan bulan November 2022. Studi kasus penelitian ini dilaksanakan pada bendungan Randugunting di Kabupaten Blora, Provinsi Jawa Tengah dengan tipe zonal inti tegak, panjang 363,35 meter yang telah dilakukan penggenangan pada bulan Desember 2021.

Salah satu metode pengujian akurasi suatu pengukuran adalah dengan menghitung *Root Mean Squared Error* (RMSE) dari akar hasil pengurangan nilai prediksi terhadap nilai observasi yang dikuadratkan dan dibagi terhadap jumlah data (Riyanto & Putera, 2022). Nilai RMSE yang semakin rendah menunjukkan bahwa

nilai prediksi mendekati nilai observasi, artinya nilai prediksi tersebut akurasinya tinggi.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (1)$$

\hat{y} = nilai hasil prediksi

y = nilai hasil observasi

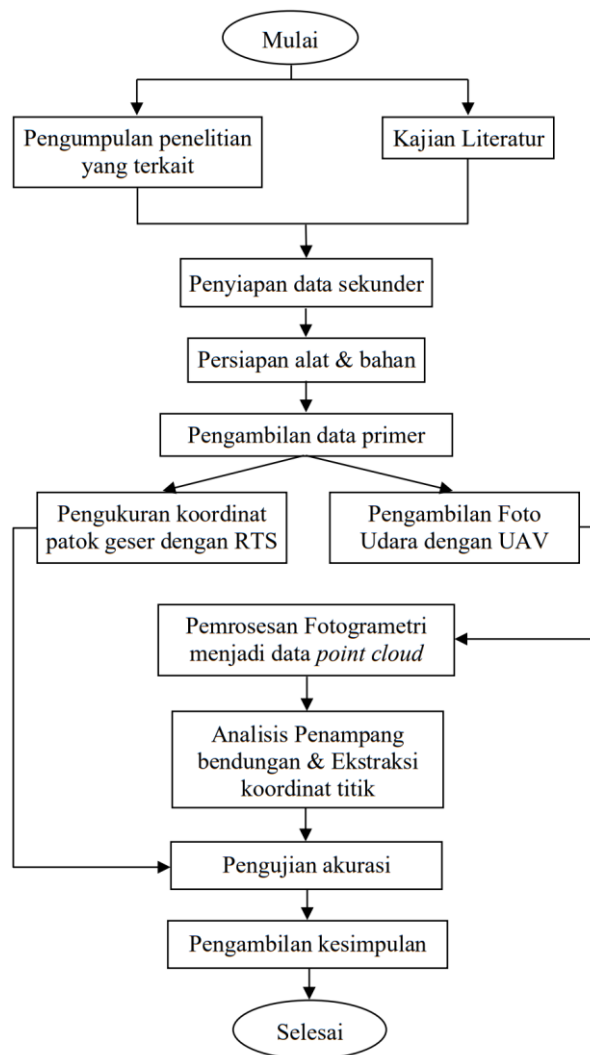
n = jumlah data

Metodologi Studi

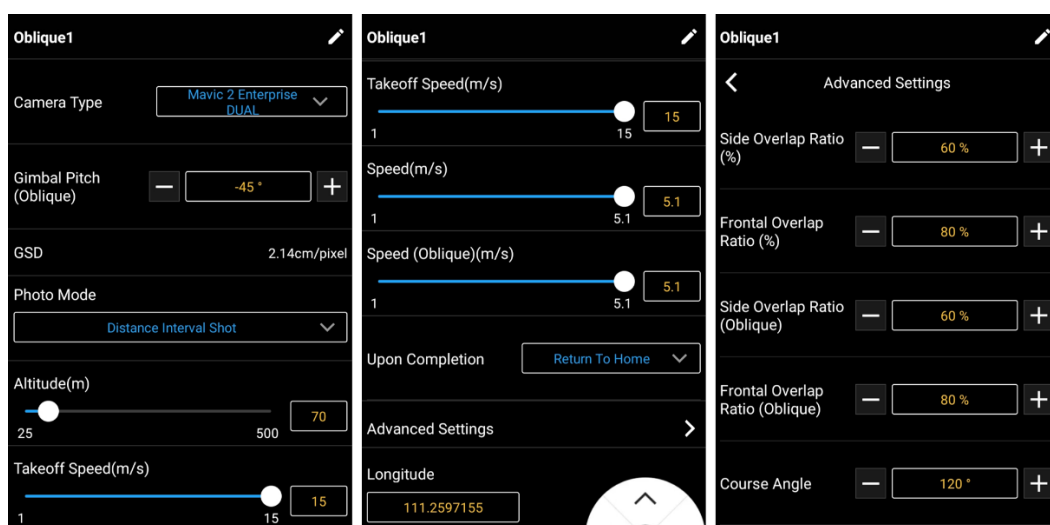
Dalam penelitian ini peralatan utama yang digunakan yaitu *Robotic Total Station* Sokkia iX1000 dan mini prisma *reflector* untuk pengambilan data koordinat patok geser, UAV DJI Mavic 2 *Pro Enterprise Dual Thermal* untuk pengambilan data foto udara dan komputer untuk pengolahan data. Perangkat lunak untuk pembuatan jalur terbang pengambilan foto udara UAV yaitu DJI Pilot. Agisoft *Metashape Professional* digunakan untuk pemrosesan data foto udara menjadi data *point cloud*. *Maptek Point Studio* digunakan untuk analisis penampang bendungan dan ekstraksi data koordinat titik pemantauan berdasarkan data *point cloud*. Bahan utama yang digunakan yaitu lembaran untuk penanda (*marking*) titik kontrol tanah. Metode dan teknis pelaksanaan penelitian seperti tergambar pada diagram alir Gambar 1.

