

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

(Skripsi)

Oleh

**Digdo Bayu Riky Subagja
NPM 2055013005**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

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

Oleh

DIGDO BAYU RIKY SUBAGJA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

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

OLEH

DIGDO BAYU RIKY SUBAGJA

Teknologi *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) berperan penting dalam survei dan pemodelan 3D bangunan. Salah satu inovasi lokal, TLS100 dari Potretudara, menawarkan keunggulan biaya dan portabilitas. Namun, akurasi pengukurannya perlu dikaji lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi ketelitian TLS100 dengan membandingkan dua metode registrasi *point cloud*: *Cloud to Cloud* (C2C) dan *Target to Target* (T2T). Sebagai pembanding, digunakan data referensi *Total Station* dengan lokasi studi di Gedung Kantor BAZNAS Provinsi Lampung.

Pengambilan data dilakukan pada 28 titik berdiri alat dengan jarak antar posisi 8 meter. Tahapan pemrosesan data meliputi kalibrasi, segmentasi, registrasi, dan analisis geometris. Evaluasi ketelitian mencakup lima parameter utama, yaitu kerapatan *point cloud*, uji *Root Mean Square* (RMS) registrasi, dan validasi posisi *Independent Check Points* (ICP). Selain itu, dilakukan pengujian volumetrik sesuai standar ASTM D6172-98 serta uji ketelitian peta mengacu pada SNI 8202:2019.

Hasil penelitian menunjukkan metode T2T lebih akurat dibandingkan C2C. Walaupun C2C menghasilkan kerapatan poin lebih tinggi, metode T2T lebih presisi dengan RMS registrasi 5,03 cm dan RMSE global 0,0908 m. Sebaliknya, metode C2C memiliki RMS 8,36 cm dan RMSE global 0,1304 m. Pada analisis volume, hanya T2T yang memenuhi toleransi ASTM ($<2\%$) dengan deviasi 1,51%, sedangkan C2C mencapai 8,05%. Berdasarkan SNI 8202:2019, T2T juga unggul dengan ketelitian horizontal 0,13 m dan vertikal 0,06 m. Dengan demikian, metode T2T lebih direkomendasikan untuk pemodelan 3D menggunakan TLS100.

Kata kunci: TLS100, *Point cloud*, *Cloud to Cloud*, *Target to Target*, Registrasi,

ABSTRACT

AN ACCURACY STUDY OF TLS100 LIDAR MEASUREMENT RESULTS PRODUCED BY POTRETUDARA USING CLOUD TO CLOUD AND TARGET TO TARGET METHODS (CASE STUDY: BAZNAS PROVINCIAL OFFICE BUILDING, LAMPUNG)

BY

DIGDO BAYU RIKY SUBAGJA

Terrestrial Laser Scanner (TLS) technology plays a pivotal role in surveying and 3D building modeling. A local innovation, the TLS100 by Potretudara, offers advantages in cost and portability; however, its measurement accuracy requires further assessment. This study aims to evaluate the accuracy of the TLS100 by comparing two point cloud registration methods: Cloud to Cloud (C2C) and Target to Target (T2T). Total Station data served as the reference for the case study conducted at the BAZNAS Office Building in Lampung Province. Data acquisition was performed at 28 scan stations with an 8-meter interval between positions. Data processing stages included calibration, segmentation, registration, and geometric analysis. The accuracy evaluation encompassed five key parameters: point cloud density, Root Mean Square (RMS) registration error, and position validation using Independent Check Points (ICP). Furthermore, volumetric testing was conducted in accordance with the ASTM D6172-98 standard, along with map accuracy testing referring to SNI 8202:2019. The results indicate that the T2T method is more accurate than C2C. Although C2C yielded a higher point density, the T2T method demonstrated greater precision with a registration RMS of 5.03 cm and a global RMSE of 0.0908 m. In contrast, the C2C method resulted in an RMS of 8.36 cm and a global RMSE of 0.1304 m. In the volumetric analysis, only T2T met the ASTM tolerance ($<2\%$) with a deviation of 1.51%, whereas C2C reached 8.05%. Based on SNI 8202:2019, T2T also demonstrated superior performance with a horizontal accuracy of 0.13 m and a vertical accuracy of 0.06 m. Consequently, the T2T method is recommended for 3D modeling using the TLS100.

Keywords: TLS100, Point cloud, Cloud to Cloud, Target to Target, Registration,

HALAMAN PENGESAHAN

Judul : Kajian Ketelitian Hasil Pengukuran Lidar
Tls100 Produksi Potretudara Menggunakan
Metode *Cloud To Cloud* Dan *Target To Target*
(Studi Kasus : Bangunan Kantor Baznas
Provinsi Lampung)

Nama Mahasiswa : Digdo Bayu Riky Subagja

Nomor Pokok Mahasiswa : 2055013005

Program Studi : Teknik Geodesi dan Geomatika

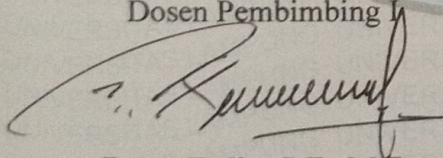
Jurusan : S1 Teknik Geodesi

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

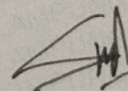
1) Komisi Pembimbing

Dosen Pembimbing I



Romy Fadly. S.T., M.Eng.
NIP. 197708242008121001

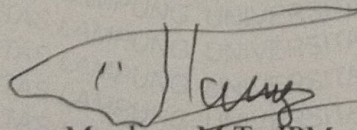
Dosen Pembimbing II



Atika Sari. S.T., M.T.
NIP. 199204062022032007

MENGETAHUI

2) Ketua Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika

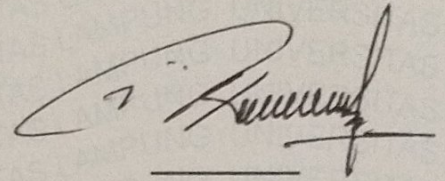


Ir. Fauzan Murdapa, M.T., IPM.
NIP. 196410121992031002

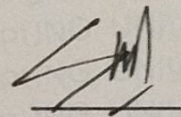
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

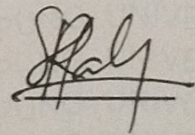
Ketua : Romy Fadly. S.T., M.Eng.



Sekretaris : Atika Sari, S.T., M.T.



Penguji utama
bukan pembimbing : Safri Yanti Rahayu, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP.196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 19 Januari 2026

SURAT PERNYATAAN

Sebagai civitas akademika Universitas Lampung Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Digdo Bayu Riky Subagja
NPM : 2055013005
Judul Skripsi : Kajian Ketelitian Hasil Pengukuran Lidar TLS100
Produksi Potretudara Menggunakan Metode Cloud to
Cloud dan Target to Target (Studi Kasus: Bangunan
Kantor Baznas Provinsi Lampung)
Jurusan : Teknik Geodesi dan Geomatika
Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis bukan terjemahan, saduran ataupun terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan disuatu perguruan tinggi. Dalam skripsi ini terdapat tulisan ataupun pendapat yang diterbitkan atau dibuat oleh orang lain dan dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan tercantum sebagai acuan dalam naskah yang tercantum di dalam daftar pustaka. Pernyataan ini dibuat dengan jujur, jika dikemudian hari terdapat penyimpangan atau kebohongan, Saya bersedia menerima hukuman ataupun sanksi akademika sesuai dengan peraturan dan norma yang berlaku di Universitas Lampung.

Bandar Lampung, , Februari 2026



Digdo Bayu Riky Subagja
NPM. 2055013005

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Desa Karya Makmur Kecamatan Labuhan Maringgai Lampung Timur, 15 April 2002, sebagai anak ketiga dari tiga bersaudara, dari pasangan (Alm) Bapak Bagja. S. Pd. dan Ibu Supatmi.

Penulis menempuh Pendidikan pertama kali di TK Dharma Bakti Karya Makmur pada tahun 2007 – 2008. Kemudian melanjutkan Pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri Karya Makmur pada tahun 2008 – 2014. Setelah itu, melanjutkan Sekolah Menengah Pertama pada SMP Negeri 1 Pasir Sakti pada tahun 2014 - 2017. Dan melanjutkan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Pasir Sakti pada tahun 2017 – 2020.

Penulis melanjutkan Pendidikan Perguruan Tinggi di Universitas Lampung pada Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika dengan Prodi S1 Teknik Geodesi melalui jalur SMMPTN-BARAT. Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah aktif di Himpunan Mahasiswa Geodesi sebagai anggota Departemen Minat dan Bakat pada periode tahun 2022. Kemudian, penulis juga melaksanakan kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Sinar Seputih, Lampung Tengah dan berhasil membuat peta administrasi batas desa serta berperan sebagai Ketua kelompok KKN. Penulis juga melakukan magang/Kerja Praktik dan penelitian di PT Timah, Tbk.

Pada akhir masa studi penulis menyusun skripsi untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) dengan judul “Kajian Ketelitian Hasil Pengukuran Lidar Tls100 Produksi Potretudara Menggunakan Metode *Cloud To Cloud* Dan *Target To Target* (Studi Kasus : Bangunan Kantor Baznas Provinsi Lampung)”.

MOTTO

Bahkan dalam Sistem yang Penuh Ketidakpastian Aku Tetap Memilih Untuk Hadir, Karena Mungkin Aku Bukan yang Paling Kuat, Paling Cerdas, atau Paling Cepat, Tapi Aku Adalah yang Tidak Berhenti.

(digdo, Hapsari 2025)

NOW, I AM BECOME DEATH, THE DESTROYER OF WORLDS

(Bhagavad Gita)

SANWACANA

Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT, yang memberikan nikmat, anugrah, dan bimbingan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Penelitian dengan judul “Kajian Ketelitian Hasil Pengukuran Lidar Tls100 Potretudara Menggunakan Metode *Cloud to Cloud* dan *Target to Target* (Studi Kasus : Bangunan Kantor Baznas Provinsi Lampung)”. Skripsi ini disusun guna melengkapi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan Tugas Akhir Skripsi bagi mahasiswa Program Studi S1 Teknik Geodesi Universitas Lampung.

Penelitian ini berhasil disusun dengan baik berkat peran serta dukungan yang diberikan oleh berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang ditunjukkan kepada:

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Ir. Fauzan Murdapa, M.T., IPM. selaku Ketua Jurusan Teknik Geodesi Geomatika Universitas Lampung.
3. Ibu Atika Sari. S.T., M.T. Selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan arahan dan bantuan dalam penyusunan skripsi.
4. Bapak Romi Fadly, S.T., M.Eng. Selaku dosen pembimbing pertama yang telah memberikan arahan dan bantuan dalam penyusunan skripsi.
5. Ibu Safri Yanti Rahayu, S.T., M.T. Selaku dosen penguji utama yang memberikan kritik dan saran yang membangun dalam penyusunan skripsi.
6. Ibu Rizka Mayasari, S.T., M.T. Selaku Dosen Pembimbing Akademik.
7. Bapak Dr.Fajriyanto, S.T.,M.T. Selaku Dosen Teknik Geodesi Universitas Lampung yang penulis Kagumi.
8. Kedua Orang tua yang selalu mendoakan dan memberikan segala kecukupan yang dibutuhkan serta kakak dan adik tersayang yang selalu mendukung materil dan moril penulis.
9. Rekan-rekan mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung angkatan 2021 khususnya Al Aziz, dkk.

10. Rekan-rekan mahasiswa Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika Universitas Lampung Angkatan 2022 khususnya Reno, dkk.
11. Seluruh rekan mahasiswa dan Dosen dari Arsitektur (Unila), Fisika (Unila), dan PWK (Itera), Sipil (Itera), Geomatika (Itera). Yang tidak sempat disebutkan satu persatu.
12. Triana Ratu (2022) dan emak sekeluarga yang berada di Kota Karang, Teluk Betung Timur.

Penulis menyadari masih terdapat banyak kesalahan atau kekurangan dalam Penelitian ini, karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun guna penyempurnaan lebih lanjut. Demikian yang dapat penulis sampaikan, atas perhatian semua pihak dan kontribusinya penulis sampaikan terima kasih.

Bandar Lampung, Januari 2026

Digdo Bayu Riky Subagja

DAFTAR ISI

	Halaman
SURAT PERNYATAAN	6
RIWAYAT HIDUP	7
SANWACANA	i
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL	xi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	4
1.5. Ruang Lingkup Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Penelitian Terdahulu.....	5
2.2. Kerangka Dasar	8
2.2.1. Kerangkaka Kontrol Horizontal.....	9
2.2.2. Kerangka Kontrol Vertikal	12
2.3. Pengukuran Detail Bangunan	15
2.4. <i>Terrestrial Laser Scanner</i>	15
2.4.1. Prinsip Kerja <i>Terrestrial Laser Scanner</i>	16
2.4.2. Registrasi.....	19
2.5. <i>PhotoModeler</i>	22
2.6. <i>CloudCompare</i>	23
2.7. Pengecekan Registrasi	24
2.8. Uji Akurasi posisi dan ukuran Dimensi Bangunan	25
2.9. Perbandingan Volume Bangunan	28
III. METODOLOGI PENELITIAN	30
3.1. Lokasi Penelitian	30
3.2. Alat Dan Data Yang Digunakan.....	31
3.2.1. Alat Yang Digunakan.....	31
3.2.2. Data Yang Digunakan.....	32
3.3. Diagram Alir Penelitian.....	33

3.4. Tahap Persiapan.....	34
3.4.1. Pengecekan kondisi dan kemampuan alat.....	35
3.5. Tahap Pengumpulan Data.....	41
3.5.1. Pengukuran Kerangka Kontrol	41
3.5.2. Pengukuran Detail Bangunan menggunakan <i>Total Station</i>	44
3.5.3. Akuisisi Data Lidar TLS100	47
3.6. Tahap Pengolahan Data	49
3.6.1. Proses Kalibrasi <i>Point cloud</i>	49
3.6.2. Proses <i>Segmentasi Point cloud</i>	50
3.6.3. Proses Pewarnaan <i>Point cloud</i>	53
3.6.4. Registrasi <i>Point cloud</i>	56
3.6.5. Georeferensing <i>Point Cloud</i>	68
3.6.6. Uji Akurasi Geometrik Posisi dan Dimensi Bangunan.....	69
3.7. Tahap Analisis	70
3.8. Perbandingan Volume	71
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	72
4.1. Hasil Ketelitian	72
4.1.1. Hasil Perhitungan Pengukuran Kerangka Kontrol.....	72
4.1.2. Hasil Pengukuran detail bangunan.....	74
4.1.3. Hasil Akuisisi TLS100.....	75
4.1.4. Hasil Registrasi dan Georeferensi.....	76
4.1.5. Hasil Analisis Ukuran dimensi dan Posisi <i>Point cloud</i> bangunan.....	84
4.2. Hasil Model <i>Point cloud</i>	98
4.2.1. Hasil Model <i>Point cloud (Surface Density)</i>	99
4.2.2. Hasil Model Bangunan menggunakan <i>Total Station</i>	102
4.3. Perbandingan Volume Bangunan	104
V. SIMPULAN	107
5.1. Simpulan.....	107
5.2. Saran	108
DAFTAR PUSTAKA	109
LAMPIRAN A	112
LAMPIRAN B	116
LAMPIRAN C	121
LAMPIRAN D	124
LAMPIRAN E	126
LAMPIRAN F	136
LAMPIRAN G.....	139

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Ilustrasi Poligon Tertutup.....	10
2. Ilustrasi pengukuran beda tinggi menggunakan waterpass.....	12
3. Mekanisme pengukuran jarak menggunakan <i>Rangefinder</i>	17
4. Ilustrasi Akuisisi data <i>Point cloud</i> menggunakan TLS.....	18
5. Contoh Penerapan Mark alam sebagai titik referensi.	20
6. Contoh pemilihan target dalam metode <i>Target to Target</i>	21
7. Registrasi Metode <i>Cloud to Cloud</i>	22
8. Contoh penyelarasan data menggunakan metode algoritma otomatis <i>align Cloud to Cloud</i>	22
9. Peta Lokasi Penelitian.....	30
10. Diagram Alir Penelitian.	34
11. Diagram alir proses pengecekan kondisi dan kemampuan alat.	35
12. Pengecekan pola distorsi pengaruh Metode <i>scanning</i> rotasi horizontal	36
13. Ilustrasi Horizontal <i>Scanning</i>	37
14. Pengecekan pola distorsi pengaruh Metode <i>scanning</i> rotasi vertikal	37
15. Ilustrasi Vertikal <i>Scanning</i>	38
16. Fungsi perhitungan <i>converter</i>	39
17. Ilustrasi sapuan alat Lidar TLS100..	40
18. Ilustrasi 2D Sudut limit cakupan dan <i>blindspot</i> Lidar TLS100.	40
19. Ilustrasi 3D sudut sapuan, dan <i>blindspot</i> Lidar TLS100.....	41
20. Rencana Akuisisi data kerangka	42
21. Pengukuran Kerangka kontrol Horizontal	43
22. Rencana persebaran GCP pada sisi depan bangunan.....	45
23. Rencana persebaran GCP pada sisi kanan bangunan.....	45

