



Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri (SINTA)

Homepage: sinta.eng.unila.ac.id



KAJIAN KETELITIAN HASIL PENGUKURAN LIDAR TLS100 PRODUKSI POTRET UDARA MENGGUNAKAN METODE CLOUD TO CLOUD DAN TARGET TO TARGET (STUDI KASUS: BANGUNAN KANTOR BAZNAS PROVINSI LAMPUNG)

Digdo Bayu Riky Subagja¹, Romy Fadly², Atika Sari³, dan Safri Yanti Rahayu⁴

*Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika, Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung 35145

INFORMASI ARTIKEL

ABSTRAK

Riwayat artikel:

Diterima 21/11/2025

Direvisi 21/12/2025

Kata kunci:

TLS100

Point cloud

Cloud to Cloud

Target to Target

Registrasi

Perkembangan teknologi *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) telah membawa kemajuan signifikan dalam bidang survei dan pemodelan tiga dimensi (3D) bangunan. Salah satu perangkat TLS berbasis *Light Detection and Ranging* (LiDAR) yang dikembangkan secara lokal adalah TLS100 produksi Potret Udara. Meskipun memiliki keunggulan dari segi biaya dan portabilitas, ketelitian hasil pengukurannya pada kondisi lapangan masih perlu dikaji lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk menilai kemampuan dan ketelitian TLS100 dalam menghasilkan model 3D bangunan dengan membandingkan dua metode registrasi *point cloud*, yaitu *Cloud to Cloud* (C2C) dan *Target to Target* (T2T), terhadap hasil pengukuran referensi Total Station. Data diperoleh dari pemindaian Gedung Kantor BAZNAS Provinsi Lampung menggunakan TLS100 pada 28 posisi dengan jarak antar posisi 8 meter. Data hasil akuisisi diproses melalui tahapan kalibrasi, segmentasi, pewarnaan, registrasi, dan analisis geometris menggunakan perangkat lunak *CloudCompare* dan *PhotoModeler*. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi dimensi geometris, ketelitian spasial, serta perbandingan volume hasil model dengan mengacu pada standar ASTM D6172-98 yang menetapkan toleransi volume kurang dari 2%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *Target to Target* (T2T) memberikan ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan *Cloud to Cloud* (C2C). Nilai rata-rata selisih dimensi terhadap data Total Station sebesar 0,39% untuk T2T dan 2,02% untuk C2C, dengan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) masing-masing 5,03 cm dan 8,36 cm. Sementara itu, hasil perbandingan volume menunjukkan perbedaan sebesar 1,51% untuk T2T dan 8,05% untuk C2C terhadap data referensi. Berdasarkan hasil tersebut, metode *Target to Target* dinyatakan lebih akurat dan andal dalam menghasilkan model 3D bangunan menggunakan perangkat TLS100 sesuai dengan batas toleransi yang ditetapkan oleh ASTM D6172-98.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi pemetaan tiga dimensi (3D) telah memberikan kemajuan signifikan dalam kegiatan survei dan dokumentasi objek fisik. Salah satu perangkat utama yang digunakan dalam pemetaan 3D adalah *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). Alat ini mampu menghasilkan data spasial berupa *Point cloud* secara cepat dan akurat, yang sangat bermanfaat dalam

berbagai bidang seperti arsitektur, rekayasa sipil, pemetaan aset, dan dokumentasi bangunan. TLS memungkinkan pengambilan data objek secara detail, sehingga efektif digunakan di kondisi yang sulit dijangkau dan pada objek yang tidak dapat disentuh langsung (Reshetnyuk, 2009).

Seiring meningkatnya kebutuhan terhadap perangkat TLS yang ekonomis, tersedia TLS100 buatan Potret Udara yang tergolong perangkat *low-cost*. Meskipun

lebih terjangkau dibandingkan TLS komersial lainnya, performa TLS100 masih perlu dievaluasi secara ilmiah, terutama dalam hal akurasi hasil pengukuran. Evaluasi ini penting untuk memastikan apakah TLS100 mampu menghasilkan data yang andal dalam aplikasi pemetaan dan pemodelan, seperti konservasi bangunan, audit visual struktural, maupun dokumentasi arkeologi (Rahmawati, dkk., 2021).