Proses *reality capture* bertujuan untuk mendapatkan kondisi eksisting pada bendungan yang dalam penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan metode fotogrametri. Konsep fotogrametri dalam rangka untuk mendapatkan kondisi eksisting yaitu dengan cara mengambil citra suatu obyek dalam bentuk foto dari berbagai arah. Dalam penelitian ini pengambilan foto menggunakan UAV sehingga memungkinkan pemotretan dari udara yang didukung dengan aplikasi pembuatan jalur penerbangan (*flight mission*).

Jika fotogrametri untuk keperluan pembuatan peta, dimana hanya diperlukan pengambilan citra yang tegak lurus (*ortho*) terhadap permukaan bumi maka pemotretan untuk keperluan pemantauan deformasi suatu konstruksi dilakukan secara tiga dimensi yaitu dari berbagai arah dengan sudut pandang kamera tidak hanya tegak lurus saja. Untuk itu pembuatan jalur penerbangan menggunakan aplikasi DJI Pilot mode *oblique* agar memungkinkan pemotretan dari berbagai arah dan sudut pandang tetapi konsisten, teratur dan terpola pada ketinggian penerbangan, interval jarak pemotretan dan sudut pandang kameranya. Pengaturan jalur penerbangan ini perlu disimpan untuk digunakan kembali pada periode pemantauan berikutnya untuk menjaga konsistensi. Jalur penerbangan UAV diatur seperti terlihat pada Gambar 2.