24. Rencana persebaran GCP pada sisi belakang bangunan.....	46
25. Rencana persebaran GCP pada sisi kiri bangunan.....	46
26. Rencana akuisisi data TLS100.....	47
27. Ilustrasi Akuisisi jarak 8 meter <i>full area scanning</i>	48
28. Ilustrasi Akuisisi jarak 8 meter satu sisi <i>area scanning</i>	48
29. Proses pemisahan <i>Segment Point cloud</i> yang teridentifikasi terdapat <i>Noise</i> ... 50	
30. <i>Segment</i> data yang teridentifikasi terdapat <i>Noise</i>	51
31. Proses segmentasi untuk eliminasi <i>Noise</i>	51
32. <i>Segment</i> data yang sudah bersih dari <i>point noise</i>	52
33. Proses Penggabungan kembali <i>Segment</i> yang sudah difilterisasi ke data set <i>Point cloud scen.</i>	53
34. <i>Import Data Point cloud</i> untuk proses pewarnaan	54
35. <i>Import</i> foto untuk pewarnaan <i>Point cloud</i>	54
36. Proses penyelarasan posisi foto dengan <i>Point cloud</i>	55
37. Reorientasi <i>Image</i> terhadap <i>point cloud</i>	55
38. Contoh Hasil <i>Point cloud</i> yang sudah melalui proses pewarnaan	56
39. Impor data yang akan dilakukan registrasi <i>Cloud to Cloud</i>	58
40. Proses pendekatan rotasi secara manual agar memudahkan proses registrasi	58
41. Visualisasi hasil pendekatan rotasi antara dua set <i>Point cloud</i>	59
42. Registrasi menggunakan <i>tool Finely registers already (roughly) aligned entities</i> <i>(clouds or meshes)</i>	59
43. Proses Registrasi <i>cloud to cloud</i> , kuning berarti <i>cloud</i> referensi dan merah berarti <i>cloud</i> yang akan di translasi.	60
44. Hasil Registrasi <i>Cloud to Cloud</i> . diperlihatkan melalui RMS hasil translasi .	61
45. Visualisasi Dua data set <i>Point cloud</i> yang telah di registrasi.....	61
46. Proses <i>Import</i> data <i>Point cloud</i> yang akan di registrasi	63
47. Tampilan data yang telah di <i>import</i>	64
48. Data GCP yang digunakan sebagai referensi registrasi	64
49. Proses pemilihan titik <i>align</i> yang akan di translasikan ke titik referensi.....	65
50. Proses memasukan koordinat Referensi sesuai dengan penomoran <i>point align</i>	66
51. Koordinat GCP Referensi dan koordinat <i>point align (Point cloud)</i>	66

52. Hasil registrasi <i>Target to Target</i>	67
53. Visualisasi data set yang sudah ter-registrasi <i>Target to Target</i>	67
54. Visualisasi 2 data set <i>Point cloud</i> yang telah di registrasi <i>Target to Target</i> ...	68
55. Hasil pengukuran poligon	72
56. Lokasi titik detail yang di akuisisi	74
57. Georegerring Hasil Registrasi <i>Cloud to cloud</i>	80
58. Visualisasi Titik referensi <i>chek point</i>	93
59. Visualisasi titik cek point pada <i>point cloud</i> hasil registrasi <i>cloud to cloud</i>	94
60. Visualisasi titik cek point pada <i>point cloud</i> hasil registrasi <i>target to target</i> ...	95
61. Model hasil registrasi <i>Cloud to Cloud</i> , (A) Tampak atas, (B) Tampak Sisi kiri bangunan, (C) Tampak depan bangunan, (D) Tampak Sisi kanan bangunan, (E) Tampak Sisi belakang bangunan, (F) Tampak depan kiri atas, (G) Tampak belakang kanan atas.....	98
62. Model hasil registrasi <i>Target to Target</i> , (A) Tampak atas, (B) Tampak Sisi kiri bangunan, (C) Tampak depan bangunan, (D) Tampak Sisi kanan bangunan, (E) Tampak Sisi belakang bangunan, (F) Tampak depan kiri atas, (G) Tampak belakang kanan atas.....	99
63. Model <i>surface density</i> hasil registrasi <i>Cloud to Cloud</i>	100
64. Model <i>surface density</i> hasil registrasi <i>Target to Target</i>	101
65. Titik Detail Bangunan Baznas	102
66. <i>Mesh</i> hasil Detail bangunan Baznas.....	103
67. <i>Point cloud</i> Hasil <i>Convert Mesh to Point</i>	103
68. Hasil Perhitungan Volume bangunan data detail dari <i>Total Station</i>	104
69. Hasil Perhitungan Volume Bangunan data hasil registrasi <i>Cloud to Cloud</i> .	105
70. Hasil Perhitungan Volume Bangunan data hasil registrasi <i>Target to Target</i>	106
71. Proses menyiapkan TLS100.....	117
72. Dokumentasi Pengukuran jarak akuisisi alat terhadap bangunan	117
73. Dokumentasi <i>Scanning</i> sisi kanan bangunan Baznas.....	118
74. Dokumentasi <i>Scanning</i> sisi depan bangunan Baznas.....	118
75. Dokumentasi <i>Scanning</i> sisi kiri bangunan Baznas.....	119
76. Dokumentasi <i>Scanning</i> sisi belakang bangunan Baznas.....	119
77. Dokumentasi pasca akuisisi data.....	120

78. Dokumentasi Pengukuran kerangka dan detail bangunan	120
79. Penempatan Posisi Pemindaian menggunakan TLS100	125
80. Buka aplikasi PhotoModelarPro	127
81. Klik Manual Editing.....	127
82. Import gambar yang akan dilakukan proses penambahan warna di <i>point cloud</i>	127
83. Pilih Gambar yang menjadi referensi pewarnaan	128
84. Klik <i>Control point/import point</i> pada bagian <i>(an unknown camera. whose parameters will be solved by)</i>	128
85. Pilih <i>tool (External Geometry Explorer)</i>	129
86. Klik <i>(Add/Import External Geometry)</i>	129
87. Pilih <i>Control the solution</i> dan klik <i>(a point cloud or mesh file)</i> pada bagian <i>using and adding</i> , lalu pilih file yang akan di beri warna.....	130
88. Sesuaikan File yang akan di masukan atau diberiwarna pada <i>text file import filter</i>	130
89. Setelah memasukan file yang akan diberi warna, kemudian sesuaikan kembali satuan unit file yang dimasukan pada baris unit di bagian <i>control solution</i> .	131
90. Setelah File Ter <i>import</i> kemudian klik <i>active control mark/assign mode</i> yang berfungsi sebagai <i>control point</i> pewarnaan.....	131
91. Pilih Titik acuan pewarnaan pada tempat tempat yang mudah di identifikasi pada gambar dan <i>point cloud</i>	132
92. pilih titik sebanyak 4 atau lebih agar proses pewarnaan tidak salah dan terorientasi secara baik.....	132
93. Klik <i>tool (open 3D view)</i>	133
94. Pilih Visibility untuk memberikan informasi orientasi gambar pada <i>point cloud</i> . kemudian pilih <i>colloring by image</i> pada bagian visibility	133
95. <i>Point cloud</i> yang sudah diberi warna akan menghasilkan seperti gambar ini	134
96. Setelah dirasa baik maka proses selanjutnya yaitu ekspor data <i>point cloud</i> pada tool (<i>file</i>) lalu pilih <i>eksport and print data</i>	134
97. Sebelum terekspor pastikan file dengan format yang dibutuhkan	135

98. Setelah semuanya dipastikan baik maka simpan data <i>point cloud</i> yang sudah diberiwarna pada folder atau tempat penyimpanan yang sudah disiapkan..	135
99. Buka Aplikasi <i>CloudCompare</i>	137
100. Klik pada <i>tool Open one severa files</i>	137
101. Pastikan dan sesuaikan data untuk memastikan data yang di masukan sudah benar	137
102. Setelah Data sudah dimasukan lalu klik pada bagian <i>tool Finely Registers already (roughly) aligned entites (cloud or mesh)</i>	137
103. Sesuaikan parameter parameter yang akan menjadi referensi proses <i>align</i> atau registrasi <i>point cloud</i> , seperti <i>overlapping</i> , <i>number of iteration</i> dan <i>rms diference</i>	138
104. Pastikan lagi dari hasil registrasi info hasil yang dibutuhkan agar mendapatkan kualitas yang baik.....	138
105. Jika sudah dirasa baik maka hasil seperti dilihat seperti pada gambar ini ..	138
106. Buka Aplikasi <i>CloudCompare</i>	140
107. Klik <i>Open One Or Severa Files</i> untuk membuka file <i>point cloud</i>	140
108. Pastikan dan sesuaikan data untuk memastikan data yang di masukan sudah benar.....	140
109. Setelah Data sudah dimasukan lalu klik pada bagian <i>tool aligns two clouds by picking (at last 4) equivalent point pairs</i>	140
110. Masukan koordinat yang akan menjadi referensi secara manual	141
111. Setelah dimasukan titik referensi maka klik <i>align</i> , lalu klik ceklist. hasil <i>align</i> dapat di lihat melalui <i>align</i> info	141
112. Setelah dilakukan proses <i>align</i> cek kembali koordinat melalui koordinat <i>point cloud</i> seperti gambar ini	141
113. Berikut ini merupakan hasil registrasi <i>target to target</i>	141

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Penelitian Terdahulu	5
2. Ketelitian Horizontal peta RBI.....	27
3. Ketelitian Vertikal peta RBI	28
4. Daftar alat yang digunakan.	31
5. Daftar Perangkat Lunak.	32
6. Data koordinat BM dan CP	32
7. Koordinat poligon	73
8. Kesalahan kerangka kontrol.....	73
9. Sampel koordinat detail hasil pengukuran	75
10. Hasil Registrasi <i>Cloud to Cloud</i>	76
11. Hasil Registrasi <i>Target to Target</i>	81
12. Sampel Ukuran detail bangunan sisi depan bangunan	85
13. Keterangan Sampel Ukuran detail bangunan sisi depan bangunan	85
14. Sampel Ukuran detail bangunan sisi kanan bangunan	86
15. Keterangan Sampel ukuran detail bangunan sisi kanan bangunan	86
16. Sampel Ukuran detail bangunan sisi belakang bangunan	87
17. Keterangan Sampel ukuran detail bangunan sisi belakang bangunan	88
18. Sampel Ukuran detail bangunan sisi kiri bangunan	88
19. Keterangan Sampel ukuran detail bangunan, sisi kiri bangunan	89
20. Hasil Perhitungan RMSE	91
21. Tabel titik referensi <i>cek point</i>	93
22. Koordinat <i>cek point</i> hasil registrasi <i>cloud to cloud</i>	94
23. Koordinat <i>cek point</i> hasil registrasi <i>target to target</i>	95
24. Perhitungan Perbedaan posisi hasil registrasi <i>cloud to cloud</i>	96

25. Perhitungan Perbedaan posisi hasil registrasi <i>target to target</i>	96
26. Hasil CE90	97
27. Hasil LE90	97
28. Kelas Kerapatan titik hasil registrasi <i>Cloud to Cloud</i>	100
29. Kelas Kerapatan titik hasil registrasi <i>Target to Target</i>	101
30. Hasil Perhitungan Volume bangunan.....	106
31. Lampiran Data Koordinat Detail.....	113

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi pemetaan tiga dimensi (3D) telah memberikan kemajuan yang signifikan dalam kegiatan survei dan dokumentasi objek fisik. Salah satu teknologi yang berperan penting dalam pemetaan 3D adalah *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). Perangkat ini mampu menghasilkan data spasial berupa *point cloud* secara cepat dan akurat, sehingga banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang seperti arsitektur, rekayasa sipil, pemetaan aset, serta dokumentasi bangunan. Keunggulan TLS terletak pada kemampuannya merekam detail objek tanpa kontak fisik, sehingga efektif digunakan pada kondisi yang sulit dijangkau maupun pada objek yang tidak memungkinkan untuk disentuh secara langsung (Reshetyuk, 2009). Seiring meningkatnya kebutuhan terhadap perangkat *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) yang bersifat ekonomis, berbagai perangkat TLS *low-cost* mulai dikembangkan sebagai alternatif TLS komersial. Salah satu perangkat tersebut adalah TLS100 produksi Potretudara. Meskipun menawarkan harga yang lebih terjangkau, aspek kinerja TLS100, khususnya terkait akurasi hasil pengukuran, masih perlu dikaji secara ilmiah. Kajian ini menjadi penting mengingat tingkat akurasi merupakan faktor utama dalam menentukan keandalan data TLS untuk berbagai aplikasi pemetaan dan pemodelan tiga dimensi. Aplikasi tersebut meliputi konservasi bangunan, audit visual kondisi struktural, serta dokumentasi arkeologi yang menuntut ketelitian yang memadai (Rahmawati, dkk., 2021).

Beberapa penelitian sebelumnya telah mencoba mengkaji kemampuan TLS100. Penelitian oleh Budisusanto, dkk. (2022) menunjukkan bahwa akurasi TLS100 dalam pemodelan volume objek hanya mencapai sekitar 53% dibandingkan sensor Lidar iPad Pro. Namun demikian, penelitian tersebut belum melibatkan proses

registrasi *point cloud*, sehingga hasil pemodelan hanya didasarkan pada satu posisi pemindaian. Padahal, dalam praktik pemodelan objek yang memiliki bentuk kompleks, data hasil pemindaian umumnya diperoleh dari berbagai sudut pandang yang harus disatukan ke dalam satu sistem koordinat yang sama. Proses penyatuan beberapa hasil pemindaian tersebut dikenal sebagai registrasi *point cloud*, yang merupakan tahapan penting dalam pengolahan data TLS. Dua metode registrasi yang umum digunakan adalah metode *Cloud to Cloud* (C2C) dan *Target to Target* (T2T). Metode C2C mengandalkan kesesuaian bentuk geometris antar *point cloud* yang saling tumpang tindih tanpa menggunakan target fisik, sedangkan metode T2T menggunakan titik-titik acuan tertentu yang memiliki posisi diketahui sebagai pengikat antar hasil pemindaian. Penerapan kedua metode ini memerlukan syarat teknis yang berbeda. Pada metode C2C, dibutuhkan area tumpang tindih (*overlapping area*) yang memadai, umumnya minimal sekitar 30% dari luasan permukaan objek, serta bentuk geometris objek yang cukup bervariasi agar proses pencocokan dapat dilakukan secara optimal. Sementara itu, metode T2T memerlukan keberadaan titik-titik ikat yang dapat dikenali dari beberapa posisi pemindaian dan memiliki informasi koordinat yang akurat, baik yang diperoleh dari pengukuran *Total Station* maupun dari elemen bangunan yang konsisten. Selain itu, keberhasilan kedua metode registrasi ini juga dipengaruhi oleh kualitas data hasil akuisisi, resolusi pemindaian, serta keteraturan posisi pemindaian di lapangan (Genechten, 2008).

Berdasarkan pertimbangan tersebut, lokasi penelitian dipilih di bangunan Kantor BAZNAS Provinsi Lampung. Bangunan ini memiliki karakteristik arsitektural yang mendukung penerapan kedua metode registrasi, seperti keberadaan elemen-elemen pembeda berupa jendela, pintu, dan sudut bangunan yang tegas, yang dapat dimanfaatkan sebagai titik acuan pada metode T2T. Selain itu, area sekitar bangunan yang relatif luas memungkinkan dilakukannya akuisisi data dari beberapa posisi dengan tingkat tumpang tindih yang memadai, yang menjadi syarat utama dalam penerapan metode C2C. Detail permukaan fasad bangunan yang tidak terlalu kompleks namun juga tidak terlalu polos menjadikan objek ini sesuai untuk pengujian menggunakan TLS100 yang tergolong sebagai perangkat *low-cost*.

Hingga saat ini, kajian yang secara khusus membandingkan ketelitian hasil pengukuran TLS100 dengan pendekatan registrasi *Cloud to Cloud* (C2C) dan *Target to Target* (T2T) masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk melanjutkan kajian sebelumnya dengan mengevaluasi pengaruh metode registrasi terhadap akurasi hasil pemodelan bangunan menggunakan TLS100, sehingga dapat diketahui metode yang paling optimal untuk diterapkan dalam pemodelan 3D menggunakan TLS100

1.2. Rumusan Masalah

Penelitian ini mengangkat beberapa rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana membentuk dan membangun *point cloud* bangunan hasil akuisisi menggunakan teknologi TLS100 produksi Potretudara dengan metode *Cloud to Cloud* (C2C) dan *Target to Target* (T2T)?
2. Bagaimana ketelitian *point clouds* bentuk bangunan hasil akuisisi menggunakan teknologi TLS100 produksi Potretudara dengan metode registrasi *cloud to cloud* dan *target to target*?
3. Bagaimana perbandingan volume bangunan hasil akuisisi menggunakan teknologi TLS100 produksi Potretudara dengan metode registrasi *Cloud to Cloud* dan *Target to Target* terhadap hasil pengukuran lapangan menggunakan *Total Station*?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan Rumusan Masalah dan Latar belakang diatas, penelitian ini memiliki Tujuan Sebagai Berikut :

1. Untuk membentuk dan membangun *point cloud* bangunan hasil akuisisi menggunakan teknologi TLS100 produksi Potretudara dengan metode *Cloud to Cloud* (C2C) dan *Target to Target* (T2T).
2. Untuk Menghitung dan menganalisis ketelitian *point clouds* bentuk bangunan hasil akuisisi menggunakan teknologi TLS100 produksi potretudara dengan metode *Cloud to Cloud* dan *Target to Target*.