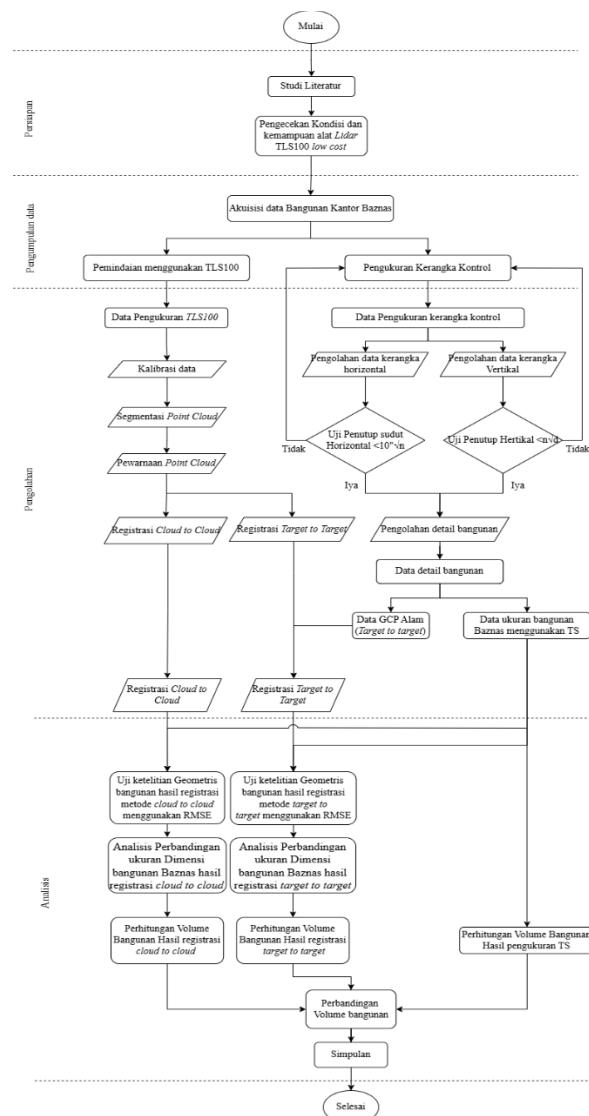
Penelitian oleh Budisusanto, dkk. (2022) menunjukkan bahwa akurasi TLS100 dalam pemodelan volume objek hanya mencapai sekitar 53% dibandingkan sensor Lidar iPad Pro. Menariknya, penelitian tersebut belum melibatkan proses registrasi *Point cloud*, sehingga hasil akhir hanya berdasarkan satu sudut pandang pemindaian. Padahal, dalam praktik nyata, pemodelan objek kompleks membutuhkan data dari berbagai arah yang harus disatukan. Registrasi *Point cloud* adalah proses penting dalam pengolahan data TLS, yaitu menyatukan hasil pemindaian dari beberapa posisi menjadi satu sistem koordinat yang konsisten. Dua metode registrasi yang umum digunakan adalah *Cloud to Cloud* (C2C) dan *Target to Target* (T2T). Metode C2C mengandalkan kecocokan bentuk geometris antar data yang saling tumpang tindih tanpa menggunakan target fisik, sementara T2T menggunakan titik-titik acuan yang diketahui posisinya sebagai pengikat antar hasil pemindaian. Agar kedua metode registrasi ini dapat diterapkan secara optimal, terdapat beberapa syarat teknis yang perlu dipenuhi. Pada metode C2C, diperlukan adanya area tumpang tindih (*overlapping area*) yang memadai antara hasil pemindaian, umumnya minimal 30% dari luasan permukaan objek, serta struktur geometris objek yang cukup kompleks atau tidak seragam agar algoritma dapat mengenali dan menyalarkan bentuk permukaan. Sementara pada metode T2T, diperlukan keberadaan titik-titik ikat yang dapat dikenali secara visual dari beberapa posisi alat dan memiliki informasi koordinat yang akurat dari pengukuran *Total Station* maupun dari elemen bangunan yang diidentifikasi sebagai penanda yang konsisten. Kedua metode ini juga bergantung pada kualitas data hasil akuisisi, resolusi pemindaian, dan keteraturan posisi pemindaian di lapangan (Genechten, 2008).

Lokasi penelitian dipilih di bangunan Kantor BAZNAS Provinsi Lampung karena memiliki karakteristik arsitektural yang sesuai untuk penerapan kedua metode registrasi. Bangunan ini terdiri dari sisisi dinding yang memiliki elemen pembeda seperti jendela, pintu, dan sudut bangunan yang tegas, yang dapat digunakan sebagai titik acuan dalam metode *Target to Target*. Selain itu, area sekitar bangunan yang luas sehingga memungkinkan dilakukan akuisisi untuk mendapatkan tumpang tindih yang cukup antara beberapa posisi pemindaian, yang menjadi salah satu syarat utama dalam penerapan metode *Cloud to Cloud*.

Bangunan ini juga mempunyai detail permukaan (fasad) yang tidak terlalu kompleks juga tidak terlalu polos sehingga cocok untuk dilakukan penelitian menggunakan alat TLS100 yang tergolong *low-cost*. Hingga saat ini, kajian yang secara khusus membandingkan ketelitian hasil TLS100 dengan pendekatan registrasi *Cloud to Cloud* (C2C), dan *Target to Target* (T2T) masih terbatas, sehingga penelitian ini dilakukan untuk melanjutkan kajian sebelumnya dengan mengevaluasi pengaruh metode registrasi terhadap akurasi hasil pengukuran TLS100. Fokus penelitian ini adalah membandingkan ketelitian hasil pemodelan bangunan antara dua pendekatan registrasi tersebut, sehingga dapat diketahui metode mana yang paling baik untuk diterapkan dalam pemodelan 3D menggunakan TLS100.

2. Metodologi

2.1. Tahapan Penelitian



Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.2. Lokasi Penelitian

Lokasi tempat penelitian di bangunan dari kantor BAZNAZ Berlokasi di kantor BAZNAS Provinsi Lampung tepatnya di Jalan Soekarno Hatta Nomor 8, Rajabasa Raya, Kecamatan Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung kode pos 35142.

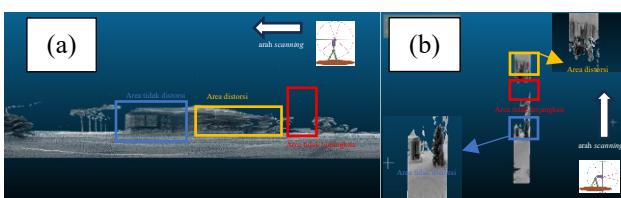


Gambar 2. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di kantor BAZNAS Provinsi Lampung yang berlokasi di Kota Bandar Lampung. Lokasi ini dipilih karena bangunannya memiliki detail eksterior yang kompleks dan representatif, sehingga sesuai untuk menguji kemampuan serta ketelitian TLS low-cost dalam pemodelan 3D bangunan.

2.3. Tahap Persiapan

Tahap persiapan merupakan tahapan untuk menentukan literatur yang digunakan sebagai acuan dasar dalam melakukan penelitian, literatur seperti buku, jurnal dan penelitian terdahulu yang berkaitan. Selain dari pada menentukan studi literatur, didalam tahapan persiapan juga terdapat pengecekan kondisi dan kemampuan alat Lidar TLS100 yang akan digunakan. Proses pengecekan orientasi rotasi dimaksudkan untuk mengetahui dan menentukan arah rotasi yang baik digunakan dalam pengukuran bangunan. Proses ini diperlukan karena dilatar belakangi oleh masalah yang ditimbulkan akibat dari penyesuaian bacaan jarak yang kurang baik setelah melakukan *scanning* pada jarak yang tidak terjangkau oleh alat hingga terjadinya *Noise* atau distorsi dimensi yang disebabkan adanya penyesuaian bacaan jarak dan sudut pada alat.