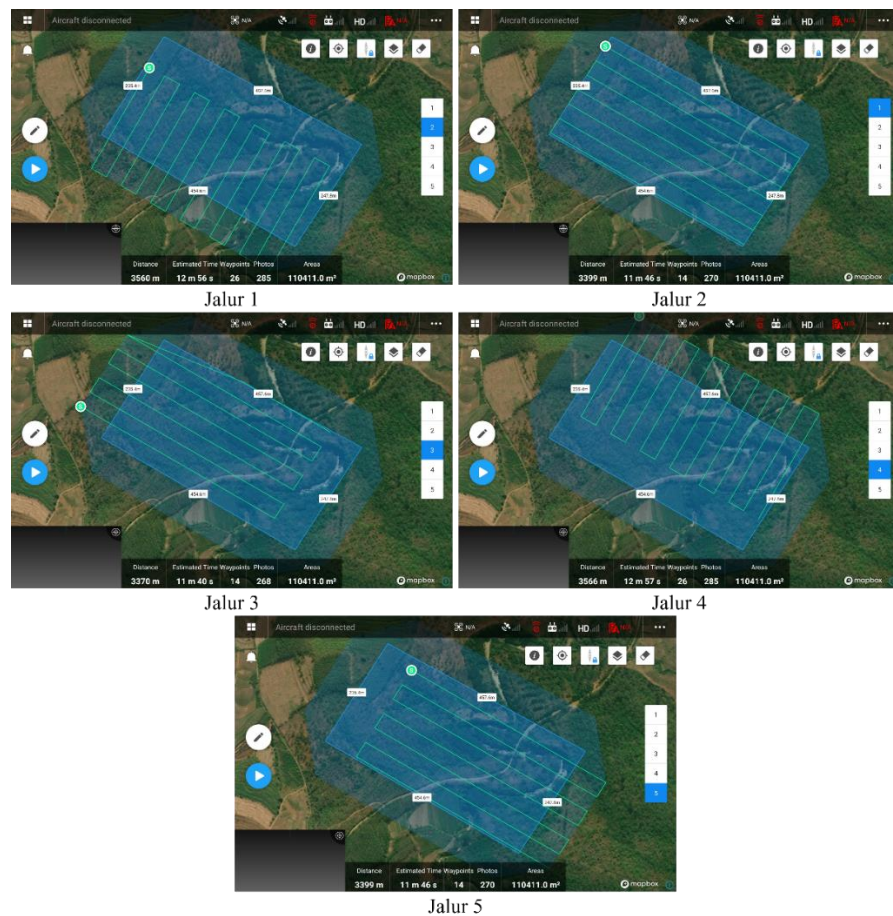


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian



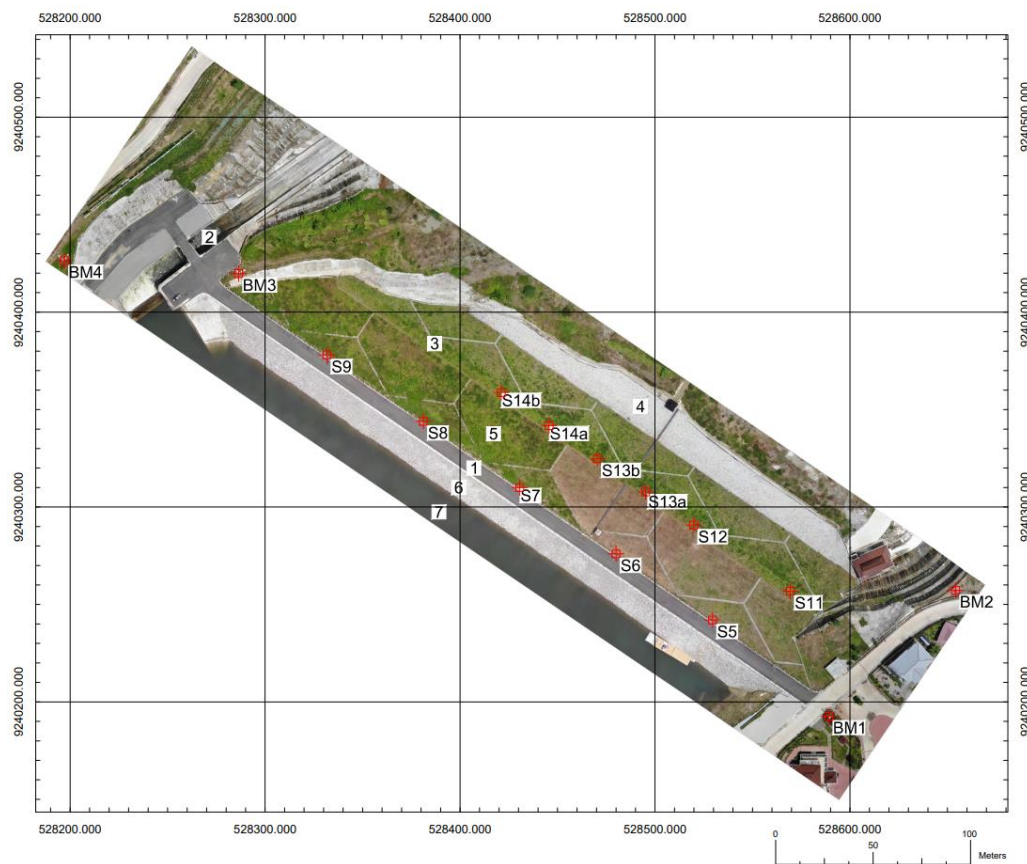
Gambar 2. Pengaturan Jalur Terbang UAV

Pembuatan jalur penerbangan mode *oblique* pada aplikasi DJI Pilot menghasilkan 5 jalur penerbangan yang masing-masing berbeda baik pada jalur maupun sudut arah kamera yang dapat dilihat pada Gambar 3. Kelima jalur penerbangan tersebut seperti terlihat pada Gambar 3, sudah didesain untuk dapat mengambil foto yang mencakup keseluruhan bagian utama dari bendungan termasuk semua titik kontrol tanah yang digunakan. Pengambilan data foto udara untuk keperluan *reality capture* dilaksanakan pada tanggal 18 Maret 2022, 27 Agustus 2022 dan 12 November 2022. Pada waktu yang bersamaan dilakukan juga pemantauan deformasi pada prisma reflektor yang dipasang pada sebelas patok geser di lereng hilir dengan menggunakan RTS.