3. Untuk Menghitung dan membandingkan volume bangunan hasil akuisisi menggunakan teknologi TLS100 produksi Potretudara dengan metode *Cloud to Cloud* dan *Target to Target* terhadap hasil pengukuran lapangan menggunakan Total Station.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat baik secara teoritis maupun praktis. Secara teoritis, hasil penelitian dapat menjadi referensi ilmiah di bidang geospasial, khususnya terkait evaluasi ketelitian pengukuran menggunakan TLS100 dan pengembangan kajian metode registrasi *Point cloud*. Secara praktis penelitian ini dapat memberikan informasi bagi pelaku survei dan pemetaan dalam memilih metode registrasi yang tepat untuk meningkatkan akurasi pemodelan 3D bangunan, sekaligus menjadi bahan pertimbangan bagi pengembang teknologi dalam penyempurnaan sistem registrasi dan pengolahan data TLS100 agar lebih optimal di lapangan.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dijabarkan guna memberikan Batasan penelitian, Batasan penelitian yang dilakukan seperti dapat dilihat sebagai berikut:

1. Penelitian ini melakukan pengukuran 3D eksterior bangunan Kantor Badan Amil Zakat Nasional (BAZNAS) Provinsi Lampung, dengan *output Point cloud*.
2. Penelitian ini menggunakan perangkat Lidar TLS100 yang di produksi oleh Potretudara sebagai alat utama dalam pengumpulan data untuk pemodelan 3D bangunan.
3. Proses pewarnaan *point cloud* di lakukan pada perangkat lunak *PhotoModeler*, dan menggunakan gambar hasil pemotretan menggunakan Canon D60S.
4. Proses registrasi menggunakan metode *Cloud to Cloud* dan *Target to Target*.
5. Pengukuran kerangka kontrol menggunakan *Total Station* dan *Waterpass*.
6. Penelitian ini tidak menggunakan *Premark/mark* khusus untuk membantu mengidentifikasi titik referensi khususnya bagian registrasi *Target to target*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Penelitian ini dilakukan menggunakan referensi jurnal-jurnal penelitian sebelumnya yang berkaitan. Pada penelitian ini digunakan beberapa referensi seperti yang tertera pada tabel penelitian terdahulu dibawah.

Tabel 1. Penelitian Terdahulu.

No	Penulis	Judul	Metode	Hasil Penelitian
1.	Sekar Melati Ramadhani, Yudo Prasetyo, Nurhadi Bashit (2021)	Analisis Ketelitian <i>Point clouds</i> Teknologi <i>Terrestrial Laser Scanner</i> (Studi Kasus: Dekanat Lama Fakultas Teknik)	TLS (<i>Terrestrial Laser Scanner</i>) Leica BLK360. metode registrasi <i>Cloud to Cloud</i>	Hasil uji ketelitian <i>Point clouds</i> TLS pada uji validasi jarak sebesar 0,025 m dan uji RMSE ICP dengan nilai RMSE _x 0,041, RMSE _y 0,027 dan RMSE 0,065 meter, dimana dapat dikatakan cukup baik dan mencapai ketelitian centimeter. <i>Point clouds</i> TLS yang diregistrasi menggunakan metode <i>Cloud to Cloud</i> dapat membentuk <i>Point cloud</i> yang baik namun terdapat ketidak sempurana pada bagian atap. Densitas <i>Point clouds</i> sebesar 4-5 mm sesuai spesifikasi alat TLS Leica BLK360 memiliki <i>ranging accuracy</i> 4 mm pada jarak 10 m dan 7 mm pada jarak 20 m.
2.	Nabila Rahmawati, Yudo Prasetyo, Firman Hadi (2021)	Pemodelan Model3d Menggunakan Metode Tls (<i>Terrestrial Laser Scanner</i>) (Studi Kasus : Candi Plaosan Lor, Kabupaten Klaten)	TLS (<i>Terrestrial Laser Scanner</i>) Leica BLK360. Metode registrasi yaitu <i>Cloud to Cloud</i>	Registrasi <i>Point cloud</i> dengan nilai overlapping rata rata sebesar 20.2%, nilai <i>balance</i> dengan rata-rata 7.6%, dan nilai <i>points</i> dengan rata rata 95.3%. proses filterisasi jumlah <i>point</i> candi plaosan mengalami penurunan hingga 95%, yaitu dari 129.429.314 menjadi 7.198.274 titik. Hasil model 3D memiliki tingkat kedetailan pada LoD 3.1, yang berarti model ini mampu merepresentasikan bentuk candi dengan detail yang cukup tinggi.

Lanjutan Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Judul	Metode	Hasil Penelitian
3	Yanto Budisusanto, Mokhammad Nur Cahyadi, Imam Wahyudi Farid, Muchammad Rizki Ubaidillah, Daud Wahyu Imani (2021)	<i>Low Cost Lidar Prototype Design for 3D Mapping</i>	Lidar <i>Low-Cost Prototype</i> , Tf Mini, <i>Ublox ZED-F9R</i> , <i>Raspberry Pi</i> , dan Arduino, Pemindaian dalam ruangan 4×3 meter,	Hasil penelitian menunjukkan bahwa Lidar TF Mini mampu digunakan untuk pemetaan 3D berskala kecil, dengan visualisasi objek sederhana seperti pintu dan lemari. Sistem ini berhasil menunjukkan potensi pemanfaatan teknologi Lidar <i>low-cost</i> dalam pengambilan data spasial, meskipun masih terdapat keterbatasan seperti munculnya <i>Noise</i> dan anomali data. Oleh karena itu, sistem ini dinilai cocok untuk keperluan edukasi dan eksperimen awal dalam pemetaan tiga dimensi.
4.	Yanto Budisusanto, Muchammad Rizki Ubaidillah, Mokhammad Nur Cahyadi, Daud Wahyu Imani, Imam Wahyudi Farid (2022)	<i>Low-Cost Lidar Tls-100 Comparison With Lidar Ipad Pro For 3d Mapping</i>	LIDAR TLS-100 dari Potretudara dan LIDAR <i>iPad Pro</i> dari Apple Inc. <i>Non</i> registrasi (<i>single</i> posisi akusisi), dan pemindaian bergerak.	Hasil dari penelitian berkaitan dengan perbandingan volume <i>point</i> , dan <i>surface</i> area Dimana LIDAR TLS100 mempunyai volume terhitung sebesar 30,4667 meter kubik, LIDAR Iphone sebesar 16,296 meter kubik. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa TLS100 hanya menghasilkan akurasi volume sebesar 53% jika dibandingkan dengan Lidar <i>iPad Pro</i> .
5.	Monica Maharani, Basuki Rahmad, Ediyanto, Oktavia Dewi Alfiani, Dinda Pratiwi Dwi Putri, Nur Muhammad Ikram	Kajian Kedanalan Model 3d Hasil Akuisisi <i>Terrestrial Laser Scanner</i> Untuk Pembuatan Asbuilt Drawing	TLS topcon GLS 1500 untuk Akuisisi fasad eksterior, dan TLS Leica RTC 360 untuk Akuisisi interior. Metode registrasi <i>Cloud to Cloud</i>	Hasil kajian menunjukkan AS built drawing hasil Akuisisi TLS dalam penelitian ini mampu memenuhi seluruh standar parameter validasi gambar, akurasi ketelitian mencapai fraksi cm-mm yang mana nilai <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE) yang diperoleh dalam penelitian ini sebesar 1,9 cm dan standar deviasi 1,4 cm yang dihasilkan oleh alat TLS <i>Topcon</i> GLS 1500 untuk Akuisisi fasad eksterior dan TLS merek <i>Leica</i> RTC 360 untuk Akuisisi interior. ketelitian tersebut masuk ke dalam fraksi mm-cm sesuai dengan kriteria validasi gambar.

Penelitian ini akan mengisi celah dengan melakukan Kajian Ketelitian Hasil Pengukuran Lidar TLS100 Potretudara Menggunakan Metode *Cloud to Cloud* dan *Target to Target* yang belum dilakukan penelitian dengan fokus pada perbedaan

hasil ketelitian ukuran 3D detail bangunan terhadap dua metode registrasi yang digunakan. Berikut merupakan ringkasan penelitian sebelumnya:

1. Ramadhani dkk, (2021)

Penelitian ini memfokuskan pada kualitas dan ketelitian *Point clouds* hasil Akuisisi menggunakan TLS *Leica* BLK360 pada Gedung Dekanat lama fakultas teknik. Data TLS diregistrasi menggunakan *metode Cloud to Cloud*. Proses Akuisisi *Point clouds* pada penelitian ini dilakukan menggunakan berbagai metode. Hasil uji ketelitian *Point clouds* TLS pada uji validasi jarak sebesar 0,025 m dan uji RMSE ICP dengan nilai RMSE_x 0,041, RMSE_y 0,027 dan RMSE 0,065 m dimana dapat dikatakan cukup baik dan mencapai ketelitian centimeter. *Point clouds* TLS yang diregistrasi menggunakan metode *Cloud to Cloud* dapat membentuk *Pont cloud* yang baik namun terdapat ketidak sempuranaan pada atap. Densitas *Point clouds* sebesar 4-5 mm sesuai spesifikasi alat TLS *Leica* BLK360 memiliki *ranging accuracy* 4 mm untuk jarak 10 m, dan 7 mm untuk jarak 20 m.

2. Rahmawati dkk, (2021)

Penelitian ini menggunakan 11 titik pengukuran mengelilingi objek. Dengan alat TLS *Leica* BLK Series 360. Proses registrasi pada penelitian ini menggunakan *software Autodesk ReacapPro*. Dengan tahapan pemodelan menggunakan *software CloudCompare*. Standar kesesuaian hasil model pada penelitian ini menggunakan parameter LoD yang dikembangkan oleh *city geography markup language* (CityGML). Registrasi *Point cloud* dengan nilai *overlapping* rata rata sebesar 20.2%, nilai *balance* dengan rata-rata 7.6%, dan nilai *point* dengan rata rata 95.3%, proses filterisasi jumlah *point* candi plaosan mengalami penurunan hingga 95%, yaitu dari 129.429.314 menjadi 7.198.274 titik. Hasil model 3D memiliki tingkat kedetailan pada LoD 3.1, yang berarti model ini mampu merepresentasikan bentuk candi dengan detail yang cukup tinggi.

3. Budisusanto dkk., (2021)

dilatarbelakangi oleh tingginya harga perangkat Lidar komersial yang menjadi kendala dalam pemetaan 3D berskala kecil. Untuk itu, penelitian ini merancang sistem pemetaan biaya rendah dengan menggabungkan sensor TF Mini Lidar, Ublox F9R, serta mikrokontroler Arduino dan Raspberry Pi. Proses pemindaian

dilakukan di ruangan berukuran 4×3 meter dengan rotasi horizontal dan vertikal, menghasilkan data jarak dan posisi yang kemudian divisualisasikan dalam bentuk *Point cloud* 3D menggunakan Global Mapper. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ini mampu merepresentasikan objek sederhana seperti pintu dan lemari, serta membuktikan bahwa Lidar murah dapat digunakan untuk pemetaan 3D, meskipun masih terdapat kendala berupa *Noise* dan data tidak normal.

4. Budisusanto dkk, (2022)

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat TLS100 dari *Aerial Portrait* dan *iPad Pro* LIDAR 2021 dari *Apple inc.* TLS100 melakukan pemindaian statis dengan waktu perekaman data 15 menit, sedangkan *iPad Pro* melakukan perekaman bergerak *iPad Pro* dapat menyelesaikan proses pemindaian dalam waktu kurang dari 5 menit di ruangan kurang dari 10 m².

5. Maharani, dan dkk, (2023)

Penelitian yang menunjukkan bahwa model 3D hasil Akuisisi Terrestrial Laser Scanner (TLS) mampu digunakan sebagai acuan untuk pembuatan *as built drawing* telah banyak dilakukan. Penelitian ini berfokus dengan mendeskripsikan secara detail mengenai kriteria dan standar pembuatan *as built drawing* yang akan digunakan. dimana dari hasil menunjukkan *AS built drawing* hasil Akuisisi TLS dalam penelitian ini mampu memenuhi seluruh standar parameter validasi gambar, akurasi ketelitian mencapai fraksi cm-mm yang mana nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) yang diperoleh dalam penelitian ini sebesar 1,9 cm dan standar deviasi 1,4 cm yang dihasilkan oleh alat TLS *Topcon* GLS 1500 untuk Akuisisi fasad eksterior dan TLS merek *Leica* RTC 360 untuk Akuisisi interior. ketelitian tersebut masuk ke dalam fraksi mm-cm sesuai dengan kriteria validasi gambar.

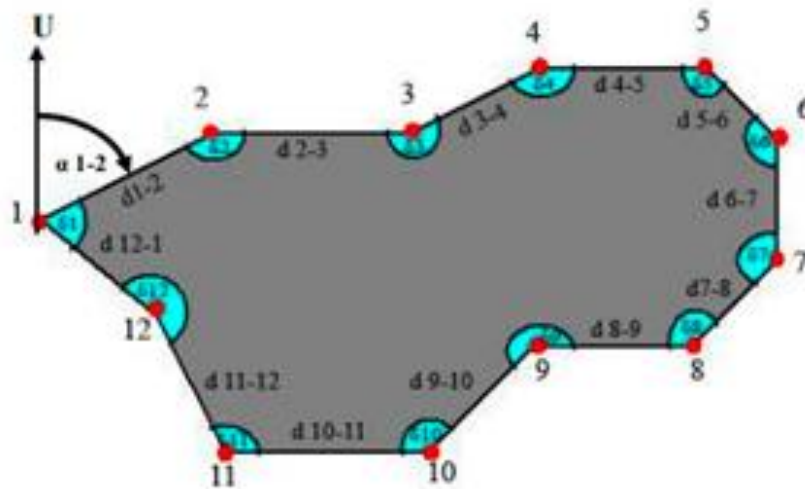
2.2. Kerangka Dasar

Tahap awal sebelum melakukan suatu pengukuran adalah dengan melakukan penentuan titik-titik kerangka dasar pada daerah atau area yang akan dilakukan pengukuran, yaitu penentuan titik-titik yang ada di lapangan yang ditandai dengan patok kayu, paku atau patok permanen yang dipasang dengan kerapatan tertentu. Fungsi dari sistem kerangka dasar pemetaan dengan penentuan titik-titik inilah

yang nantinya akan dipakai sebagai titik acuan (*reference*) bagi penentuan titik-titik lainnya dan juga akan dipakai sebagai titik kontrol bagi pengukuran yang baru. Pengukuran dilaksanakan untuk memperoleh data sudut dan jarak dilapangan yang akan dihasilkan suatu data posisi berupa data koordinat (X,Y) yang dapat digunakan dalam pembuatan peta dasar (S.Basuki, 2006).

2.2.1. Kerangka Kontrol Horizontal

Poligon tertutup merupakan salah satu metode pengukuran yang paling umum digunakan dalam pembentukan kerangka kontrol horizontal pada kegiatan survei dan pemetaan. Poligon ini dibentuk dari serangkaian titik yang dihubungkan oleh garis lurus, di mana pengukuran dimulai dan diakhiri pada titik yang sama, sehingga membentuk lintasan melingkar yang tertutup (Purwaamijaya, 2018). Konfigurasi seperti ini memberikan keuntungan dalam hal pengendalian ketelitian, karena memungkinkan dilakukannya pemeriksaan konsistensi data melalui analisis kesalahan penutup. Terdapat tiga komponen data utama yang harus dikumpulkan, yaitu sudut horizontal, jarak antar titik, dan *Azimuth* awal sebagai acuan orientasi. Sudut horizontal diukur pada setiap titik belok untuk mengetahui perubahan arah, sedangkan jarak antar titik digunakan untuk menentukan panjang sisi-sisi poligon secara linear. *Azimuth* awal diperlukan sebagai referensi arah dari salah satu sisi poligon, yang kemudian digunakan untuk menghitung arah sisi-sisi lainnya. Ketiga data ini menjadi dasar dalam perhitungan koordinat relatif maupun *absolute* dari tiap-tiap titik dalam sistem koordinat yang digunakan, baik lokal maupun global. Dengan adanya titik awal dan akhir yang sama, sistem poligon tertutup memungkinkan deteksi dini terhadap kesalahan pengukuran, baik yang bersifat sistematis maupun acak, sehingga hasil akhir yang diperoleh dapat disesuaikan dan divalidasi agar berada dalam batas toleransi ketelitian sesuai standar survei yang berlaku.



Gambar 1. Ilustrasi Poligon Tertutup
Sumber:(S.Basuki, 2006)

a. Toleransi Kesalahan Sudut

Toleransi penutup sudut pada poligon tertutup merupakan batas maksimum penyimpangan yang diperbolehkan antara jumlah sudut hasil pengukuran dengan jumlah sudut teoritis berdasarkan geometri. Dalam survei terestris, khususnya pada pengukuran poligon tertutup, jumlah sudut dalam secara teoritis dapat dihitung dengan rumus.

Berikut ini adalah rumus untuk menghitung kesalahan sudut pengukuran dalam pengukuran poligon tertutup.

$$f\beta = ((n - 2) * 180^\circ) - \sum\beta \quad \dots\dots\dots(1)$$

keterangan :

$f\beta$ = Kesalahan pengukuran sudut dalam

n = Jumlah titik

$\sum\beta$ = Jumlah sudut dalam

Rumus diatas dapat dipahami dimana n merupakan jumlah titik atau sudut pada poligon. Hasil pengukuran sudut biasanya tidak persis sama dengan nilai teoritis

akibat adanya kesalahan observasi. Oleh karena itu, diperlukan batas toleransi kesalahan penutupan sudut untuk menilai apakah hasil pengukuran masih dapat diterima.