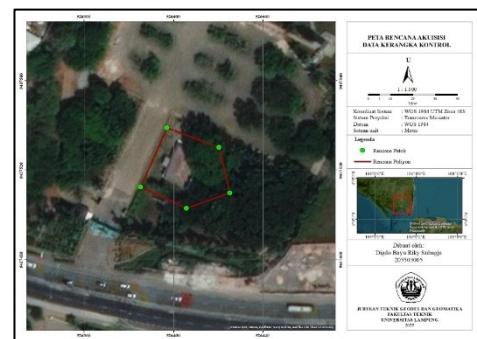
Gambar 3. (a) Scanning dengan kondisi alat posisi tegak, dan (b) posisi berbaring atau tidak tegak. Area berwarna biru (area tidak distorsi/noise), area berwarna kuning (mengalami distorsi/noise), dan area berwarna merah Adalah (area tidak terjangkau) pemicu terjadinya distorsi/noise.

2.4. Tahap Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data pada penelitian ini terdiri dari dua kegiatan utama, yaitu pengukuran kerangka kontrol dan akuisisi data menggunakan Lidar TLS100

a. Pengukuran Kerangka Kontrol

Pengukuran kerangka horizontal dan vertikal dilakukan untuk menjadi titik acuan pengukuran posisi GCP. Kerangka horizontal dan vertikal menggunakan patok yang mengelilingi area penelitian. Di setiap patok nantinya alat pengukuran Total Station, dan *waterpass* didirikan untuk mengukur posisi kerangka dan juga posisi mark GCP.



Gambar 4. Lokasi Pengukuran Poligon

a. Pemindaian Lidar TLS100

Pemindaian data dilakukan pada lingkungan bangunan Kantor BAZNAS Provinsi Lampung dengan mempertimbangkan kebutuhan cakupan pemindaian dan ketelitian hasil pemodelan. Pemindaian dilakukan dari 28 posisi yang mengelilingi bangunan dengan jarak rata-rata ± 8 meter dari fasad terluar bangunan.



Gambar 5. Posisi Pemindaian

Penentuan jumlah dan persebaran titik pemindaian dilakukan untuk memastikan adanya tumpang tindih area pemindaian (*overlapping area*) yang memadai pada setiap sisi bangunan, yang menjadi syarat penting dalam penerapan metode registrasi *Cloud to Cloud* (C2C). Selain itu, pada beberapa elemen bangunan yang memiliki ciri geometris jelas seperti sudut dinding, kusen jendela, dan pertemuan bidang vertikal-

horizontal, ditetapkan *Ground Control Point* (GCP) yang koordinatnya diukur menggunakan Total Station.



Gambar 6. Persebaran titik GCP

Titik-titik ini berfungsi sebagai acuan pada proses registrasi *Target to Target* (T2T), sehingga model hasil pemindaian dapat terikat pada sistem koordinat yang konsisten. Dengan demikian, rancangan akuisisi data pada penelitian ini memastikan dukungan optimal baik untuk registrasi berbasis geometri (C2C) maupun berbasis kontrol spasial (T2T).

2.5. Tahap Pengolahan

Tahapan pengolahan data terdiri dari pengolahan data poligon dan pengolahan data *point cloud* TLS100. Pengukuran poligon menghasilkan data sudut dan jarak yang diolah menjadi koordinat (X, Y, Z). Sedangkan, Pemindaian menggunakan TLS100 menghasilkan data sudut pitch, yaw, dan jarak. Data ini perlu diolah dengan berbagai proses seperti.

1. Proses Kalibrasi *Point cloud*

Proses kalibrasi *Point cloud* dilakukan untuk mengubah data mentah hasil akuisisi TLS100 yang terdiri atas indeks sudut horizontal (*yaw*), indeks sudut vertikal (*pitch*), dan jarak (*range*) menjadi koordinat spasial tiga dimensi dalam sistem kartesian lokal (X, Y, Z). Konversi ini dilaksanakan secara otomatis melalui fungsi pemrograman berbasis *JavaScript* yang dijalankan dalam modul *Extensions Converter*. Fungsi tersebut dirancang untuk menerapkan parameter kalibrasi alat berupa besaran perubahan sudut per indeks pemindaian (baik secara vertikal maupun horizontal) dan koreksi sudut awal vertikal (*offset pitch*), sehingga setiap baris data mentah dapat diproses secara matematis menjadi representasi spasial yaitu Koordinat dan elevasi lokal.

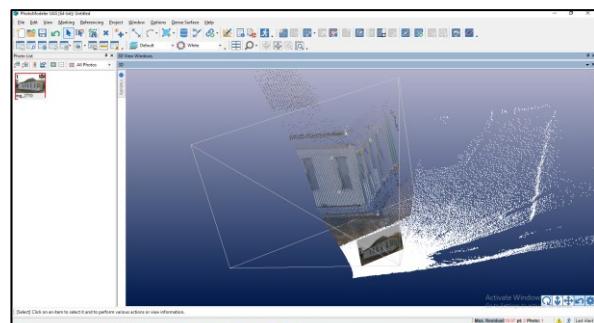
2. Proses Segmentasi *Point cloud*

Proses segmentasi *Point cloud* merupakan pemisahan data ke dalam kelompok berdasarkan karakteristik tertentu untuk memudahkan analisis

(Martinez dan McMahan, 2023). Segmentasi ini juga mendukung eliminasi data yang tidak diperlukan secara manual atau mengidentifikasi secara mandiri titik yang tidak diinginkan (*noise*).