Gambar 3. Jalur Penerbangan UAV Mode *Oblique*

Sebagai titik kontrol tanah, digunakan empat BM eksisting di sekitar bendungan yang sudah memiliki nilai koordinat dan tersebar pada pojok-pojok bendungan sebagai *area of interest* (AOI). Keempat *benchmark* (BM) tersebut adalah BM1, BM2, BM3 dan BM4 (lihat Gambar 4). Pada keempat BM tersebut dipasang marking agar lebih mudah terlihat pada saat pemrosesan foto. Adapun posisi BM tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.



Keterangan:

- 1 : Mercu bendungan
- 2 : *Spillway*
- 3 : *Berm*
- 4 : *Toe Drain*
- 5 : Lereng hilir
- 6 : Lereng hulu
- 7 : Area genangan
- BM1-BM4: *Benchmark GCP*
- S5 - S14b : patok geser yang dipantau

Gambar 4. Posisi BM dan Patok Geser Bendungan yang Dipantau

Dari hasil pemotretan udara setiap periode pemantauan didapatkan rata-rata sekitar 1300 foto. Dengan menggunakan aplikasi Agisoft Metashape Professional, selanjutnya foto-foto tersebut diolah dengan urutan *Align Photos*, koreksi koordinat foto menggunakan GCP dan pembuatan *point cloud*. Jumlah *point cloud* yang dihasilkan dari pemrosesan ini rata-rata mencapai 53 juta titik pada tiap sesi pemantauan.

Hasil Studi dan Pembahasan

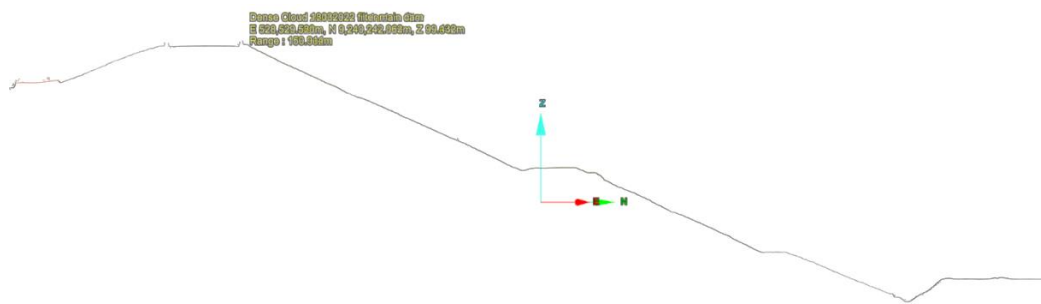
Hasil Studi

Dari foto udara menggunakan UAV yang sudah diproses dengan metode fotogrametri menggunakan perangkat lunak Agisoft Metashape Professional menghasilkan *point cloud* yang meliputi keseluruhan sisi hulu dan hilir bendungan seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



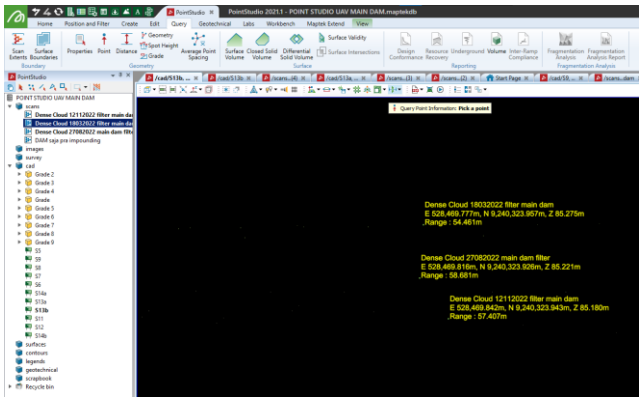
Gambar 5. *Point cloud* Hasil Pemrosesan Fotogrametri

Selanjutnya dengan aplikasi Maptek Point Studio, data *point cloud* tersebut digunakan untuk menampilkan penampang bendungan dari setiap tanggal pengambilan data. Irisan penampang bendungan dibuat tepat pada posisi yang sama dengan patok geser yang dipantau oleh RTS. Gambar 6 menampilkan contoh hasil penampang bendungan.