Toleransi poligon tertutup merupakan aspek penting dalam pengukuran karena berfungsi sebagai indikator tingkat ketelitian dan konsistensi data hasil pengukuran. Toleransi penutupan sudut dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

$$\begin{aligned} f\beta &\leq T\sqrt{n} \\ T\sqrt{n} &= 10''\sqrt{n} \end{aligned} \dots\dots\dots(2)$$

keterangan

$f\beta$ = Kesalahan pengukuran sudut

$T\sqrt{n}$ = Toleransi

Penerapan toleransi kesalahan penutup sudut ini sangat penting dalam menjamin ketelitian data survei dan mencegah akumulasi kesalahan yang dapat berdampak pada hasil akhir pemetaan.

b. Toleransi Kesalahan Linier

Toleransi kesalahan linier merupakan batas maksimum penyimpangan posisi (jarak) yang masih dapat diterima antara titik awal dan titik akhir dalam pengukuran poligon tertutup. Kesalahan ini timbul akibat akumulasi kesalahan pengukuran jarak dan sudut selama proses pengukuran, sehingga menjadi salah satu indikator penting dalam menilai kualitas data yang diperoleh. Pada pengukuran poligon tertutup, koordinat hasil pengukuran tidak selalu kembali tepat ke titik awal. Selisih koordinat ini disebut sebagai kesalahan penutup *linier* (*linear misclosure*), yang dihitung berdasarkan perbedaan antara koordinat awal dan koordinat akhir. Besarnya kesalahan linier tersebut dapat dihitung menggunakan rumus berikut.

$$\sqrt{(fx^2 + fy^2)} \leq 1/2500 \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan :

fx = Total koreksi *absis*

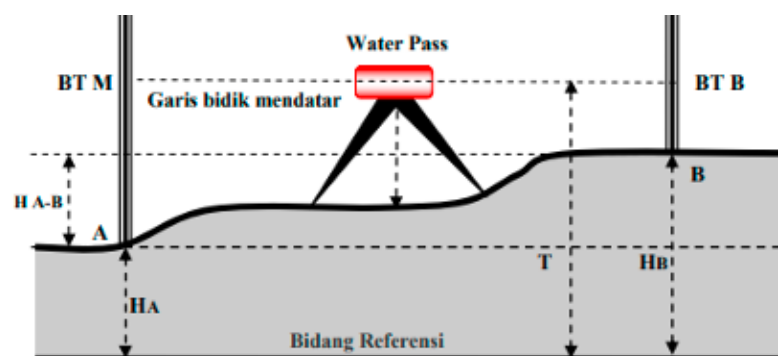
fy = Total koreksi *ordinat*

$\sum d$ = Total jumlah jarak

Toleransi kesalahan linier digunakan untuk menilai akurasi hasil pengukuran koordinat dalam poligon tertutup. Evaluasi ini penting dilakukan sebelum data digunakan untuk pemetaan atau rekonstruksi model. Dengan menggunakan batas toleransi sesuai standar minimal teknis yang berlaku, kualitas dan keandalan data dapat dijaga secara konsisten.

2.2.2. Kerangka Kontrol Vertikal

Kerangka vertikal digunakan dalam suatu pengukuran untuk menentukan beda tinggi dan ketinggian suatu tempat atau titik (Purwaamijaya, 2018). Ada beberapa metode untuk menentukan beda tinggi dan ketinggian titik, dalam penelitian ini metode pengukuran beda tinggi menggunakan *waterpass*. Berikut adalah penjelasan tentang pengukuran kerangka vertikal menggunakan metode *waterpass*. Kerangka Vertikal dengan Metode *Waterpass*. Menentukan beda tinggi dengan menggunakan metode *waterpass* atau rata rata air alat yang digunakan adalah *Waterpass*, penentuan ketinggian (elevasi) dengan menggunakan *waterpass* ada 2 macam yaitu alat di tempatkan di stasion yang di ketahui ketinggiannya, dan Alat sipat datar di tempatkan di antara dua stasion.



Gambar 2. Ilustrasi pengukuran beda tinggi menggunakan waterpass
Sumber: (S.Basuki, 2006)

Berikut ini merupakan persamaan untuk mengetahui nilai beda tinggi antar titik menggunakan hasil bacaan alat *waterpass*.

$$\Delta h = BT_{\text{Belakang}} - BT_{\text{Depan}} \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan

Δh : Selisih tinggi/beda tinggi
 BT_{Belakang} : Bacaan benang tengah belakang
 BT_{Depan} : Bacaan benang tengah depan

a. Total Beda Tinggi/ Penutup Tinggi.

Penutup tinggi merupakan bagian dari pengukuran vertikal yang bertujuan untuk mengetahui beda tinggi antar titik, serta memastikan keakuratan elevasi titik-titik yang diukur. Penutup tinggi dilakukan untuk menguji konsistensi dan ketelitian dari rangkaian pengukuran tinggi dalam satu lintasan tertutup, dengan cara membandingkan nilai elevasi titik awal dan titik akhir yang seharusnya sama. Melalui metode ini, elevasi titik-titik di lapangan dapat dihitung secara akurat berdasarkan prinsip perbedaan bacaan antar rambu belakang dan rambu depan. Jika titik awal dan titik akhir berada pada titik yang sama, maka perbedaan tinggi total seharusnya mendekati nol. Selisih ini digunakan sebagai dasar evaluasi ketelitian pengukuran. Berikut ini adalah persamaan untuk mengetahui nilai total beda tinggi menggunakan *waterpass*.

$$\sum \Delta h = \sum BT_{\text{Belakang}} - \sum BT_{\text{Depan}} \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan

$\sum \Delta h$: Jumlah total selisih tinggi/beda tinggi
 BT_{Belakang} : Bacaan benang tengah belakang
 BT_{Depan} : Bacaan benang tengah depan

Kesalahan penutup tinggi adalah selisih antara jumlah beda tinggi yang dihitung dari hasil pengukuran dengan beda tinggi sebenarnya antara titik awal dan titik akhir. Dalam pengukuran tertutup, titik awal dan titik akhir berada di lokasi yang sama, sehingga beda tinggi teoritis sama dengan nol (0).

b. Toleransi Kesalahan Beda Tinggi/Penutup Tinggi :

Toleransi kesalahan penutup tinggi adalah batas maksimum kesalahan beda tinggi yang masih dapat diterima dalam suatu lintasan pengukuran tertutup. Nilai toleransi ini berguna untuk mengevaluasi apakah pengukuran tinggi yang dilakukan sudah sesuai dengan standar ketelitian tertentu.

$$f_h^{\text{maks}} = n\sqrt{\sum d} \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan

f_h^{maks} = Toleransi (batas maksimal kesalahan beda tinggi)

n = Banyaknya titik

$\sum d$ = Total Jumlah jarak

Setelah nilai toleransi maksimum dihitung, nilai ini dibandingkan dengan kesalahan penutupan tinggi aktual (f_h) yang dihitung dari selisih antara tinggi awal dan tinggi akhir dalam lintasan tertutup.

$f_h^{\text{maks}} \geq f_h$: maka data diterima

$f_h^{\text{maks}} \leq f_h$: maka data tidak dapat diterima

Rumus di atas digunakan untuk menentukan batas maksimum kesalahan penutupan tinggi (f_h^{maks}) yang masih dapat diterima dalam suatu lintasan pengukuran. Nilai toleransi ini bergantung pada jumlah titik pengamatan (n) dan total panjang lintasan pengukuran ($\sum d$). Dengan membandingkan nilai kesalahan aktual di lapangan terhadap nilai toleransi ini, dapat diketahui apakah hasil pengukuran masih dalam batas ketelitian yang diperbolehkan atau tidak.

2.3. Pengukuran Detail Bangunan

Pengukuran detail bangunan merupakan proses pengumpulan data spasial secara menyeluruh terhadap elemen-elemen fisik bangunan dengan tujuan memperoleh informasi geometri dan dimensi yang akurat. Proses ini mencakup pengukuran pada struktur utama, seperti dinding, atap, dan kolom, serta detail arsitektural, meliputi pintu, jendela, hingga ornamen bangunan. Metode pengukuran detail dilakukan dengan menggunakan alat ukur *Total Station*. Pengukuran detail memiliki peranan penting dalam berbagai bidang, antara lain penyusunan peta detail, pemodelan tiga dimensi (3D), rekonstruksi digital, perencanaan renovasi, maupun pelestarian bangunan bersejarah. Melalui pengukuran yang teliti, representasi digital bangunan dapat disusun dengan tingkat ketelitian yang tinggi sehingga dapat digunakan sebagai dasar analisis maupun pengambilan keputusan teknis dan manajerial. Selain itu, pengukuran detail juga berfungsi sebagai data pembanding terhadap hasil pemodelan dari teknologi modern seperti TLS, sehingga tingkat akurasi dapat diuji. Dengan demikian, data hasil pengukuran detail menjadi acuan utama dalam menilai keandalan hasil pemindaian dan proses pemodelan selanjutnya.

2.4. *Terrestrial Laser Scanner*

Teknologi *laser scanning* adalah salah satu teknologi melakukan Akuisisi 3 dimensi (Ramadhani dkk, 2021), dengan menggunakan metode *scanning terrestrial* berbasis Lidar sensor. Model 3D memungkinkan pengguna untuk mengakses atau mendokumentasikan banyak data geometris dan visual yang diperlukan seperti warisan budaya, pengukuran deformasi, aplikasi perencanaan, kontrol kualitas, produksi *prototype*, analisis Tempat Kejadian Perkara (TKP) dan industri pembuatan film. *Terrestrial Laser Scanner* mempunyai keunggulan yang tidak dimiliki oleh pengukuran *Tachimetri*, GPS, maupun Fotogrametri (Reshetyuk, 2009). Berikut ini merupakan keunggulan TLS:

1. Menangkap geometri suatu objek dalam 3D secara langsung, cepat dan detail.
2. Dapat memangkas biaya dan dapat menyelesaikan pekerjaan jauh lebih cepat.

3. Dapat digunakan pada daerah survei atau objek yang sulit dijangkau dan berbahaya di mana teknik survei tradisional sangat sulit untuk dilakukan.
4. Tidak memerlukan cahaya untuk dapat mengakuisisi data.
5. Pemindaian yang secara lengkap dan komprehensif.
6. Data dapat digunakan untuk saat ini dan masa yang akan mendatang.

2.4.1. Prinsip Kerja *Terrestrial Laser Scanner*

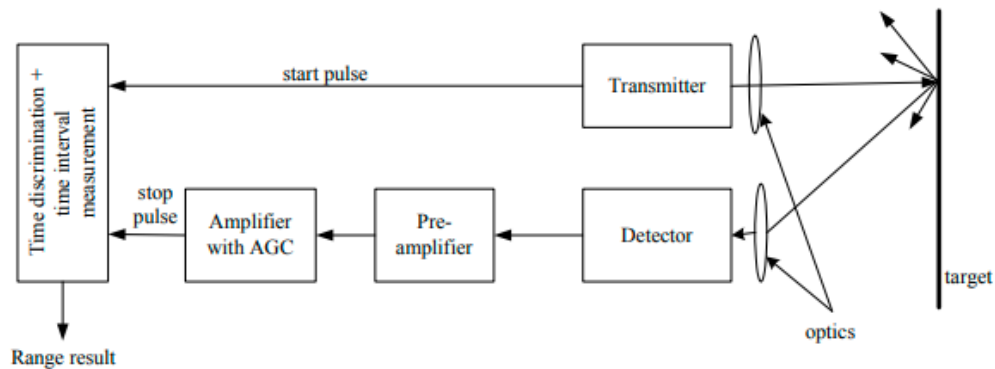
TLS mempunyai suatu sistem pengukuran yang terdapat di dalamnya, yaitu sistem pengukuran jarak dan sistem pengukuran sudut. Sistem pengukuran ini digunakan untuk mendapatkan koordinat *Point clouds* (Metawie, dan Marzouk, 2020). Pada Sistem TLS mekanisme yang digunakan seperti *Laser Rangefinder* yang merupakan suatu komponen TLS yang paling berperan dalam melakukan pengukuran jarak (Pitto, dkk., 2014). Berikut ini bagian dari mekanisme *Laser Rangefinder*:

1. *Transmitter* atau pemancar pulsa
2. *Receiver* atau penerima pulsa (terdiri dari detektor, penguat sinyal, dan sistem pengontrol penguat sinyal (*Automatic Gain Control (AGC)*))
3. Pengukur waktu elektronik, unit pengukur waktu (*Time- to-Digital Converter (TDC)*)

Mekanisme pengukuran jarak berbasis pulsa dari *Laser Rangefinder* yaitu dengan dua tahap dengan laser dipancarkan dari TLS melalui *transmitter* ke objek, dan laser yang dipancarkan menyentuh objek setelah itu, Pulsa *Laser* memancar kembali ke penerima sinyal untuk mengaktifkan unit pengukur waktu otomatis pada *detector* elektronis.

Menurut (Zakaria, 2016) Mekanisme TLS pada dasarnya *laser* yang Kembali kepada *receiver* akan terhamburkan pada *receiver* dan Sebagian akan masuk kepada *detector*. Detektor akan mengkonversi kekuatan pancaran pulsa menjadi arus listrik yang kemudian akan diterima dan diteruskan oleh penguat arus. Saat arus listrik mencapai penguat, hal tersebut akan membuat bacaan waktu mengulangi bacaan Kembali, sehingga hal tersebut mendanakan waktu kembalinya pulsa dan akan

menghentikan pengukuran waktu. Interval waktu antara rentang pulsa yang dipancarkan hingga pulsa kembali terdeteksi digunakan untuk menghitung jarak antara alat TLS dengan objek. Berikut ini merupakan ilustrasi dari mekanisme pengukuran menggunakan TLS berbasis pulsa yang diadaptasi dari pengukuran jarak menggunakan *Laser Rangefinder* yang dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 3. Mekanisme pengukuran jarak menggunakan *Rangefinder*

Sumber: (Reshetyuk, 2009)

Menurut (Reshetyuk, 2009) berdasarkan dari perhitungan interval waktu yang didapatkan persamaan perhitungan jarak seperti persamaan dibawah.

$$r = \frac{c \cdot t}{2} \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan

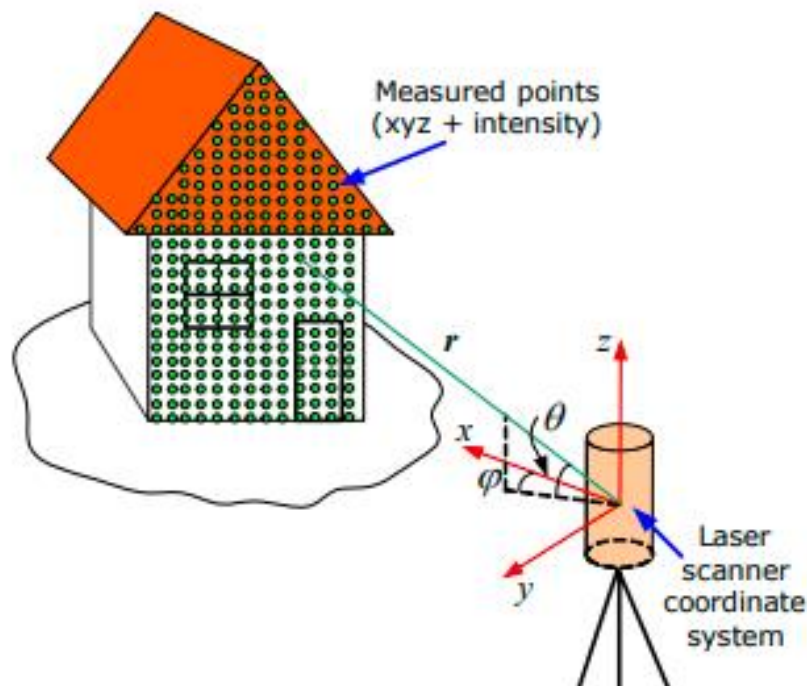
r : jarak antara TLS dengan objek (m).

c : kecepatan cahaya di udara (300 000, 000 m/s).

t : waktu tempuh *laser* ketika dipancarkan hingga diterima (*second*).

TLS juga mempunyai sistem pengukuran sudut yang digunakan untuk mendapatkan koordinat objek. Sistem pengukuran sudut terdiri dari *angular recorders* yang berfungsi mengukur sudut horizontal dan sudut vertikal sinar *laser* ke objek (Zhou, dkk., 2020).

Pengukuran TLS menghasilkan beberapa parameter yang diukur dalam setiap objek, seperti jarak r (m), sudut *pitch* (ϕ), dan sudut *yaw* (θ). Pengukuran menggunakan akan menghasilkan sekumpulan titik yang disebut *Point cloud* yang akan merepresentasikan dari objek yang diukur secara detail (Mill, 2016). Prinsip pengukuran TLS seperti ilustrasikan pada Gambar dibawah.



Gambar 4. Ilustrasi Akuisisi data *Point cloud* menggunakan TLS.
Sumber: (Reshetyuk, 2009)

Hasil pengukuran jarak dan sudut dengan menggunakan TLS akan menghasilkan data mentah berupa (r, ϕ, θ) . Hasil sudut dan jarak yang di dapat dilakukan proses transformasi menjadi koordinat lokal (x, y, z) . proses perubahan tersebut yang dapat di tuliskan dalam persamaan 8 dibawah.

$$\text{Koordinat} = \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_j \cos\phi_j \cos\theta_j \\ r_j \sin\phi_j \cos\theta_j \\ r_j \sin\theta_j \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan:

- r_j : jarak hasil pengukuran waktu tempuh *laser* ke objek (m)
- φ_j : sudut horizontal antara arah bidikan *laser* dengan sumbu bidikan horizontal terdekat biasa disebut sudut *pitch* (°)
- θ_j : sudut vertikal antara bidang horizontal dengan arah bidikan *laser* terdekat biasa disebut sudut *yaw* (°)
- x_j : koordinat x *Point clouds* dalam sistem koordinat alat (m)
- y_j : koordinat y *Point clouds* dalam sistem koordinat alat (m)
- z_j : koordinat z *Point clouds* dalam sistem koordinat alat (m)

2.4.2. Registrasi

Registrasi merupakan proses penyatuan *Point cloud* dari hasil beberapa *scan world* atau akuisisi sehingga terbentuk satu model *Point clouds* pada sistem koordinat yang sama (Hidayat, 2016). Registrasi data *Point cloud* terbagi menjadi 3, beberapa metode tergantung kondisi objek dan area di sekitar objek dan kemampuan alat yang digunakan seperti *Target to Target*, *Cloud to Cloud*, dan *Traversing* (Genechten, 2008). Berikut ini adalah pengertian dari 2 metode registrasi data *Point cloud* yaitu *Target to Target* dan *Cloud to Cloud*.