3. Proses Pewarnaan *Point cloud*

Pewarnaan *Point cloud* dilakukan sebagai bagian dari tahapan visualisasi data hasil pemindaian TLS100, bukan sebagai bagian dari pengukuran dimensi langsung. Tujuan pewarnaan untuk memberikan informasi tambahan berupa warna (RGB) pada tiap titik *Point cloud* agar lebih mudah dikenali dan diinterpretasikan secara visual. Pewarnaan *Point cloud* dilakukan menggunakan perangkat lunak *PhotoModeler*, dengan memanfaatkan foto RGB dari objek yang diambil selama proses akuisisi data di lapangan.



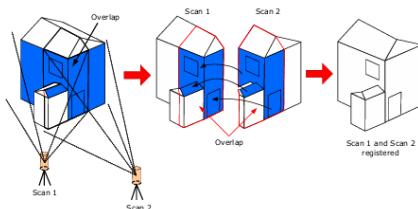
Gambar 7. Proses Pewarnaan *Point Cloud*

4. Registrasi *Point cloud*

Registrasi *Point cloud* merupakan proses penting dalam mengintegrasikan data hasil pemindaian dari berbagai posisi alat TLS100 ke dalam satu sistem koordinat yang konsisten. Proses ini memungkinkan penggabungan data awan titik dari beberapa sudut pengamatan menjadi satu model tiga dimensi yang utuh dan akurat. Dalam penelitian ini digunakan dua metode registrasi, yaitu registrasi antar awan titik (*Cloud to Cloud*) dan registrasi berbasis titik Target/kontrol (*Target to Target*), untuk mengevaluasi pengaruh pendekatan registrasi terhadap ketelitian hasil pemodelan bangunan (Reshetnyuk, 2009).

A. Registrasi Antar Awan Titik (*Cloud to Cloud*)

Metode registrasi antar awan titik dilakukan dengan menyelaraskan hasil pemindaian dari dua posisi alat TLS tanpa menggunakan target fisik. Menurut (Genechten, 2008). Registrasi ini mengandalkan kesesuaian bentuk permukaan objek dari bangunan, khususnya melalui titik-titik alami (*natural point*) seperti sudut dinding, pertemuan antar bidang, atau tepi jendela. Agar metode ini dapat diterapkan secara optimal.



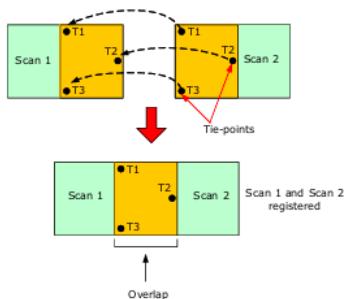
Gambar 8. Registration *Cloud to Cloud*.
(Reshetuk, 2009)

Syarat-syarat yang harus dipenuhi antara lain:

1. Dua posisi alat harus menangkap atau memindai bagian bangunan yang sama Misalnya sudut bangunan atau sisi dinding tertentu harus terekam dari dua sudut pandang berbeda agar bisa dibandingkan.
2. Penyelarasan sementara untuk pendekatan berdasarkan bentuk geometris yang khas dan konsisten. Proses penyelarasan sementara ini berguna agar perangkat lunak dapat menggunakan algoritma internal untuk mendeteksi kesesuaian bentuk geometris dan melakukan proses penggabungan.
3. Bangunan Memiliki Geometri yang Tegas atau Kompleks Permukaan bangunan yang datar dan tidak memiliki ciri khas akan menyulitkan proses pencocokan antar awan titik.
4. Terdapat Data tumpang tindih Minimal 30–40%. Area tumpang tindih antar hasil pemindaian diperlukan agar sistem dapat membandingkan permukaan bangunan secara tepat dan efektif.

B. Registrasi Berbasis Titik Kontrol (*Target to Target*)

Berbeda dengan metode *Cloud to Cloud*, registrasi berbasis titik kontrol dilakukan dengan mencocokkan posisi hasil pemindaian terhadap titik-titik yang posisinya telah diketahui sebelumnya, seperti hasil pengukuran titik kontrol tanah (*Ground Control Point*, disingkat GCP) (Genechten, 2008).



Gambar 9. Registrasi *Target to Target*
(Reshetuk, 2009)

Dalam penelitian ini, titik kontrol tersebut tidak ditandai menggunakan mark (*pemark*) khusus, tetapi diidentifikasi dari bentuk dan warna alami objek

bangunan yang mudah dikenali, seperti pojok lantai, sudut jendela, atau tepi dinding. Adapun syarat-syarat teknis yang diperlukan dalam penerapan metode ini meliputi:

1. Awan Titik Telah Diberi Warna (Berbasis Citra/Gambar) Data hasil pemindaian perlu dilengkapi dengan informasi warna dari hasil dokumentasi foto agar memudahkan proses identifikasi visual titik referensi.
2. Registrasi Mengacu pada Titik Kontrol Tanah (GCP) Proses ini dilakukan dengan mencocokkan posisi titik-titik hasil pemindaian terhadap GCP yang telah diukur sebelumnya secara presisi. Titik-titik ini biasanya berada pada bagian struktural bangunan yang jelas dan tetap.
3. Titik Harus Terlihat pada Minimal Dua Data Pemindaian Setiap titik referensi harus terlihat jelas pada minimal dua hasil pemindaian dan dapat dikenali dari setidaknya tiga tampilan, agar registrasi dapat dilakukan secara stabil.
4. Sebaran Titik Tidak dalam Satu Garis Lurus Titik-titik yang digunakan sebaiknya tersebar secara spasial dan tidak berada dalam satu garis lurus, untuk menjaga kestabilan proses rotasi dan translasi selama registrasi.
5. Pemilihan Titik Dilakukan Secara Manual Menggunakan Perangkat Lunak Penentuan titik dilakukan melalui perangkat lunak pemrosesan awan titik seperti *CloudCompare*, dengan memperbesar tampilan dan mengklik langsung bagian struktur yang dikenali secara visual.
6. Kondisi Visual Titik Harus Jelas dan Konsisten Titik-titik yang digunakan tidak boleh tertutup, kabur, atau mengalami perubahan bentuk dalam hasil pemindaian, karena tidak adanya tanda fisik di lapangan membuat kejelasan visual menjadi sangat penting.