Gambar 6. Penampang Bendungan dari *Point Cloud*

Dari penampang bendungan yang didapatkan, kemudian dengan menggunakan fungsi *Query* → *Point* dilakukan ekstraksi data koordinat elevasi pada lokasi patok geser sehingga didapatkan nilai seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Ekstrak Data Koordinat

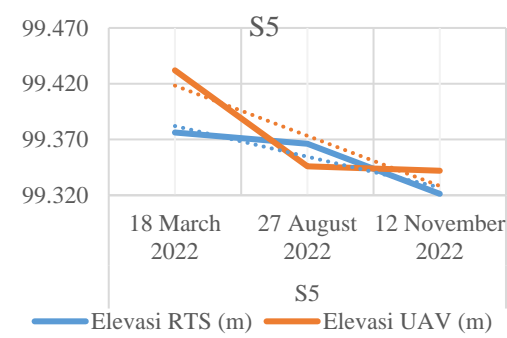
Data elevasi yang dihasilkan dari *point cloud* tersebut kemudian dibandingkan dengan data elevasi pemantauan patok geser menggunakan RTS sebagai nilai yang dianggap benar pada waktu yang sama seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan koordinat elevasi patok geser dari RTS dan fotogrametri

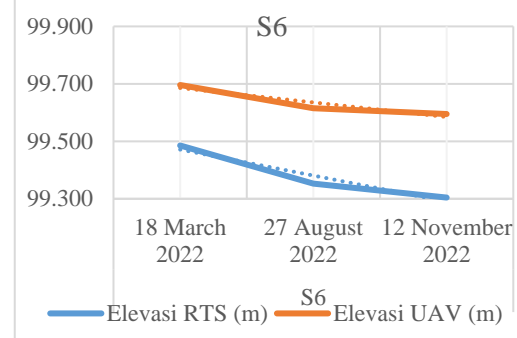
Titik	Tanggal Pemantauan	Elevasi RTS (m)	Elevasi fotogrametri (m)	Selisih (m)
S5	18 March 2022	99.376	99.432	0.056
	27 August 2022	99.366	99.346	0.020
	12 November 2022	99.321	99.342	0.021
S6	18 March 2022	99.486	99.696	0.210
	27 August 2022	99.353	99.615	0.262
	12 November 2022	99.304	99.595	0.291
S7	27 August 2022	99.679	99.927	0.248
	12 November 2022	99.631	99.939	0.308
S8	18 March 2022	99.546	99.837	0.291
	27 August 2022	99.487	99.799	0.312
	12 November 2022	99.442	99.771	0.329
S9	18 March 2022	99.221	99.508	0.287
	27 August 2022	99.162	99.501	0.339
	12 November 2022	99.121	99.489	0.368
S12	27 August 2022	85.115	85.290	0.175
	12 November 2022	85.078	85.277	0.199
S13a	27 August 2022	85.012	85.187	0.175
	12 November 2022	84.976	85.140	0.164
S13b	27 August 2022	85.003	85.221	0.218
	12 November 2022	84.967	85.180	0.213
S14b	27 August 2022	85.077	85.238	0.161
	12 November 2022	85.043	85.187	0.144
Rata-rata				0.143

Dari data pada Tabel 1, dengan nilai pengukuran yang menggunakan satuan meter didapatkan nilai RMSE sebesar 0,238. Jika nilai pengukuran menggunakan satuan desimeter maka nilai RMSE menjadi 2,382.

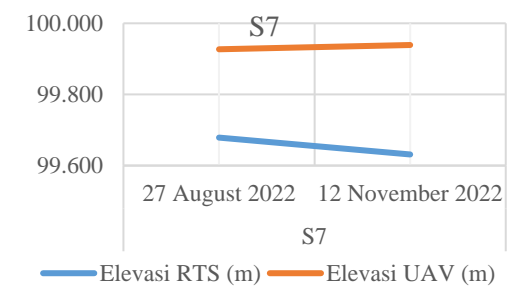
Berdasarkan Tabel 1 selanjutnya dibuat menjadi grafik untuk mengetahui gambaran *trendline* dari masing-masing data pemantauan seperti terlihat pada Gambar 8 sampai dengan Gambar 16.