1. Registrasi *Target to Target*

Metode registrasi *Target to Target* merupakan teknik yang banyak digunakan dalam pemrosesan data TLS. Pada prinsipnya, metode ini memanfaatkan titik-titik acuan (*knowing points*) yang terlihat pada dua atau lebih posisi pemindaian, sehingga *Point cloud* dapat digabungkan dalam sistem koordinat yang konsisten (Zakaria, 2016).

Umumnya, titik acuan tersebut berupa target fisik seperti bola reflektor atau papan datar yang dipasang sebelum pemindaian. Namun, dalam kondisi tertentu pemasangan target buatan tidak memungkinkan, misalnya karena keterbatasan lokasi, sifat objek, atau larangan pemasangan infrastruktur tambahan. Oleh karena itu, berbagai penelitian telah mengembangkan pendekatan *target-less* atau *marker-*

free Target to Target registration, yaitu dengan menjadikan elemen bangunan atau fitur alami di lapangan sebagai titik ikat (Castorena, dkk., 2023).

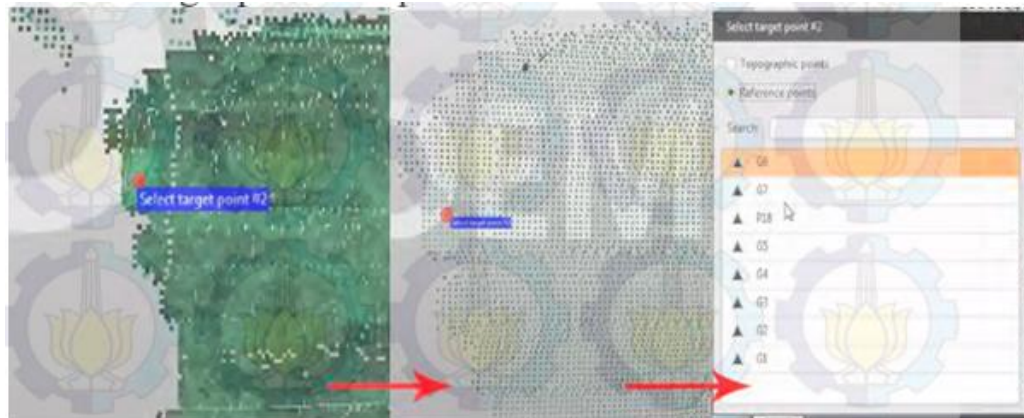


Gambar 5. Contoh Penerapan Mark alam sebagai titik referensi.
Sumber: (Zhu dkk., 2021)

Akurasi registrasi tetap dapat dicapai apabila syarat tertentu terpenuhi, antara lain:

- Visibilitas: target alami harus terekam dengan jelas dari posisi pemindaian berbeda.
- Kerapatan titik memadai: alat TLS harus memiliki resolusi cukup untuk merepresentasikan bentuk target.
- Identifikasi konsisten: target alami harus mudah dikenali secara visual maupun geometri, misalnya melalui bantuan sensor RGB atau analisis bentuk geometri bidang.

Dengan demikian, meskipun metode *Target to Target* lazimnya menggunakan mark buatan, penerapan target alami sebagai titik kontrol telah diakui dalam literatur sebagai alternatif sah yang mendukung efisiensi sekaligus menjaga ketelitian registrasi. Elemen arsitektural seperti sudut bangunan, jendela, pintu, atau perpotongan bidang dinding dapat digunakan sebagai *natural targets* yang koordinatnya diperoleh dari pengukuran referensi (*Total Station*). Hal ini memungkinkan registrasi yang presisi tanpa memerlukan pemasangan target tambahan, sekaligus lebih efisien dalam konteks penelitian lapangan yang memiliki keterbatasan teknis.

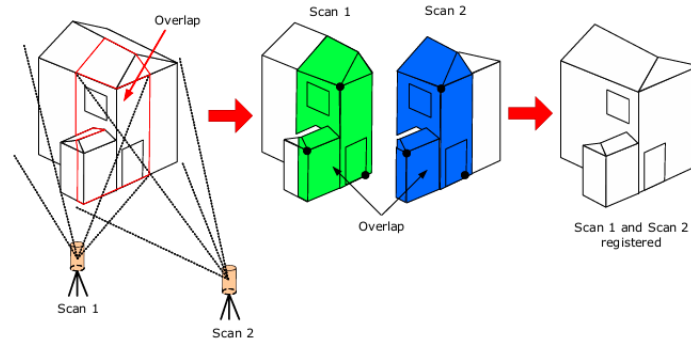


Gambar 6. Contoh pemilihan target dalam metode *Target to Target*
Sumber: (Zakaria, 2016)

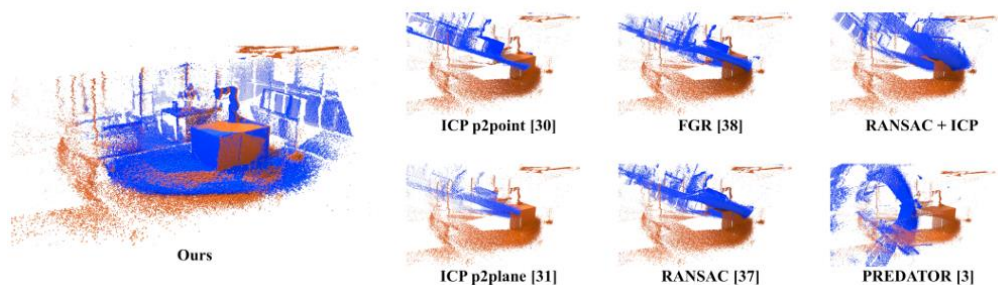
Hal yang diperlukan untuk menggunakan metode ini target yang digunakan harus terlihat jelas pada hasil *scanning* dari beberapa tempat berdiri alat dimana alat harus mempunyai resolusi yang baik dan sudah didukung oleh sensor warna atau RGB untuk merepresentasikan target atau elemen fisik yang dapat diidentifikasi secara lebih jelas.

2. Registrasi *Cloud to Cloud*

Registrasi ini memiliki syarat utama, yaitu harus menggunakan minimal tiga titik sekutu (*common points*) yang terdapat pada kedua hasil pemindaian, atau setidaknya memiliki *overlapping area* sebesar 30–40%. Proses registrasi dapat dilakukan dengan metode *Iterative Closest Point (ICP)* (Morhart, dkk., 2024), atau dapat pula menggunakan algoritma otomatis seperti *RANSAC*, maupun metode lainnya yang mampu mengenali bentuk geometris pada *Point cloud* untuk menyelaraskan dua himpunan data hasil pemindaian (Zagar, dkk., 2022). Penggunaan minimal tiga titik pada metode *ICP* bertujuan untuk mencari *offset* atau jarak terdekat secara berulang antara dua kumpulan *Point cloud*. Meskipun secara teoritis hanya membutuhkan tiga titik, namun penggunaan titik yang lebih banyak akan menghasilkan ketelitian yang lebih baik dan registrasi yang lebih stabil (Rajendra, dkk., 2014). Keunggulan dari metode ini adalah efisiensinya, karena perangkat TLS tidak memerlukan waktu lama dalam melakukan proses penyatuan data hasil pemindaian.



Gambar 7. Registrasi Metode *Cloud to Cloud*
Sumber: (Reshetyuk, 2009).



Gambar 8. Contoh penyelarasan data menggunakan metode algoritma otomatis *align Cloud to Cloud*
Sumber: (Zagar dkk., 2022)

2.5. *PhotoModeler*

PhotoModeler adalah perangkat lunak berbasis fotogrametri yang berfungsi untuk menghasilkan data spasial 3D dari foto digital. Salah satu fungsi utamanya adalah untuk mengolah citra menjadi *dense Point cloud* serta menambahkan informasi warna (RGB) ke dalam data spasial tersebut. Dalam praktiknya, *PhotoModeler* juga dapat digunakan untuk *import Point cloud* dari perangkat eksternal, lalu memproyeksikan warna dari foto ke titik-titik dalam *Point cloud* tersebut (Chan dkk., 2021). Proses ini dikenal sebagai *color mapping* atau *texturing*, yaitu pemberian warna pada *Point cloud* berdasarkan nilai RGB dari citra yang sesuai. Dengan pewarnaan tersebut, data *Point cloud* menjadi lebih mudah diinterpretasi secara visual karena menyerupai kondisi asli objek di lapangan (Crombez dkk.,

2015). Hal ini sangat membantu dalam identifikasi elemen-elemen geometris bangunan, seperti bidang dinding, jendela, pintu, maupun fitur arsitektural lainnya. Secara umum, fungsi *PhotoModeler* dalam konteks ini adalah sebagai alat bantu visualisasi dalam pelengkapan data TLS, khususnya saat informasi warna dibutuhkan untuk memperjelas tampilan model atau hasil pengukuran dalam bentuk *Point cloud*.

2.6. *CloudCompare*

CloudCompare adalah perangkat lunak *opensource* yang khusus dirancang untuk memproses dan menganalisis data *Point cloud* 3D. Dalam penelitian ini, perangkat lunak ini digunakan untuk melakukan registrasi data menggunakan dua metode utama, yaitu *Cloud to Cloud* (C2C) berbasis algoritma *Iterative Closest Point* (ICP) dan *Target to Target* (T2T) berbasis titik referensi. *CloudCompare* memungkinkan pengguna untuk mengatur parameter kunci seperti *overlap* minimal 30%, jumlah iterasi maksimum, dan toleransi *Root Mean Square* (RMS) untuk memastikan akurasi proses registrasi. Selain itu, perangkat lunak ini juga dilengkapi dengan fitur analisis geometris seperti perhitungan jarak, volume, dan kerapatan titik (*surface density*), serta filterisasi *Noise* menggunakan algoritma *Statistical Outlier Removal* (SOR) dan analisis lain untuk meningkatkan kualitas data. Fitur visualisasi *CloudCompare* memegang peran krusial dalam validasi hasil registrasi. Kemampuan *software* dalam menampilkan variasi warna berdasarkan elevasi atau intensitas mempermudah identifikasi ketidaksesuaian data (Martinez dan McMahan, 2023). Analisis komparatif Budisusanto terhadap sistem Lidar *low-cost* membuktikan keandalan *CloudCompare* untuk evaluasi *Point cloud* karakteristik yang sesuai dengan spesifikasi TLS100. Kinerja unggul dalam pengolahan data Lidar sejenis (Budisusanto dkk., 2022) menjadikannya pilihan ideal untuk penelitian ini, khususnya dalam penilaian akurasi Planimetrik model 3D.

2.7. Pengecekan Registrasi

Pengecekan registrasi pada data hasil pemindaian dilakukan untuk memastikan bahwa semua titik dari berbagai posisi alat telah tersambung dan terselaraskan dengan benar. Proses ini bertujuan untuk mengevaluasi apakah penyatuan antar titik-titik (*Point cloud*) dari beberapa posisi pemindaian sudah sesuai atau belum. Dalam penelitian ini, ambang batas atau toleransi kesalahan registrasi ditetapkan sebesar 10 cm. Toleransi ini digunakan sebagai patokan untuk menilai apakah proses registrasi berhasil atau masih perlu diperbaiki. Penentuan nilai 10 cm ini didasarkan pada beberapa pertimbangan teknis.

1. TLS100 yang digunakan merupakan alat rakitan atau kategori *low-cost*, sehingga belum memiliki *sertifikasi* atau standar kalibrasi resmi seperti alat komersial. Karena itu, ketelitian dan kestabilan datanya masih terbatas dan belum sebaik alat industri.
2. Toleransi 20 cm juga didukung oleh simulasi kerapatan titik yang menunjukkan bahwa jarak antar titik semakin renggang seiring dengan bertambahnya jarak pemindaian. Dalam jarak kurang dari 5 meter, jarak antar titik (spasi) bisa berada di kisaran 3–5 cm, sedangkan pada jarak 20 meter, spasi titik bisa mencapai lebih dari 15 cm. Oleh karena itu, nilai toleransi dalam rentang 1–10 cm dianggap masih sesuai, dengan catatan bahwa di area kecil dan jarak pendek, nilai di bawah 5 cm tetap mungkin dicapai.
3. Tidak adanya standar teknis resmi dari alat ini menyebabkan tidak mungkin menggunakan acuan *error* yang terlalu ketat. *Kesalahan rata-rata kuadrat* (*Root Mean Square error* atau *RMS*) sebesar 10 cm dianggap sebagai batas wajar untuk menyatakan apakah data sudah tersambung dengan cukup baik.

Beberapa sumber menyebutkan bahwa alat TLS profesional biasanya mampu menghasilkan kesalahan registrasi kurang dari 3 cm (Vosselman, G., dan Maas, 2010). Namun, untuk TLS dengan kemampuan terbatas seperti alat ini, nilai toleransi 10 cm masih dianggap dapat diterima, selama tidak terjadi pergeseran bentuk secara signifikan dalam model akhir (Zhang, K., 2016).

2.8. Uji Akurasi posisi dan ukuran Dimensi Bangunan

Analisis ketelitian dimensi dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana hasil pengukuran dimensi geometris dari model *Point cloud* TLS100 mendekati dimensi referensi aktual (*ground truth*) dari objek bangunan yang diamati. Pendekatan statistik yang digunakan dalam analisis ini adalah perhitungan Nilai *Root Mean Square* (RMS).

RMS adalah metrik statistik yang sangat relevan dalam geomatika karena memberikan indikator tunggal mengenai tingkat akurasi model dengan merangkum besaran total kesalahan dari nilai referensi. RMS dihitung dengan merata-ratakan kuadrat dari selisih antara pengukuran hasil dan pengukuran referensi, kemudian mengakarkannya. Nilai RMS ini selanjutnya digunakan sebagai nilai ketelitian geometris model. Persamaan untuk menghitung nilai RMS adalah sebagai berikut:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{ref})^2} \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan:

- RMS = Kesalahan *Root Mean Square* (Nilai Ketelitian) dalam meter (m).
- x_i = nilai hasil ukuran tls
- x_{ref} = nilai acuan hasil ukuran ts
- n = jumlah data sampel

Semakin kecil nilai RMS yang dihasilkan, maka semakin tinggi tingkat akurasi dan ketelitian geometris model *point cloud* terhadap kondisi *ground truth*. Nilai RMS yang diperoleh akan menjadi acuan utama untuk:

1. Menentukan metode mana (C2C atau T2T) yang menghasilkan akurasi *point cloud* yang lebih tinggi.
2. Menilai kesesuaian hasil pengukuran dengan standar toleransi akurasi yang ditetapkan, yang akan menjadi dasar penentuan kelayakan model untuk aplikasi 3D selanjutnya (misalnya, perhitungan volume).

Selain evaluasi dimensi, analisis ketelitian juga dilakukan terhadap akurasi posisi titik-titik (*point cloud*) dalam ruang tiga dimensi. Uji ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar penyimpangan koordinat (X, Y, Z) hasil pemindaian TLS 100 terhadap koordinat referensi yang dianggap benar (hasil pengukuran Total Station). Sesuai dengan standar SNI 8202:2019 tentang Ketelitian Peta Dasar, evaluasi ketelitian posisi dibagi menjadi dua komponen utama, yaitu ketelitian horizontal dan ketelitian vertikal. Perhitungan dilakukan dengan membandingkan koordinat titik sekutu (*check points*) pada model dengan koordinat titik kontrol di lapangan.

Ketelitian Posisi Horizontal dan Vertikal, Ketelitian posisi dihitung berdasarkan nilai residu pada masing-masing sumbu koordinat. Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dihitung secara terpisah untuk komponen posisi X (RMSE_x), posisi Y (RMSE_y), dan elevasi Z (RMSE_z) menggunakan persamaan berikut:

$$RMSE_{XYZ} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (TLS_{TLS} - XYZ_{TS})^2} \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan:

- XYZ_{TLS} : Nilai koordinat (X, Y, atau Z) hasil pemindaian TLS.
- XYZ_{TS} : Nilai koordinat (X, Y, atau Z) acuan dari Total Station.
- n : Jumlah titik sampel (*Check Point*).