Registrasi berbasis titik kontrol (*Target to Target*) pada penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan titik-titik objek bangunan yang telah diketahui koordinatnya melalui pengukuran detail menggunakan *Total Station*. Titik kontrol tersebut berperan sebagai acuan utama dalam proses registrasi *Point cloud*.

2.4. Tahap Analisis

Analisis data pada penelitian ini dilakukan untuk menilai tingkat ketelitian model 3D yang dihasilkan dari proses registrasi *point cloud* menggunakan metode *Cloud to Cloud* (C2C) dan *Target to Target* (T2T). Analisis ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana kedua metode registrasi tersebut mampu menghasilkan model yang mendekati kondisi geometris bangunan sebenarnya. Pertama, dilakukan evaluasi ketelitian

dimensi dengan membandingkan ukuran elemen bangunan pada model hasil pemindaian terhadap ukuran referensi yang diperoleh dari pengukuran *Total Station*. Selisih nilai tersebut kemudian dinyatakan dalam bentuk persentase deviasi, sehingga dapat menunjukkan tingkat perbedaan geometris secara terukur. Tahapan ini penting karena ketelitian dimensi menjadi indikator utama kesesuaian bentuk antara model dan objek nyata. Selanjutnya, dilakukan analisis ketelitian spasial menggunakan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{ref})^2} \quad (1)$$

Keterangan:

RMSE : Root Mean Square Error

x_i : Nilai hasil ukuran *point cloud* (TLS100)

x_{ref} : Nilai yang dianggap benar (total station)

Nilai RMSE dihitung dari selisih jarak antara titik pada model hasil registrasi dengan titik acuan referensi, sehingga memberikan gambaran mengenai distribusi kesalahan secara keseluruhan. Dengan demikian, semakin kecil nilai RMSE, maka semakin baik akurasi registrasi yang dihasilkan.

Analisis dilanjutkan dengan melakukan perhitungan volume bangunan pada model 3D untuk kedua metode registrasi. Nilai volume yang diperoleh dibandingkan dengan volume referensi, kemudian dinyatakan dalam bentuk deviasi volume (%). Nilai Selisih ini selanjutnya dibandingkan dengan batas kesalahan yang diperbolehkan menurut standar *ASTM D6172-98*, yaitu maksimum 2%. Perbandingan ini menjadi dasar untuk menentukan apakah hasil pemodelan dapat diterima dalam konteks pengukuran volume teknis. Melalui rangkaian analisis ini, diperoleh pemahaman yang utuh mengenai pengaruh metode registrasi terhadap ketelitian pemodelan 3D, sehingga dapat ditentukan metode yang paling sesuai dan andal untuk penggunaan TLS100 dalam pemetaan bangunan (*ASTM*, 1998).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil perhitungan Kerangka Kontrol

Kerangka kontrol dibangun dari lima titik poligon yang diukur menggunakan *Total Station*.

Table 1. Kesalahan kerangka kontrol

No	Nama	Nilai
1	Kesalahan linier	0,00815 m
2	Kesalahan Penutup Sudut (horizontal)	5,0" (detik)
3	kesalahan penutup beda tinggi (vertikal)	0,0026 meter

3.2. Hasil Registrasi

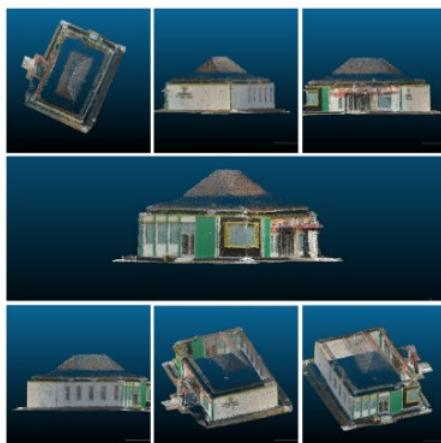
Registrasi *point cloud* merupakan tahap penyelarasan data hasil pemindaian dari beberapa posisi agar berada dalam satu sistem koordinat yang sama. Pada penelitian ini digunakan dua metode registrasi, yaitu *Cloud to Cloud* (C2C) dan *Target to Target* (T2T). Kedua metode tersebut memberikan luaran model 3D yang utuh, namun menunjukkan karakteristik ketelitian yang berbeda.

Tabel 2. Error Registrasi

No	<i>Cloud to Cloud</i>		<i>Target to Target</i>	
	Keterangan	Eror RMS (m)	Keterangan	Eror RMS (m)
1	scan 1-2	0,0209	scan 1	0,0667
2	scan 2-3	0,0286	scan 2	0,0747
3	scan 3-4	0,0224	scan 3	0,093
4	scan 4-5	0,0247	scan 4	0,0807
5	scan 5-6	0,0212	scan 5	0,0405
6	scan 6-7	0,0224	scan 6	0,0555
7	scan 7-8	0,0487	scan 7	0,0791
8	scan 8-9	0,0248	scan 8	0,0596
9	scan 9-10	0,0194	scan 9	0,0397
10	scan 10-11	0,0251	scan 10	0,0228
11	scan 11-12	0,0167	scan 11	0,0398
12	scan 12-13	0,0391	scan 12	0,0246
13	scan 13-14	0,0223	scan 13	0,0549
14	Scan 14-15	0,0325	scan 14	0,0339
15	Scan 15-16	0,018	scan 15	0,0882
16	scan 16-17	0,0211	scan 16	0,0759
17	scan 17-18	0,0308	scan 17	0,0865
18	scan 18-19	0,0205	scan 18	0,0713
19	scan 19-20	0,024	scan 19	0,073
20	scan 20-21	0,0472	scan 20	0,0691
21	Scan 21-22	0,0531	scan 21	0,052
22	scan 20-21	0,0252	scan 22	0,0862
23	scan 24-23	0,0287	scan 23	0,1517
24	scan 25-24	0,0297	scan 24	0,0426
25	scan 26-25	0,0206	scan 25	0,0728
26	Scan 27-26	0,0241	scan 26	0,0611
27	Scan 28-27	0,0287	scan 27	0,0431
28	scan 28-1	0,0573	scan 28	0,0558