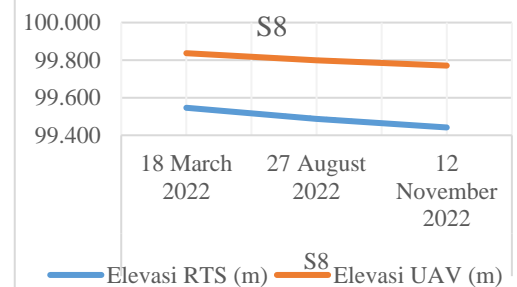
Gambar 8. Laju Deformasi Patok S5



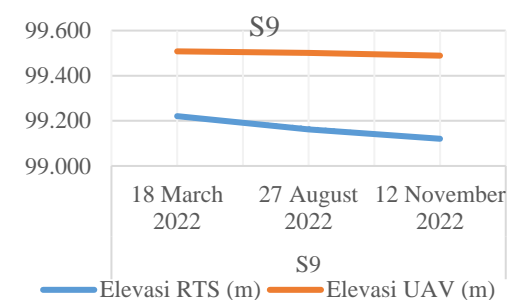
Gambar 9. Laju Deformasi Patok S6



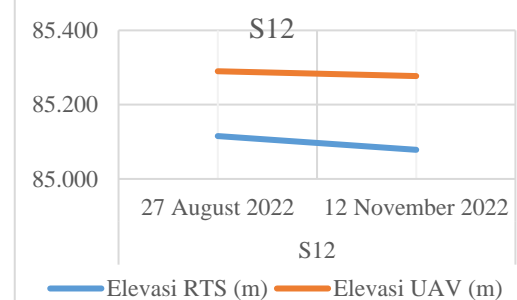
Gambar 10. Patok S7



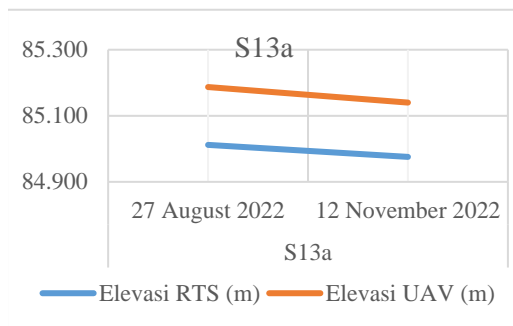
Gambar 11. Patok S8



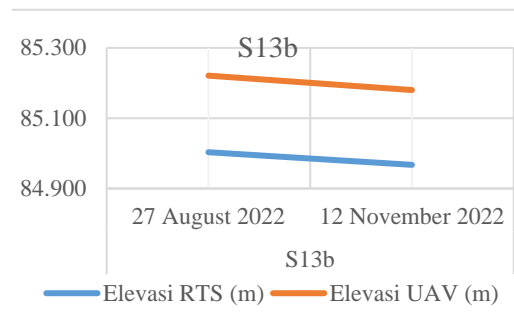
Gambar 12. Patok S9



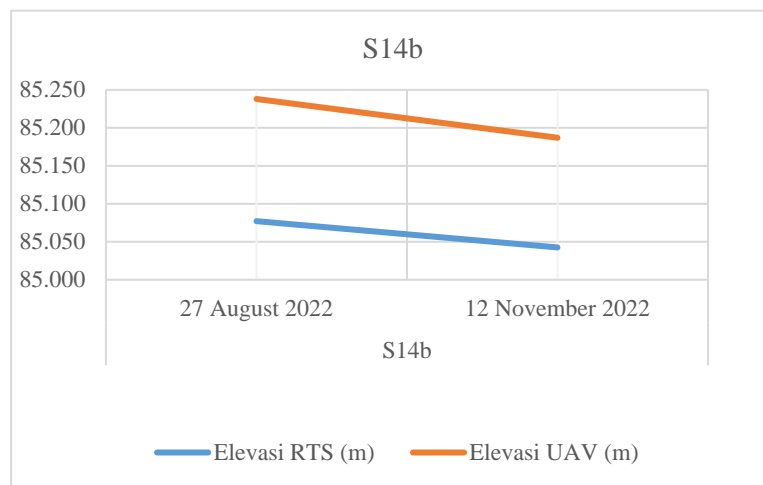
Gambar 13. Patok S12



Gambar 14. Patok S13a



Gambar 15. Patok S12



Gambar 16. Patok S14b

Pembahasan

Hasil perhitungan nilai RMSE dengan data yang menggunakan satuan meter dan desimeter menghasilkan angka yang rendah, hal ini menunjukkan bahwa pengukuran deformasi berbasis metode fotogrametri ini akurasi cukup tinggi pada tingkat satuan meter dan desimeter. Berdasarkan grafik linimasa deformasi pada sembilan titik pemantauan, semuanya menunjukkan kecenderungan *trendline* deformasi yang serupa antara pengukuran RTS dan fotogrametri, kecuali hanya pada patok S7. Artinya secara umum antara pemantauan deformasi menggunakan RTS dan fotogrametri menunjukkan laju deformasi dengan kecenderungan yang serupa. Selisih elevasi hasil pemantauan antara RTS dengan fotogrametri kemungkinan dipengaruhi oleh perbedaan titik referensi yang digunakan oleh masing-masing alat.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

1. Reality *Capture* berbasis fotogrametri dapat diterapkan sebagai metode alternatif dalam pemantauan deformasi bendungan.
2. Pengambilan citra obyek dalam fotogrametri bendungan dilakukan dengan metode *oblique*, yaitu pemotretan obyek dari segala arah secara konsisten, teratur dan terpola.
3. Nilai RMSE hasil pengukuran deformasi dengan fotogrametri sebesar 0.238, ini menunjukkan bahwa fotogrametri memiliki akurasi yang cukup tinggi.
4. Laju eformasi patok geser bendungan yang diukur menggunakan RTS dan fotogrametri, menunjukkan pola yang serupa.
5. Selisih nilai pemantauan deformasi antara RTS dengan fotogrametri bisa disebabkan karena perbedaan titik referensi yang digunakan dalam pemantauan.

Saran