Ketelitian Horizontal Gabungan (RMSE_r) Untuk mengetahui ketelitian posisi horizontal secara menyeluruh (gabungan dua dimensi), digunakan nilai *Circular Error* atau RMSE radial (RMS_r). Nilai ini merepresentasikan besarnya kesalahan pergeseran titik pada bidang datar. Persamaan untuk menghitung RMSE_r adalah sebagai berikut:

$$RMSE_{XYZ} = \sqrt{RMSE_X^2 + RMSE_Y^2} \dots\dots\dots (11)$$

Penentuan ketelitian berdasarkan standar SNI 8202:2019, nilai RMSE hasil perhitungan di atas harus dikonversi terlebih dahulu menjadi nilai ketelitian dengan

tingkat kepercayaan (*Confidence Level*) 90%. Rumus Konversi Akurasi (CE90 dan LE90) Berdasarkan SNI 8202:2019, perhitungan ketelitian horizontal (*Circular Error* 90%) dan vertikal (*Linear Error* 90%) menggunakan persamaan berikut:

Ketelitian Horizontal (CE90)

$$CE90 = 1.5175 \times RMSE_r \dots\dots\dots (12)$$

Ketelitian Vertikal (LE90)

$$LE90 = 1.6499 \times RMSE_Z \dots\dots\dots (13)$$

Tabel dibawah yaitu Klasifikasi Ketelitian Peta Dasar Setelah nilai CE90 dan LE90 diperoleh, nilai tersebut dibandingkan dengan tabel toleransi ketelitian peta dasar. Berikut adalah tabel klasifikasi Ketelitian Peta Dasar menurut badan standarisasi nasional (BSN) SNI 8202:2019:

Tabel 2. Ketelitian Horizontal peta RBI

No	Skala Peta	Ketelitian Horizontal Peta RBI (m)	
		Kelas 1	Kelas 2
		Horizontal LE90 (m)	Horizontal LE90 (m)
1	1 : 1.000.000	300	900
2	1 : 500.000	150	450
3	1 : 250.000	75	225
4	1 : 100.000	30	90
5	1 : 50.000	15	45
6	1 : 25.000	7,5	22,5
7	1 : 10.000	3	9
8	1 : 5.000	1,5	4,5
9	1 : 2.500	0,75	2,25
10	1 : 1.000	0,3	0,9

Sumber : (Badan standarisasi nasional, 2021)

Tabel 3. Ketelitian Vertikal peta RBI

No	Interval kontur	Ketelitian Vertikal Peta RBI (m)	
		Kelas 1	Kelas 2
		Vertikal CE90 (m)	Vertikal CE90 (m)
1	400	200	400
2	200	100	200
3	100	50	100
4	40	20	40
5	20	10	20
6	10	5	10
7	4	2	4
8	2	1	2
9	1	0,5	1
10	0,4	0,2	0,4

Sumber : (Badan standarisasi nasional, 2021)

2.9. Perbandingan Volume Bangunan

Perbandingan volume bangunan merupakan salah satu tahapan analisis penting dalam evaluasi hasil pemodelan tiga dimensi (3D) berbasis *point cloud*. Volume bangunan didefinisikan sebagai besaran tiga dimensi yang merepresentasikan kapasitas ruang yang dibatasi oleh elemen struktural konstruksi seperti dinding, lantai, dan atap. Dalam penelitian ini, perhitungan volume dilakukan berdasarkan hasil pemindaian menggunakan dua metode registrasi, yaitu *Cloud to Cloud* (C2C) dan *Target to Target* (T2T), yang kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran referensi menggunakan *Total Station* (TS). Persamaan untuk menghitung perbandingan persentase volume sebagai berikut.

$$\text{Selisish Volume} = \frac{\text{Volume Tls} - \text{Volume Ts}}{\text{Volume Ts}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (14)$$

Proses perhitungan volume dilakukan menggunakan perangkat lunak *CloudCompare* dengan fungsi *Compute 2.5D Volume*, yang mengimplementasikan pendekatan *raster-based* atau *grid-based calculation*. Metode ini menghitung volume berdasarkan perbedaan ketinggian (*height difference*) antara dua

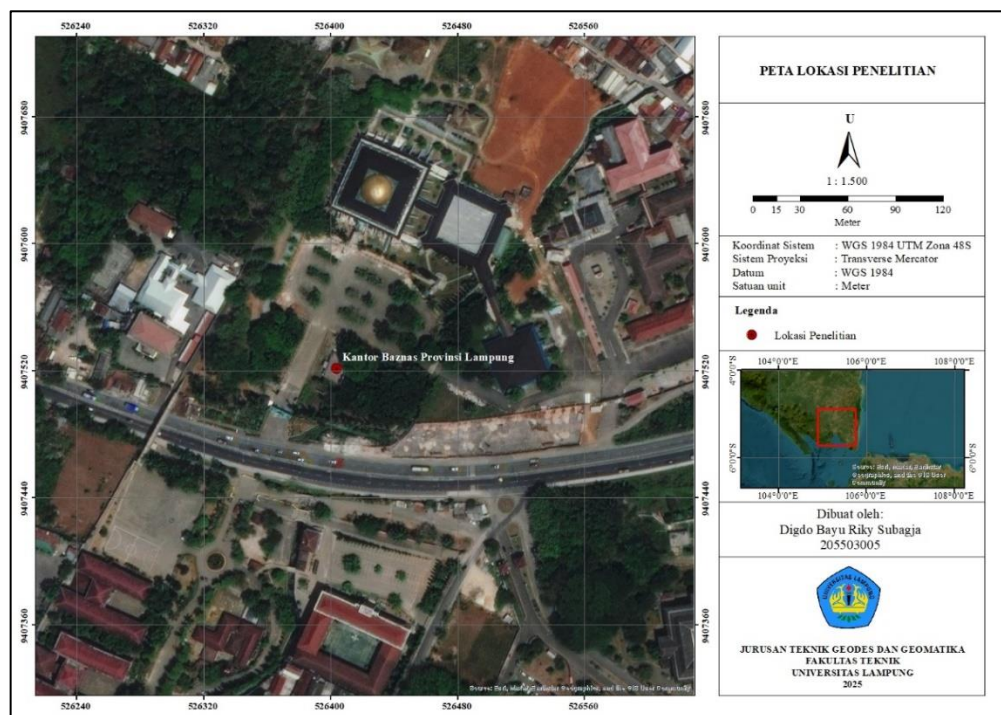
permukaan, yaitu permukaan atas (*ceil surface*) dan permukaan bawah (*ground surface*).

Evaluasi ketelitian, acuan yang digunakan dalam perbandingan hasil perhitungan volume adalah standar *American Society for Testing and Materials* (ASTM D6172-98) tentang *Standard Practice for Measuring the Volume of Stockpiles* (ASTM, 1998). Berdasarkan standar tersebut, toleransi maksimum perbedaan volume yang dapat diterima secara industri adalah di bawah 2%. Oleh karena itu, hasil perbandingan volume antar metode dianalisis dengan mengacu pada batas toleransi tersebut untuk menilai sejauh mana hasil pemodelan *point cloud* dapat merepresentasikan volume aktual bangunan secara akurat dan sesuai standar teknis yang berlaku.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. 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 9. Peta 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.

3.2. Alat Dan Data Yang Digunakan

Alat dan data menjadi salah satu sarana wajib yang diperlukan dalam penelitian ini. Penjabaran mengenai alat dan data yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada sub-sub bab berikut ini.

3.2.1. Alat Yang Digunakan

Alat yang dibutuhkan dalam penelitian ini dibagi menjadi dua berupa alat/perangkat keras (*hardware*), dan perangkat lunak (*software*). Berikut ini adalah daftar alat yang digunakan dalam penelitian ini.

1. Alat atau Perangkat keras (*hardware*)

Ada empat alat pokok yang digunakan pada penelitian ini yang mempunyai fungsinya yang berbeda beda. Berikut ini daftar alat yang digunakan:

Tabel 4. Daftar alat yang digunakan.

No	Jenis Alat	Jumlah	Fungsi
(Hardware)			
1.	<i>Lenovo ThinkPad T440p</i> (<i>Windows 10</i>) RAM 16 GB, ROM 488 GB.	1 unit	Melakukan pengolahan data dan penyusunan laporan penelitian
2.	LIDAR TLS100 Potretudara	1 unit	Untuk Akuisisi data <i>Point cloud</i> bangunan, sebagai sarana data pokok penelitian
3.	<i>Total Station Topcon</i>	1 unit	Melakukan pengukuran kerangka kontrol horizontal, dan untuk melakukan pengukuran detail bangunan
4.	<i>Waterpass</i>	1 unit	Melakukan pengukuran kerangka kontrol vertikal/beda tinggi
5.	<i>Camera Canon D60S</i>	1 unit	Pengambilan data <i>Image</i>

2. Perangkat lunak (*software*)

Penelitian ini menggunakan beberapa perangkat lunak yang mempunyai fungsi yang penting dalam proses pencatatan, pengolahan, dan pengolahan data. Berikut ini beberapa daftar perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 5. Daftar Perangkat Lunak.

No	Jenis Bahan	Versi	Fungsi
<i>(Software)</i>			
1.	<i>CloudCompare</i>	V2.13.2	Sarana untuk melakukan proses, registrasi, <i>Segmentasi</i> , dan filterisasi <i>Point cloud</i>
2.	<i>Mircrosoft office</i>	2010	Sebagai sarana pencatatan, dan pelaporan, data penelitian.
3.	<i>Converter Ekstention</i>	-	Sebagai sarana untuk melakukan konversi data (jarak, sudut <i>pitch</i> , sudut <i>yaw</i>) menjadi koordinat lokal (X, Y, Z)
4	<i>PhotoModeler UAS</i>	2017	Sebagai sarana untuk penambahan warna pada data <i>Point cloud</i> dari data gambar atau foto

3.2.2. Data Yang Digunakan

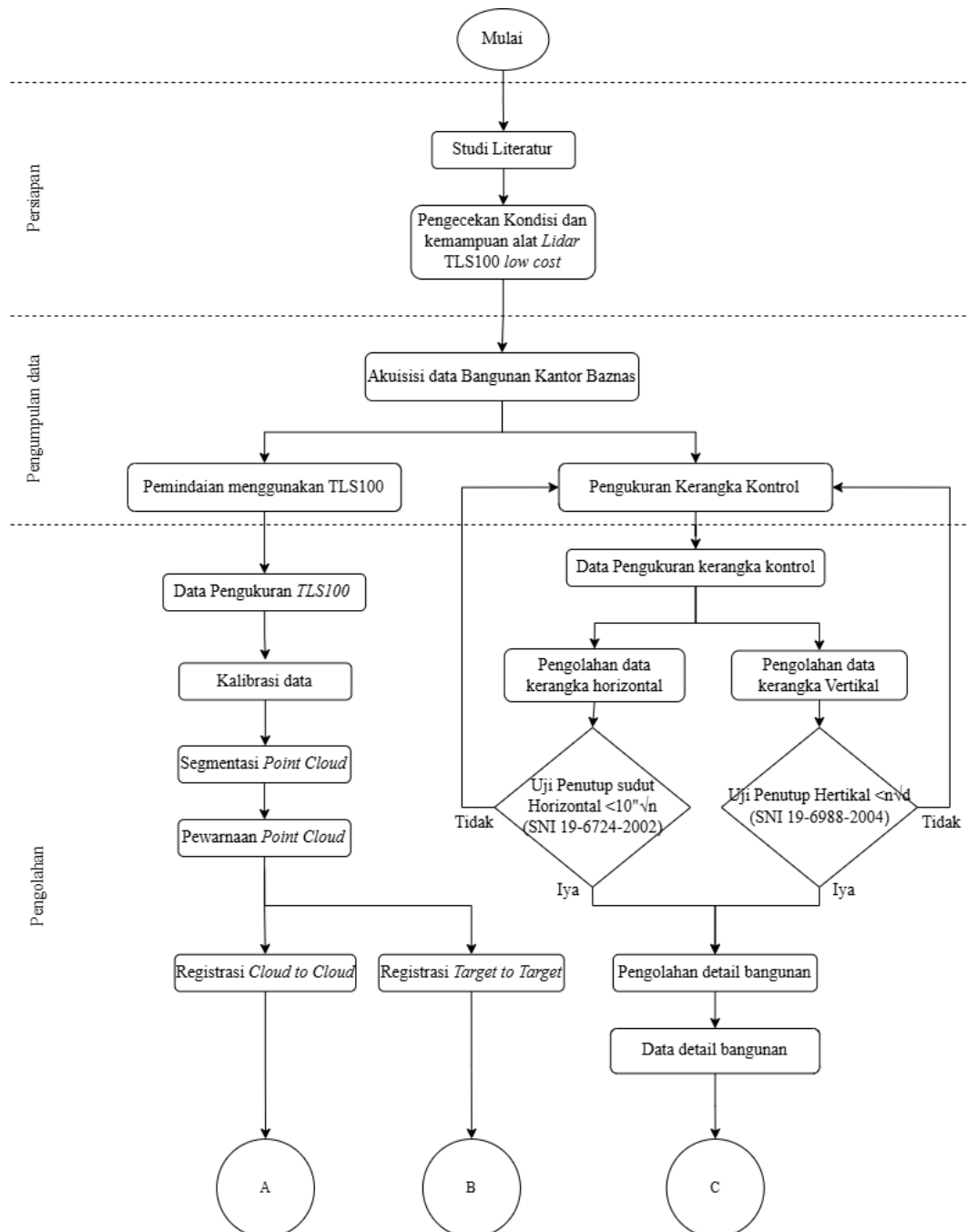
Penelitian ini menggunakan data pengukuran Kerangka kontrol sebagai referensi untuk dijadikan acuan pengukuran dan pengecekan data hasil pengukuran lanjutan seperti pengukuran detail dan pengecekan hasil ukuran TLS100. Data awal pengukuran menggunakan koordinat geografis yang didapatkan dari data BM dan CP yang sudah ada. Berikut ini adalah data koordinat dan elevasi titik referensi BM dan CP yang digunakan.

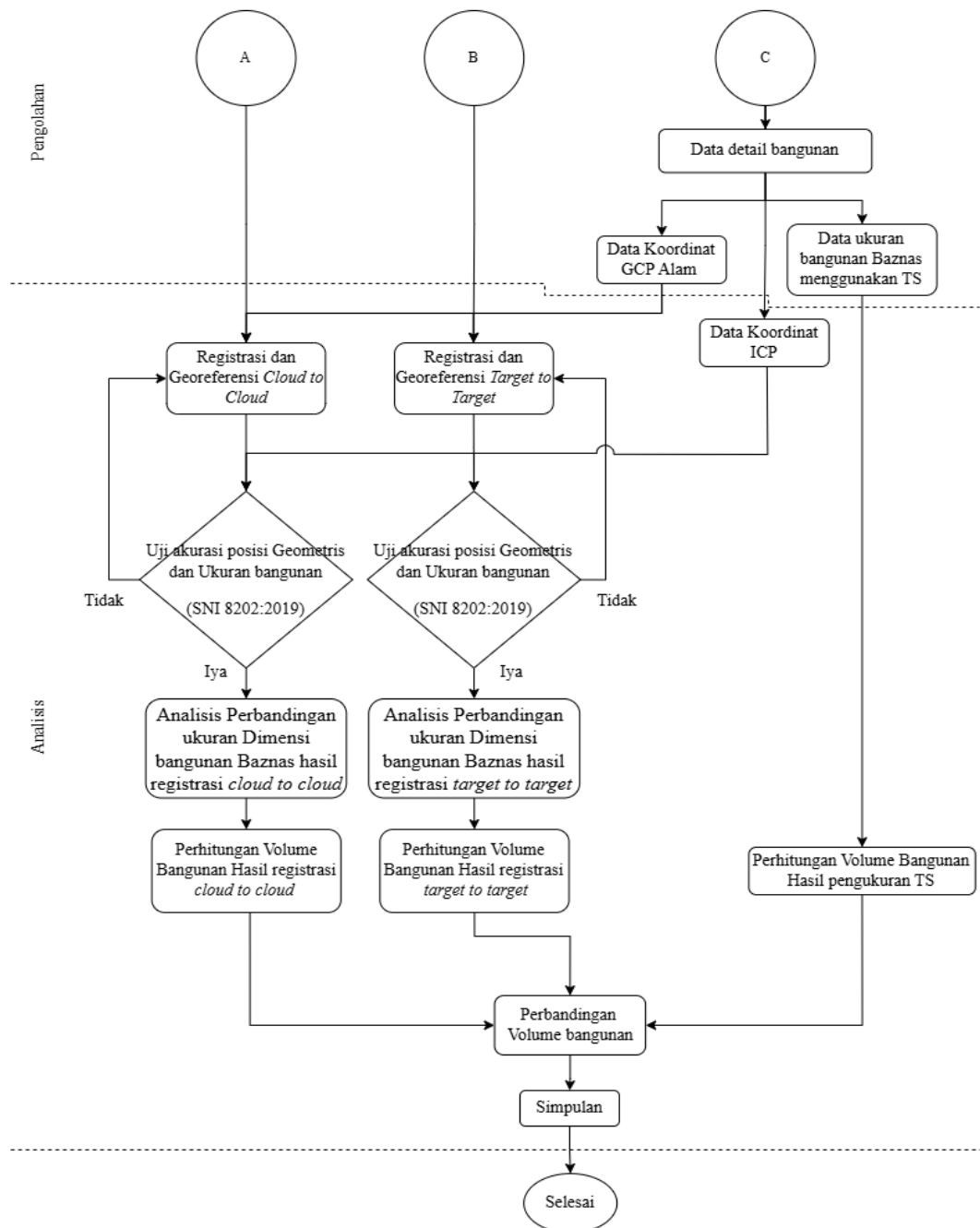
Tabel 6. Data koordinat BM dan CP

No	Nama	Koordinat X (m)	Koordinat Y (m)	Koordinat Z (m)	Jenis Data
1	BM	526427,4886	9407514,8340	123,911	Data Skunder
2	CP	526438,7402	9407509,1033	123,924	Data Skunder

3.3. Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini terdapat serangkaian tahapan kegiatan yang dapat dilihat pada gambar diagram alir penelitian dibawah.





Gambar 10. Diagram Alir Penelitian.