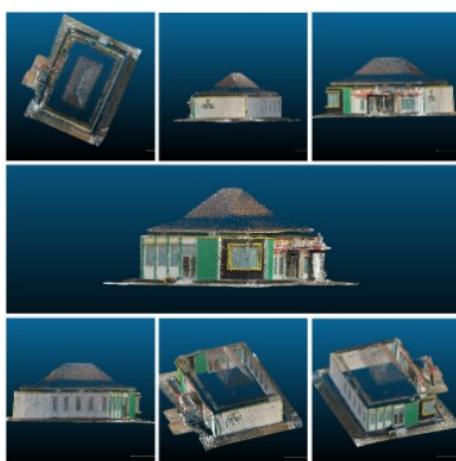
Registrasi Hasil registrasi *Cloud to Cloud* (C2C) menunjukkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) yang berada pada kisaran 0,0167 m hingga 0,0573 m,

dengan rata-rata sebesar 0,0285 m. Sebagian besar pasangan *scan* memiliki nilai RMS pada rentang 0,02–0,03 m, yang menunjukkan bahwa proses penyelarasan berlangsung stabil pada area yang memiliki *overlapping surface* yang baik. Namun demikian, terdapat beberapa pasangan *scan* dengan nilai RMS yang lebih tinggi, seperti pada *scan* 7–8, 20–21, 21–22, dan 28–1. Nilai kesalahan yang meningkat pada pasangan tersebut diduga disebabkan oleh keterbatasan area tumpang tindih serta kurangnya variasi fitur permukaan pada bagian fasad yang relatif datar, sehingga mengurangi kemampuan algoritma ICP dalam mengenali pola geometri untuk penyelarasan.



Gambar 10. Hasil Registrasi C2C

Nilai RMSE registrasi *Target to Target* (T2T) berada pada rentang 0,0228 m hingga 0,1517 m, dengan rata-rata sebesar 0,0641 m. Nilai kesalahan terendah ditemukan pada *scan* 10 dan 12, menunjukkan bahwa pada bagian tersebut titik kontrol dapat diidentifikasi dengan jelas dan dari sudut pandang pemindaian yang memadai. Sebaliknya, nilai kesalahan tertinggi terdeteksi pada *scan* 23. Tingginya nilai kesalahan ini diasumsikan dipengaruhi oleh orientasi pemindaian yang kurang optimal serta kesulitan dalam identifikasi GCP secara visual pada sisi bangunan tersebut.

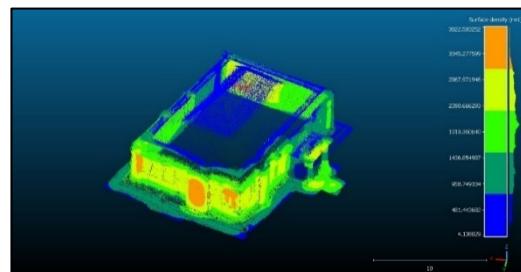


Gambar 11. Hasil Registrasi T2T

3.3. Hasil Model Point cloud (Surface Density)

Surface density (kerapatan permukaan) pada data point cloud merupakan indikator penting untuk mengetahui distribusi kerapatan titik pada model hasil registrasi. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas pemodelan dengan memperhatikan sebaran titik (titik/m^3) yang terbentuk pada permukaan objek.

A. Tampilan Surface Density Cloud to Cloud



Gambar 12. Surface Density Cloud to Cloud

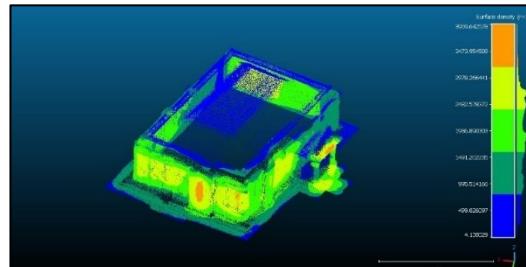
Hasil klasifikasi *surface density* dari metode *Cloud to Cloud* menampilkan pembagian tingkat kerapatan titik ke dalam beberapa kelas, sehingga memudahkan dalam mengidentifikasi distribusi kerapatan pada model *Point cloud*

Tabel 3. Kelas Kerapatan titik registrasi *Cloud to Cloud*

No	Kelas Kerapatan	Nilai Kerapatan titik dalam (1 m^3)	Total Titik dalam Kelas	Persentase	Color Class
1	Kelas 1	0-764	69.638	10,7%	■
2	Kelas 2	765-1529	152.482	23,5%	■
3	Kelas 3	1530-2293	218.096	33,6%	■
4	Kelas 4	2294-3058	174.791	27,0%	■
5	Kelas 5	3059+	33.518	5,2%	■
		Total	648.527	100.0%	

Distribusi kerapatan titik C2C didominasi oleh kelas menengah ke atas. Kelas 3 (Sedang) menjadi yang terbesar dengan 33,6%. Area dengan kerapatan tinggi (Kelas 4 dan 5) menyumbang 32,2% (27,0% + 5,2%) dari total *point cloud*. Konsentrasi tinggi ini umumnya muncul pada area dengan *overlap* (tumpang tindih) yang tinggi antar *scan*.

B. Tampilan Surface Density Target to Target



Gambar 13. Tampilan Surface Density Target to Target

Tabel 4. Kelas Kerapatan titik registrasi *Target to Target*

No	Kelas Kerapatan	Nilai Kerapatan titik dalam (1 m^3)	Total Value Kelas	Persentase	Color Class
1	Kelas 1	0-793	82.429	12,7%	Blue
2	Kelas 2	794-1587	176.739	27,3%	Green
3	Kelas 3	1588-2381	216.398	33,4%	Yellow
4	Kelas 4	2382-3175	155.145	23,9%	Orange
5	Kelas 5	3176+	17.816	2,7%	Red
Total		648.527	100,0%		

Distribusi T2T juga menunjukkan dominasi di Kelas 3 (Sedang) sebesar 33,4%. Namun, proporsi titik di area kerapatan tinggi (Kelas 4 dan 5) secara signifikan lebih rendah (total 26,6%). Sebaliknya, T2T memiliki proporsi yang lebih besar di area kerapatan rendah (Kelas 1 dan 2) sebesar 40,0%.