1. Untuk meningkatkan akurasi pengukuran, sebaiknya perlu dilakukan *update* koordinat titik BM dan CP yang ada di area bendungan yang digunakan sebagai referensi pemantauan deformasi, karena ada kemungkinan titik BM dan CP mengalami perubahan posisi selama proses pelaksanaan konstruksi. *Update* yang dimaksud berupa pengukuran ulang koordinat BM dan CP terhadap referensi global setiap periode pemantauan
2. Pemantauan deformasi yang menggunakan beberapa alat yang berbeda disarankan agar menggunakan titik referensi yang sama

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Politeknik Pekerjaan Umum atas pembiayaan dana dan dukungan peralatan penelitian
2. BBWS Pemali Juana yang telah mengizinkan pelaksanaan penelitian di Bendungan Randugunting
3. Mahasiswa Politeknik Pekerjaan Umum Prodi Teknologi Konstruksi Bangunan Air dan Teknologi Konstruksi Jalan dan Jembatan Angkatan 2019 dan 2020 yang tergabung dalam Tim Penelitian atas bantuan pengambilan dan pengolahan data penelitian ini.

Daftar Referensi

- Almukhtar, A., Saeed, Z. O., Abanda, H., & Tah, H. M. (2021). Reality Capture of Buildings Using 3D Laser Scanners. *CivilEng*.
- Berberan, A., Marcelino, J., Boavida, J., & Oliveira, A. (2007). Deformation monitoring of earth dams using laser scanners and digital imagery.
- Fobiri, G., Musonda, I., & Muleya, F. (2022). Reality Capture in Construction Project Management: A Review of Opportunities and Challenges. *Buildings*.

- Kraus, K. (2000). Photogrammetry. Vienna: Walter de Gruyter.
- Linder, W. (2016). Digital Photogrammetry. Berlin: Springer.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2011). Close Range Photogrammetry. Scotland: Whittles Publishing.
- Riyanto, S., & Putera, A. R. (2022). Metode Riset Penelitian Kesehatan & Sains. Yogyakarta: Deepublish.
- Tolle, H., Dewi, R. K., Brata, K. C., & Perdamean, B. (2022). Framework for Development of 3D Temple Objects based on Photogrammetry Method. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(5), 564–571. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2022.0130566>