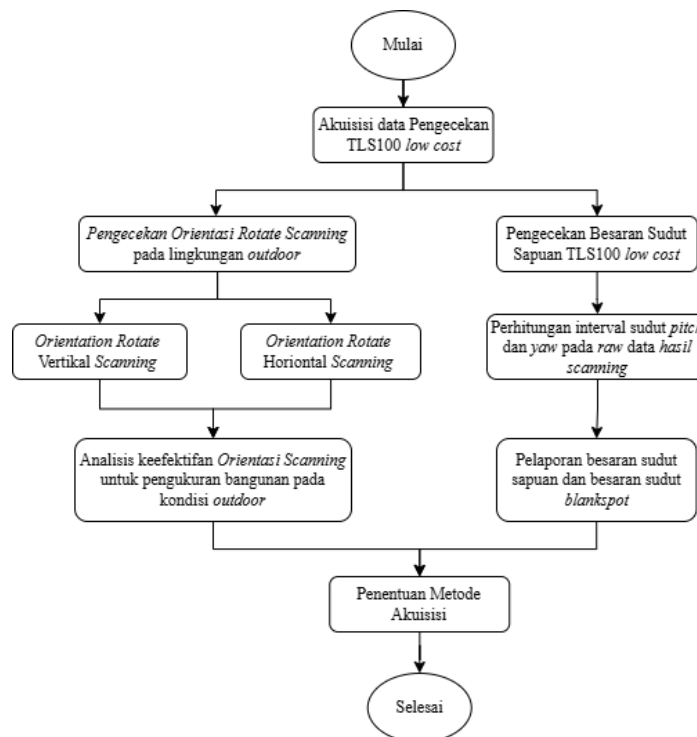
3.4. Tahap Persiapan

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 kondisi dan kemampuan alat dijabarkan seperti pada sub-sub bab dibawah.

3.4.1. Pengecekan kondisi dan kemampuan alat

Proses pengecekan kondisi, dan kemampuan alat Lidar TLS100 dibagi menjadi dua tahapan yaitu pengecekan orientasi *rotate scanning* pada lingkungan *outdoor*, dan pengecekan besaran sudut sapuan alat yang dapat dihasilkan. Alur proses pengecekan tersebut dapat dilihat pada diagram alir dibawah.



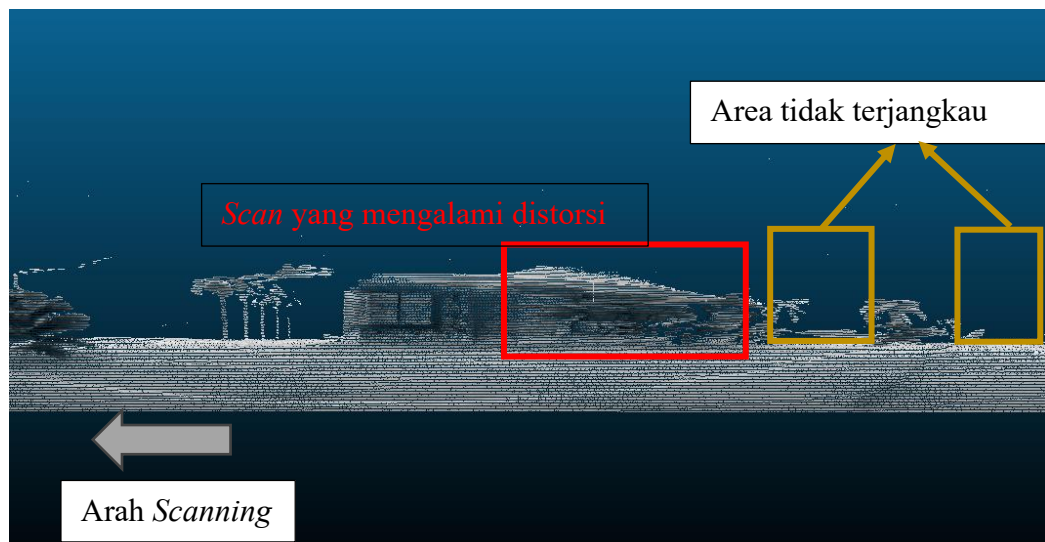
Gambar 11. Diagram alir proses pengecekan kondisi dan kemampuan alat.

Proses ini dimaksudkan untuk mengetahui bagaimana kondisi dan kemampuan alat dalam melakukan pengukuran bangunan sebagaimana penelitian ini akan dilakukan. Pengecekan kondisi dan kemampuan alat Lidar TLS100 dibagi beberapa tahapan yang dimaksudkan untuk menstrukturisasi masalah yang ada agar memudahkan proses penelitian yang dilakukan. Berikut ini adalah beberapa tahapan dan penjabaran dalam proses pengecekan kondisi dan kemampuan alat:

1. Pengecekan Orientasi *rotate scanning* Lidar TLS100

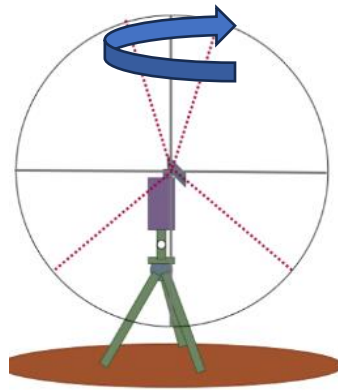
Proses pengecekan orientasi rotasi dimaksudkan untuk mengetahui dan menentukan arah rotasi yang baik digunakan dalam pengukuran bangunan. Proses ini diperlukan karena dilatar belakangi oleh masalah yang ditimbulkan akibat dari penyesuaian bacaan jarak yang kurang baik setelah melakukan *scanning* pada jarak yang tidak terjangkau oleh alat hingga terjadinya *Noise* atau distorsi dimensi yang disebabkan adanya penyesuaian bacaan jarak dan sudut pada alat.

a. Metode *scanning* rotasi horizontal



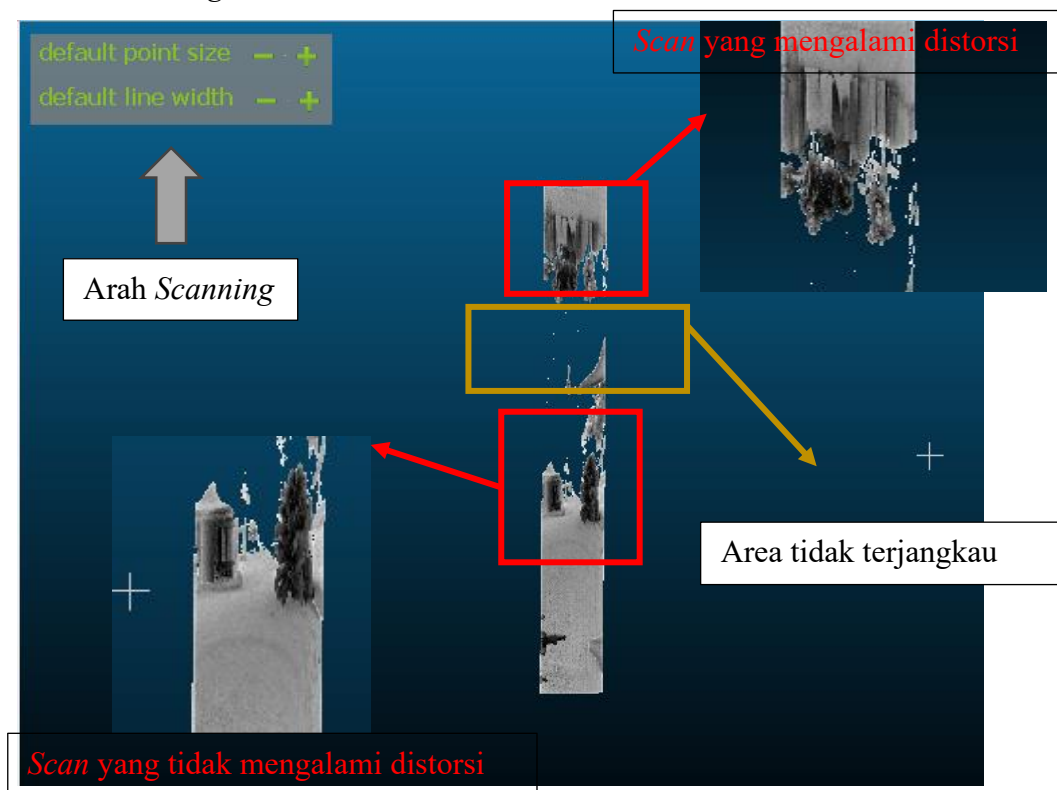
Gambar 12. Pengecekan pola distorsi pengaruh Metode *scanning* rotasi horizontal

Hasil pengukuran menggunakan metode *scanning* rotasi horizontal dengan kondisi diluar ruangan akan mengakibatkan distorsi akibat kesalahan bacaan sudut dan jarak, kesalahan tersebut akan memperngaruhi kesesuaian hasil pengukuran seperti dapat dilihat pada gambar diatas. Distorsi yang diakibatkan dari kesalahan menggunakan metode *scanning* horizontal dapat dilihat pada persegi merah yang ada pada gambar diatas, kesalahan tersebut diakibatkan ketidak mampuan Lidar dari TLS100 dalam proses sinkronisasi/penyesuaian sudut rotasi dan bacaan jarak pada saat akuisisi data.



Gambar 13. Ilustrasi Horizontal *Scanning*

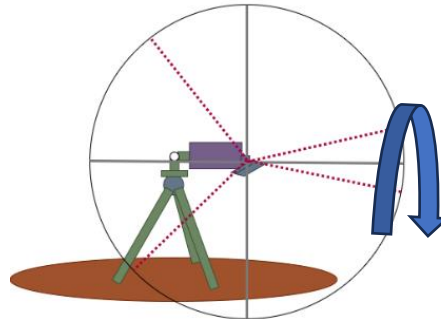
b. Metode *scanning* rotasi vertikal



Gambar 14. Pengecekan pola distorsi pengaruh Metode *scanning* rotasi vertikal

Sedangkan hasil pengukuran menggunakan metode *scanning* rotasi vertikal dengan kondisi diluar ruangan akan menghasilkan 2 (dua) kondisi hasil *scanning* yang relatif lebih baik dikarenakan hasil distorsi akibat kesalahan penyesuaian bacaan sudut dan jarak akan mudah diidentifikasi, tetapi kekurangan pada metode ini akan

menghasilkan *field of view* hasil *scanning* yang kecil yang mengakibatkan banyak titik *scanning* yang dibutuhkan dalam melakukan pengukuran.



Gambar 15. Ilustrasi Vertikal *Scanning*

Berdasarkan hasil perbandingan dua metode pemindaian rotasi, dapat disimpulkan bahwa metode pemindaian vertikal merupakan pilihan yang lebih memungkinkan untuk digunakan. Hal ini disebabkan oleh kemampuannya menghasilkan distorsi data atau kesalahan pengukuran yang lebih rendah akibat area yang tidak terdeteksi. Pemfokusan sapuan vertikal pada salah satu sisi (awal sapuan) memungkinkan pembentukan *Point cloud* yang lebih representatif dibandingkan dengan metode pemindaian rotasi horizontal, terutama ketika digunakan di lingkungan luar ruangan.

2. Pengecekan besaran sudut sapuan Lidar TLS100

Proses pengecekan besaran sudut sapuan Lidar TLS100 dapat dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak *Visual Studio Code*. Melalui fitur *inspect* pada ekstensi program *converter* yang digunakan, dapat diketahui bahwa data hasil akuisisi Lidar TLS100 terdiri atas tiga variabel utama, yaitu: variabel a (bacaan sudut horizontal alat), variabel b (bacaan sudut vertikal alat), dan variabel r (bacaan jarak dari alat ke objek). Selanjutnya, dilakukan proses komputasi berdasarkan parameter kalibrasi yang telah ditentukan, di antaranya sudut kalibrasi awal sebesar $-32,27^\circ$, sudut kalibrasi *yaw* sebesar $0,05625^\circ$, dan sudut kalibrasi *pitch* sebesar $0,135^\circ$. Gambar berikut menyajikan fungsi perhitungan yang digunakan dalam proses konversi data oleh program *converter*.

```

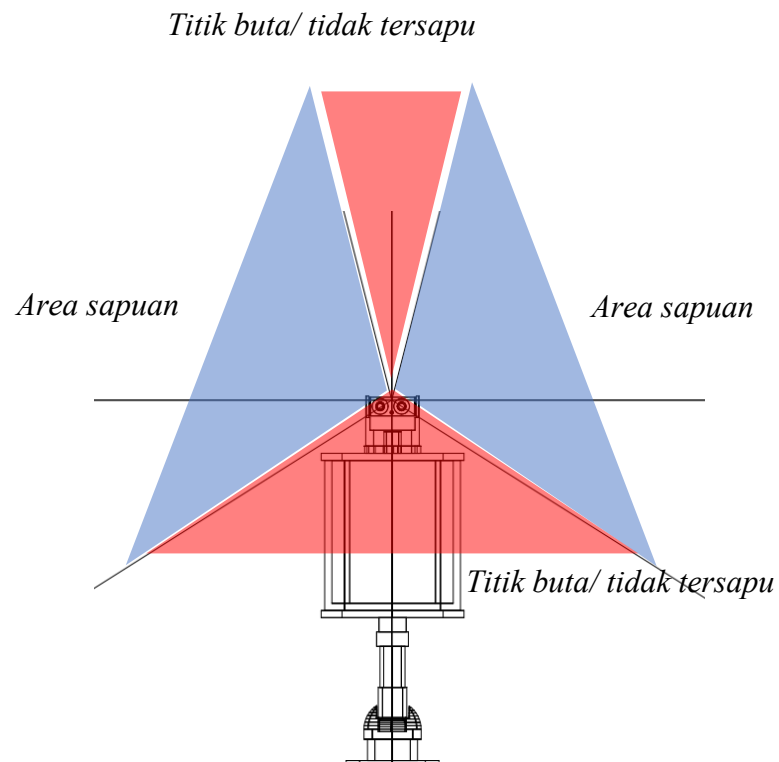
function generate(sdt, spitch, syaw) {
  var splitted = input99.split('\n');
  var kaluaran = '';
  for (i = 0; i < splitted.length - 1; i++) {
    if (splitted[i] !== '') {
      var readData = splitted[i].replace(/\\s+/g, ' ').trim();
      var a = parseInt(readData.split(' ')[0]);
      var b = parseInt(readData.split(' ')[1]);
      var r = parseInt(readData.split(' ')[2]);
      var sdt yaw = a * syaw;
      var sdt pitch = b * spitch + sdt;
      var theta = sdt yaw * 3.14159265 / 180.00;
      var phi = Math.abs(sdt pitch * 3.14159265 / 180.00);
      var x = (r - 2) * Math.cos(phi) * Math.cos(theta);
      var y = (r - 2) * Math.cos(phi) * Math.sin(theta);
      var z;
      if (sdt pitch < 0) {
        z = (r - 2) * Math.sin(phi) * (-1);
      } else {
        z = (r - 2) * Math.sin(phi);
      }
      if (isNaN(x) == false || isNaN(y) == false || isNaN(z) == false) {
        kaluaran += x.toFixed(2) + ' ' + y.toFixed(2) + ' ' + z.toFixed(2) + '\n';
      }
    }
  }
}

```

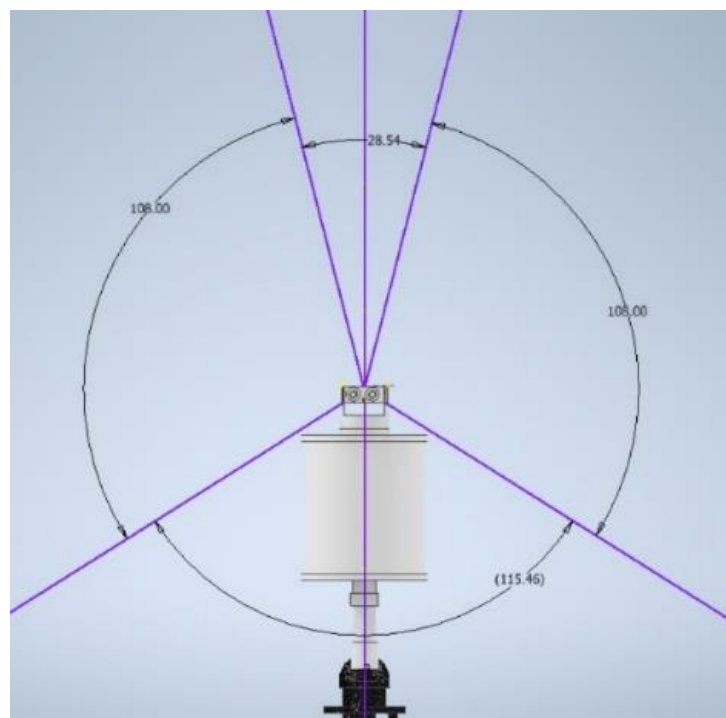
Gambar 16. Fungsi perhitungan *converter*

Berdasarkan gambar fungsi perhitungan *converter* diatas bahwa sanya dapat disimpulkan bahwa untuk menghitung sudut sapuan, sudut *blindspot* atas dan bawah menggunakan persamaan radian dimana perhitungan lingkaran dibagi dua sebesar 180 derajat, dimana dapat disimpulkan sebagai berikut sudut sapuan alat sebesar 216° , sudut *blindspot* bawah sebesar $115,46^{\circ}$, Sudut *blindspot* atas sebesar $28,54^{\circ}$.

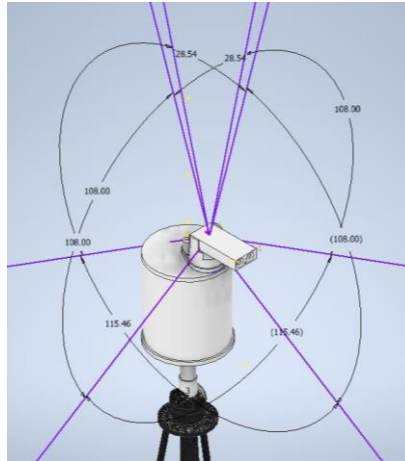
Hasil perhitungan sudut sapuan dan sudut *blindspot* bawah dan atas kemudian di visualisasikan untuk memudahkan perencanaan Akuisisi data. Sebagai mana hasil dari persamaan diatas didapatkan sudut sapuan persisi sebesar 108° , dan sudut *blindspot* bawah persisi sebesar $57,73^{\circ}$, dan besaran sudut *blindspot* atas persisi sebesar $14,27^{\circ}$ nilai ini penting untuk memastikan bahwa area yang tidak terjangkau oleh sensor dapat diantisipasi sejak tahap perencanaan, sehingga efektivitas dan kualitas hasil pemodelan 3D dapat lebih terjamin. Berikut ini adalah visualisasi sudut sapuan dan sudut *blindspot* atau titik buta dalam bentuk 2 dimensi dan 3 dimensi.