3.4. Ketelitian Dimensi Model Bangunan

Ketelitian dimensi model bangunan dievaluasi dengan membandingkan ukuran geometris hasil pemodelan *point cloud* terhadap data referensi pengukuran lapangan menggunakan *Total Station*. Parameter yang dibandingkan meliputi panjang sisi bangunan, tinggi dinding, dan ukuran elemen arsitektural lainnya. Hasil perbandingan disajikan dalam bentuk nilai selisih relatif (%), serta *Root Mean Square (RMS)* untuk menunjukkan tingkat ketelitian keseluruhan model.

Tabel 5. Hasil Ketelitian Dimensi Model Bangunan

No	keterangan	kode	Perbedaan		
			Selisih TS-C2C	Selisih TS-T2T	Selisih (%) TS-C2C
1	tinggi jendela depan kiri	a	0,014	0,019	0,0002
2	lebar jendela depan kiri	b	0,014	0,044	0,0002
3	persegi timbul (lebar) sisi depan kanan	c	0,11	0,047	0,0121
4	persegi timbul (tinggi) sisi depan kanan	d	0,137	0,046	0,0188
5	lebar atap teras depan	e	0,093	0,036	0,0086
6	lebar jendela kanan depan (bagian lis dalam)	f	0,022	0,014	0,0005
7	lebar persegi timbul sisi kanan	g	0,158	0,031	0,0250
8	lebar jendela samping pintu sisi kanan	h	0,027	0,036	0,0007
9	lebar kaca jendela tengah sisi kanan	i	0,024	0,016	0,0006
10	tinggi kaca jendela tengah sisi kanan	j	0,093	0,043	0,0086
11	tinggi dari jendela nomor dua dari kanan	k	0,054	0,046	0,0029
12	lebar antar jendela bagian paling kanan	l	0,096	0,005	0,0002
13	panjang saluran air bagian terdekat bangunan	m	0,084	0,016	0,0071
14	lebar antar jendela paling kiri sisi belakang	n	0,032	0,035	0,0010
15	tinggi dari jendela nomor dua dari kiri	o	0,035	0,064	0,0012
16	tinggi pojok bangunan paling belakang	p	0,032	0,008	0,0010
17	panjang atap bangunan	q	0,145	0,136	0,0210
18	panjang saluran air bagian terdekat bangunan	r	0,073	0,093	0,0053
19	panjang saluran air bagian terluar bangunan	s	0,121	0,034	0,0146
20	tinggi pojok bangunan paling depan	t	0,033	0,046	0,0011
			RMSE	0,0836	0,0503

Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode *Target to Target (T2T)* menghasilkan nilai deviasi dimensi yang lebih kecil dibandingkan metode *Cloud to Cloud (C2C)*. Nilai rata-rata deviasi dimensi pada model hasil registrasi T2T adalah 0,39%, sedangkan pada model C2C sebesar 2,02%. Nilai ini mengindikasikan bahwa

T2T mampu mempertahankan proporsi bentuk bangunan secara lebih konsisten dibandingkan C2C. Selain itu, nilai *Root Mean Square (RMS)* ketelitian dimensi juga menunjukkan perbedaan yang serupa. Model hasil T2T memiliki nilai RMS sebesar 5,03 cm, sedangkan model hasil C2C memiliki nilai RMS sebesar 8,36 cm. RMS yang lebih kecil pada T2T menunjukkan bahwa sebaran pergeseran koordinat titik terhadap referensi lebih rendah, sehingga model lebih mendekati bentuk sebenarnya.

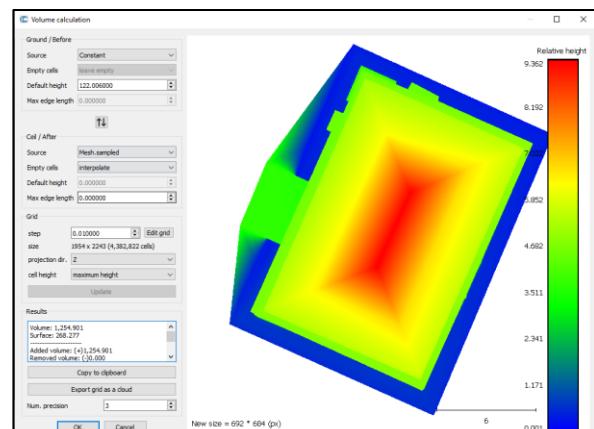
Tabel 6. RMSE Dimensi Ukuran Bangunan

Metode Registrasi	RMS (cm)
<i>Cloud to Cloud (C2C)</i>	8,36 cm
<i>Target to Target (T2T)</i>	5,03 cm

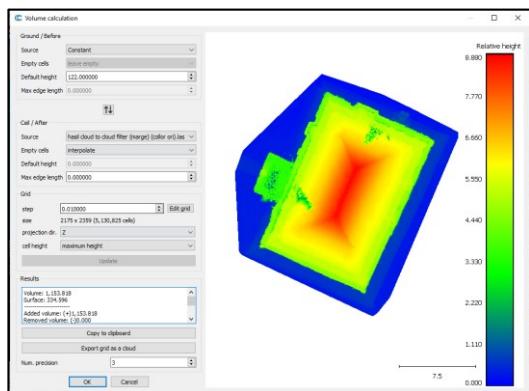
Perbedaan nilai RMS tersebut terutama dipengaruhi oleh dasar penyelarasan koordinat. Metode C2C hanya mengandalkan kecocokan bentuk permukaan (*surface matching*), sehingga pergeseran kecil pada area fasad datar dapat menyebabkan distorsi dimensi secara keseluruhan. Sebaliknya, metode T2T memanfaatkan titik kontrol (*Ground Control Point / GCP*) dengan koordinat yang diketahui, sehingga orientasi dan skala model lebih terjaga.

3.5. Perbandingan Volume

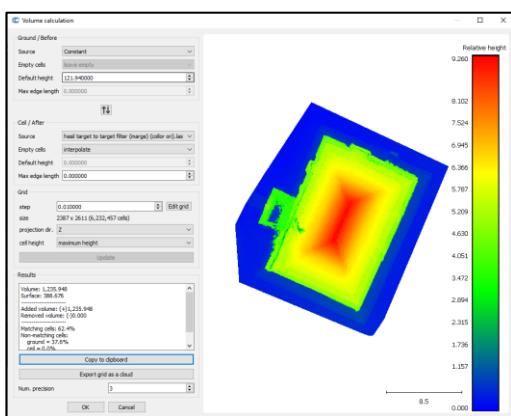
Perbandingan volume dilakukan untuk menilai ketelitian model bangunan hasil pemindaian TLS100 terhadap data referensi lapangan. Volume bangunan dihitung dari model 3D hasil registrasi *point cloud* menggunakan metode *Cloud to Cloud (C2C)* dan *Target to Target (T2T)*, kemudian dibandingkan dengan volume bangunan yang dihitung berdasarkan pengukuran *Total Station*. Nilai deviasi volume disajikan dalam bentuk persentase untuk menggambarkan tingkat perbedaan antar metode.



Gambar 14. Hasil Perhitungan Volume bangunan data detail dari Total Station



Gambar 15. Hasil Perhitungan Volume Bangunan data hasil registrasi *Cloud to Cloud*



Gambar 16. Hasil Perhitungan Volume Bangunan data hasil registrasi *Target to Target*

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa model hasil registrasi T2T memiliki nilai volume yang paling mendekati data referensi. Model T2T menghasilkan volume sebesar $1.235,948 \text{ m}^3$, dengan deviasi 1,51% dari nilai acuan sebesar $1.254,901 \text{ m}^3$.

Tabel 7. Hasil Perhitungan Volume Bangunan

No	Keterangan	Volume(m^3)
1	<i>Total Station</i>	1254,901
2	<i>Cloud to Cloud</i>	1153,818
3	<i>Target to Target</i>	1235,948

Nilai Selisih yang berada di bawah batas toleransi 2% berdasarkan standar ASTM D6172-98 mengindikasikan bahwa model T2T layak digunakan untuk analisis kuantitatif, seperti estimasi kapasitas ruang dan kajian volume bangunan. Sebaliknya, model hasil registrasi C2C menghasilkan volume sebesar $1.153,818 \text{ m}^3$, dengan selisih 8,05% dari nilai acuan. Nilai ini berada jauh di atas batas toleransi yang ditetapkan, yang berarti bahwa model C2C kurang sesuai untuk keperluan yang menuntut ketelitian volumetrik tinggi. selisih tersebut diduga disebabkan oleh pergeseran bidang fasad yang muncul akibat

keterbatasan *overlapping surface* pada proses registrasi berbasis pencocokan permukaan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai kajian ketelitian hasil pengukuran Lidar TLS100 dengan metode registrasi *Cloud to Cloud* (C2C) dan *Target to Target* (T2T) maka diperoleh Simpulan sebagai berikut:

1. Hasil uji RMS Ketelitian Geometris membuktikan bahwa metode *Target to Target* (T2T) memiliki tingkat akurasi yang secara signifikan lebih baik (RMS 5.03 cm) dibandingkan *Cloud to Cloud* (C2C) (RMS 8.36 cm). Perbedaan RMS yang sebesar 66% ini mengkonfirmasi C2C tidak menghasilkan akurasi baik pada hasil model *point cloud*.
2. Berdasarkan pengujian volumetrik mengacu pada standar *American Society for Testing and Materials* (ASTM D6172-98), metode T2T menghasilkan volume sebesar $1.235,948 \text{ m}^3$ dengan deviasi 1,51% terhadap *Total Station* ($1.254,901 \text{ m}^3$), sedangkan metode C2C memiliki deviasi 8,05%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode T2T memenuhi batas toleransi kesalahan ASTM sebesar <2%, sehingga dinyatakan lebih akurat dalam estimasi volume bangunan dibandingkan metode C2C.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa metode *Target to Target* lebih unggul dalam menghasilkan data *Point cloud* yang akurat dan konsisten, baik dari segi registrasi maupun kesesuaian ukuran dimensi terhadap referensi (*Total Station*).

Daftar Pustaka

- ASTM. 1998. *Standard Test Method for Determining the Volume of Bulk Materials Using Contours or Cross Sections Created by Direct Operator Compilation Using Photogrammetric Procedures. Terrain*, 98 (Reapproved), 1–7.
- Genechten, M. S. Q. and B. Van. (2008). Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning. *Learning Tools for Advanced Three-Dimensional Surveying in Risk Awareness Project*, June, 1–241.
- Martinez, E. S., & McMahan, R. P. (2023). *RecolorCloud: A Point Cloud Tool for Recoloring, Segmentation, and Conversion*. <http://arxiv.org/abs/2310.12470>
- Rahmawati, N., Prasetyo, Y., & Hadi, F. (2021). Pemodelan Model 3D Menggunakan Metode TLS (Terrestrial Laser Scanner) (Studi Kasus: Candi Plaosan Lor, Kabupaten Klaten). *Geodesi Undip*, 10, 224–232. <https://jom.unpk.ac.id/index.php/teknikgeodesi/article/view/1210>
- Reshetyuk, Y. (2009). *Terrestrial Laser Scanning, Error Source, Self-calibration, And Direct Georeferencing*. Saarbrucken, Germany: VDM Verlag Dr. Muller, 20. www.acsr.org