Gambar 17. Ilustrasi sapuan alat Lidar TLS100..



Gambar 18. Ilustrasi 2D Sudut limit cakupan dan *blindspot* Lidar TLS100.



Gambar 19. Ilustrasi 3D sudut sapuan, dan *blindspot* Lidar TLS100.

3. Penentuan Metode Akuisisi Data

Simpulan dari tahapan persiapan yang sudah didapat metode Akuisisi yang tepat untuk Akuisisi data *scanning* pada kondisi luar ruangan menggunakan Metode *scanning* rotasi vertikal dikarenakan metode ini dinilai sedikit menimbulkan residu pengukuran yaitu terjadinya distorsi akibat kesalahan bacaan yang ditimbulkan.

3.5. Tahap Pengumpulan Data

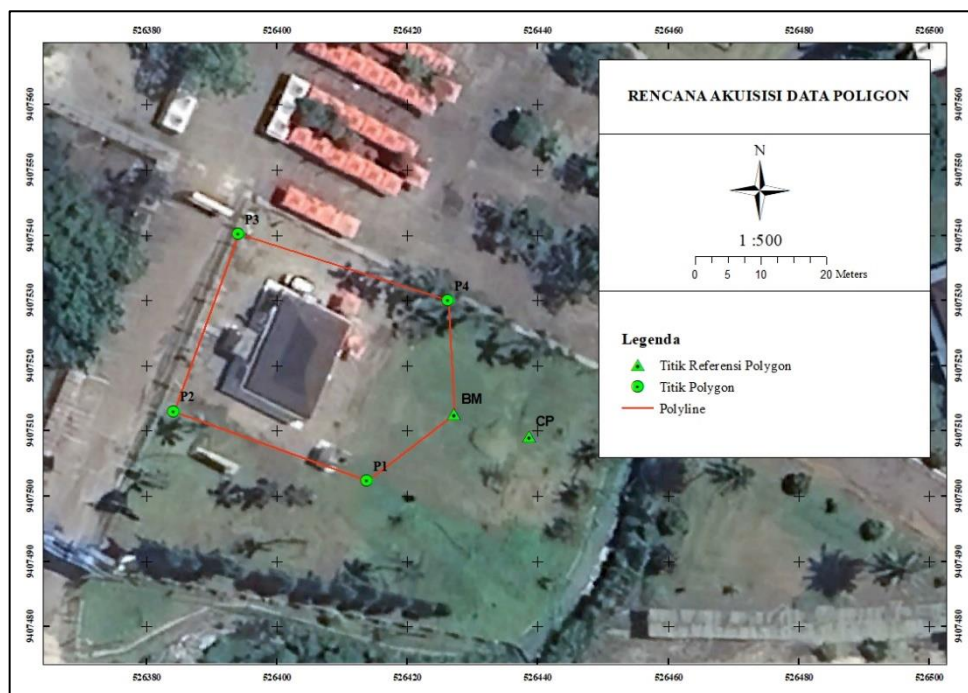
Tahap pengumpulan data pada penelitian ini terdiri dari dua kegiatan utama, yaitu pengukuran kerangka kontrol dan akuisisi data menggunakan Lidar TLS100. Kedua tahapan ini dilakukan secara berurutan untuk memastikan bahwa data yang diperoleh memiliki keterikatan yang kuat terhadap sistem koordinat dan memenuhi standar ketelitian yang dibutuhkan dalam proses pemodelan 3D. Penjelasan lebih lanjut mengenai masing-masing tahapan pengumpulan data disajikan pada sub-sub bab berikut ini.

3.5.1. Pengukuran Kerangka Kontrol

Pengukuran kerangka kontrol dilakukan untuk membentuk jaringan titik acuan yang digunakan dalam pengukuran detail bangunan dengan *Total Station*, sehingga diperoleh dimensi referensi dari objek yang diamati. Data referensi ini penting

karena akan dibandingkan dengan hasil pemodelan tiga dimensi dari *TLS100* untuk menilai tingkat ketelitian dimensi. Dengan demikian, fungsi utama kerangka kontrol dalam penelitian ini bukan untuk registrasi *Point cloud*, melainkan untuk mendukung pengukuran yang presisi sebagai pembanding hasil TLS.

Metode yang digunakan adalah poligon tertutup, yaitu jalur pengukuran yang dimulai dan diakhiri pada titik yang sama. Pemilihan metode ini memungkinkan evaluasi konsistensi dan ketelitian hasil pengukuran, baik secara horizontal (posisi) maupun vertikal (elevasi). Kerangka kontrol yang dibangun terdiri atas dua bagian, yaitu kerangka kontrol horizontal dan kerangka kontrol vertikal.



Gambar 20. Rencana Akuisisi data kerangka

1. Kerangka kontrol Horizontal

Kerangka kontrol horizontal digunakan untuk menentukan koordinat dua dimensi (X dan Y) dari titik-titik kontrol yang akan dijadikan acuan dalam pengukuran dimensi panjang dan lebar bangunan. Pengukuran dilakukan menggunakan *Total Station*, dengan mencatat sudut dan jarak antar titik dalam lintasan poligon yang mengelilingi objek bangunan.



Gambar 21. Pengukuran Kerangka kontrol Horizontal

Titik-titik kontrol ditempatkan sedemikian rupa agar menjangkau seluruh sisi bangunan dan mempertimbangkan akses, visibilitas, serta kestabilan titik. Hasil pengamatan digunakan untuk menghitung koordinat tiap titik dan dilakukan pengujian terhadap ketelitian penutupan koordinat. Koordinat dari titik-titik kontrol ini menjadi dasar pengukuran dimensi referensi di lapangan, seperti panjang sisi bangunan, jarak antar dinding, dan fitur-fitur arsitektural lainnya. Hasil pengukuran ini kemudian dibandingkan dengan hasil pemindaian TLS untuk dianalisis tingkat kedekatannya secara statistik.

2. Kerangka Vertikal

Kerangka kontrol vertikal digunakan untuk menentukan nilai ketinggian (elevasi) dari tiap titik kontrol guna mendukung pengukuran elemen bangunan secara vertikal. Dalam penelitian ini, selain pengukuran kerangka kontrol untuk proses *detailed* bangunan, juga digunakan titik-titik target atau *Ground Control Point* (GCP) untuk keperluan registrasi data TLS pada metode *Target to Target*. Namun, pada metode *Cloud to Cloud*, proses registrasi dilakukan tanpa memanfaatkan GCP, melainkan berdasarkan kesesuaian geometri antar permukaan hasil pemindaian. Melalui pengukuran kerangka kontrol horizontal dan vertikal dengan pendekatan poligon tertutup dan nivelman tertutup, diperoleh jaringan titik kontrol yang presisi dan terverifikasi. Titik-titik ini digunakan sebagai acuan dalam pengukuran dimensi

bangunan menggunakan *Total Station*, yang hasilnya akan menjadi nilai referensi dalam evaluasi ketelitian pemodelan tiga dimensi dari data TLS100. Sementara itu, GCP digunakan secara selektif hanya untuk metode registrasi *Target to Target*, dan tidak diterapkan pada *Cloud to Cloud*.

3.5.2. Pengukuran Detail Bangunan menggunakan *Total Station*

Pada penelitian ini, pengukuran detail bangunan dilakukan sebagai acuan dalam proses registrasi data *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) sekaligus sebagai tolok ukur validasi ketelitian dimensi bangunan. Hal ini bertujuan agar model 3D yang dihasilkan lebih representatif terhadap kondisi nyata. Pada tahap ini, *Ground Control Points* (GCP) diukur pada lokasi-lokasi strategis, seperti sudut bangunan dan fitur arsitektural yang mudah diidentifikasi. Mengingat pemasangan *premark* fisik pada permukaan bangunan berpotensi merusak struktur, penelitian ini menggunakan *premark* alami berupa sudut bangunan. Pemilihan sudut bangunan dipilih karena mudah diakses, stabil, dan dapat dikenali tanpa menimbulkan kerusakan pada struktur.

Titik kontrol yang diperoleh digunakan untuk pengukuran dimensi horizontal, misalnya panjang sisi bangunan dan jarak antar dinding, serta dimensi vertikal, seperti tinggi dinding dan elevasi elemen arsitektural lainnya. Hasil pengukuran tersebut berfungsi sebagai referensi utama dalam membangun model 3D yang akurat sehingga mampu menggambarkan kondisi geometri dan dimensi sebenarnya dari objek yang diteliti.

1. Persebaran GCP

Persebaran GCP dirancang agar titik kontrol tersebar merata di sekitar bangunan dan ditempatkan pada lokasi yang mudah dikenali. Titik kontrol utama ditempatkan pada sudut bangunan karena lokasi ini mudah diakses selama pengukuran dan memberikan referensi yang jelas pada hasil pemindaian.



Gambar 22. Rencana persebaran GCP pada sisi depan bangunan.

Titik GCP ditempatkan pada sudut bangunan, sudut jendela, atau elemen arsitektural lain yang stabil dan mudah dikenali. Gambar 23 menunjukkan ilustrasi persebaran titik GCP pada sisi depan bangunan.



Gambar 23. Rencana persebaran GCP pada sisi kanan bangunan.

Penempatan GCP pada sisi kanan bangunan dapat di ilustrasikan seperti pada gambar 24 diatas dimana GCP di tempatkan pada sudut bangunan. Banyak nya titik diatas merupakan ilustrasi sampel, yang tidak menunjukkan banyak nya titik yang diukur.



Gambar 24. Rencana persebaran GCP pada sisi belakang bangunan.

Titik GCP ditempatkan pada sudut sudut objek sisi belakang bangunan, seperti sudut jendela sudut bangunan. Penempatan ini mengikuti bentuk fasad yang ada pada bangunan.



Gambar 25. Rencana persebaran GCP pada sisi kiri bangunan

Penempatan GCP pada Sisi Kiri Bangunan Sama halnya dengan sisi lainnya, titik GCP pada sisi kiri bangunan ditempatkan pada sudut yang mudah dikenali dan diakses oleh alat TLS100.

Rencana persebaran GCP ini divisualisasikan seperti melalui gambar-gambar ilustrasi sebelumnya, yang menunjukkan lokasi setiap titik GCP pada sudut-sudut

bangunan yang berbeda. Visualisasi Rencana Sampel Persebaran GCP ini akan memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai persebaran titik kontrol yang digunakan untuk registrasi dan validasi data.

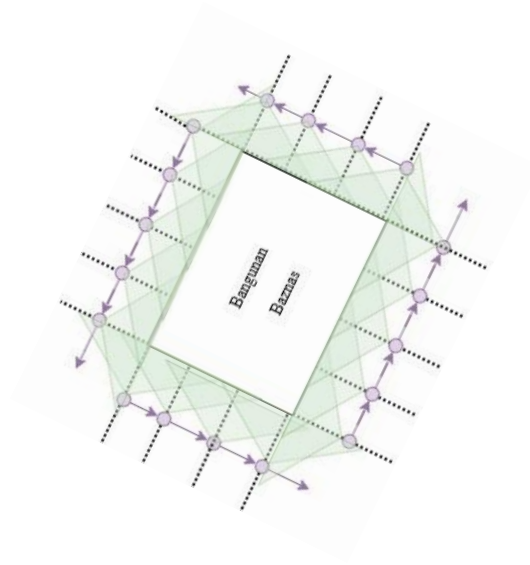
3.5.3. Akuisisi Data Lidar TLS100

Proses akuisisi data dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan satu variasi jarak, yaitu pada jarak 8 meter dari objek bangunan yang dilakukan pada setiap sisi bangunan. Jarak ini dihitung dari bagian terluar bangunan menuju ke posisi alat TLS100 yang ditempatkan secara statis di lapangan.



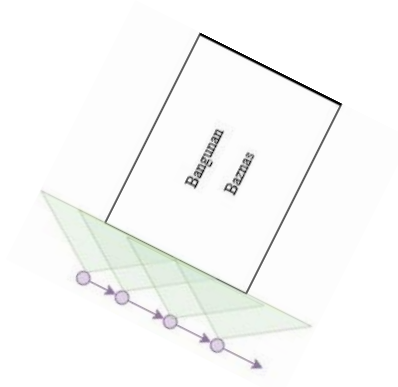
Gambar 26. Rencana akuisisi data TLS100

Seperti dapat dilihat pada gambar rencana Akuisisi diatas, dengan rentang jarak *scanning* sebesar 8 meter dengan kerapatan sebesar 2,5 meter. Proses *scanning* yang dilakukan pada setiap posisi penempatan alat TLS100 dilakukan satu kali proses pemindaian dengan menggunakan metode *scanning* rotasi vertikal guna meminimalisir adanya distorsi pada bangunan yang dilakukan pengukuran.



Gambar 27. Ilustrasi Akuisisi jarak 8 meter *full area scanning*

Proses pemindaian dilakukan dengan kondisi alat seperti gambar 28 dimana posisi kepala *scanner* di arahkan seperti pada arah panah. Setiap sisi dilakukan dengan arah *head scanner* yang sama.



Gambar 28. Ilustrasi Akuisisi jarak 8 meter satu sisi *area scanning*

Contoh penempatan titik posisi *scanner* yang ditunjukkan pada gambar 29 diatas yaitu berupa titik posisi ditunjukkan dengan *point* berwarna abu abu dengan ditambahkan arah vektor sebagai menunjukan arah bagian *head scanner* (kepala pemindai) di arahkan, dan area yang berwarna hijau abu abu merupakan ilustrasi dari area cakupan alat yang bertumpang tindih.

3.6. Tahap Pengolahan Data

Pada tahapan pengolahan data seluruh data hasil dari Akuisisi dilakukan proses pengolahan. Pengolahan data Lidar TLS100. Pengolahan data dimulai dengan *Segmentasi*, Pewarnaan *Point cloud*, dan registrasi data *Point cloud* TLS guna mendapatkan data hasil yang baik. Pada tahapan Pengolahan data hasil *scanning* menggunakan Lidar TLS100 dapat dilihat pada sub-sub bab sebagai berikut.

3.6.1. Proses Kalibrasi *Point cloud*

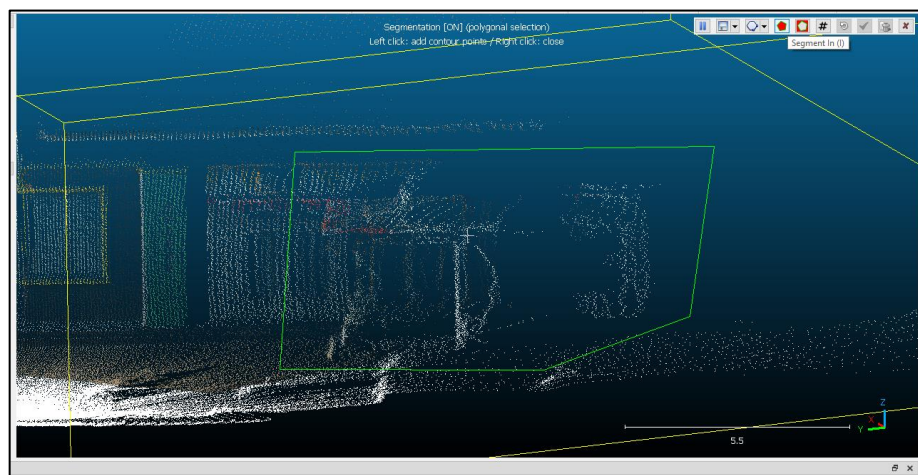
Proses kalibrasi *Point cloud* dilakukan untuk mengubah data mentah hasil akuisisi TLS100 yang terdiri atas indeks sudut horizontal (*yaw*), indeks sudut vertikal (*pitch*), dan jarak (*range*) menjadi koordinat spasial tiga dimensi dalam sistem kartesian lokal (X, Y, Z). Konversi ini dilaksanakan secara 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 yang akurat.

Seperti dapat dilihat pada *javascript* Lampiran C menunjukkan bagaimana data mentah yang terdiri atas indeks *yaw* (a), *pitch* (b), dan jarak (*range/r*) dikonversi menjadi koordinat tiga dimensi dalam sistem kartesian lokal. Nilai *yaw* dan *pitch* dihitung dengan mengalikan indeks terhadap perubahan sudut per langkah, lalu dikoreksi menggunakan sudut awal (*offset*). Sudut tersebut kemudian dikonversi ke dalam radian untuk keperluan perhitungan trigonometri. Koordinat X dan Y dihitung dengan fungsi kosinus, sedangkan Z dihitung menggunakan fungsi sinus terhadap *pitch*. Nilai jarak dikurangi dua satuan untuk mengoreksi kesalahan sistematis, dan semua koordinat dibagi 100 agar satuannya menjadi meter. Nilai Z disesuaikan agar tetap konsisten secara spasial, yaitu negatif jika *pitch* mengarah ke bawah.

Fungsi tersebut juga mevalidasi keluaran agar hanya memproses titik dengan koordinat yang sah. Hasil dari proses ini berupa *Point cloud* yang telah terkalibrasi dan siap digunakan dalam tahap registrasi dan pemodelan. Kalibrasi ini penting karena menentukan ketelitian bentuk objek dalam model tiga dimensi. Setiap titik mencerminkan posisi geometris nyata berdasarkan sudut pemindaian dan jarak terhadap permukaan objek, sehingga menjadi dasar yang kuat untuk analisis lanjutan.

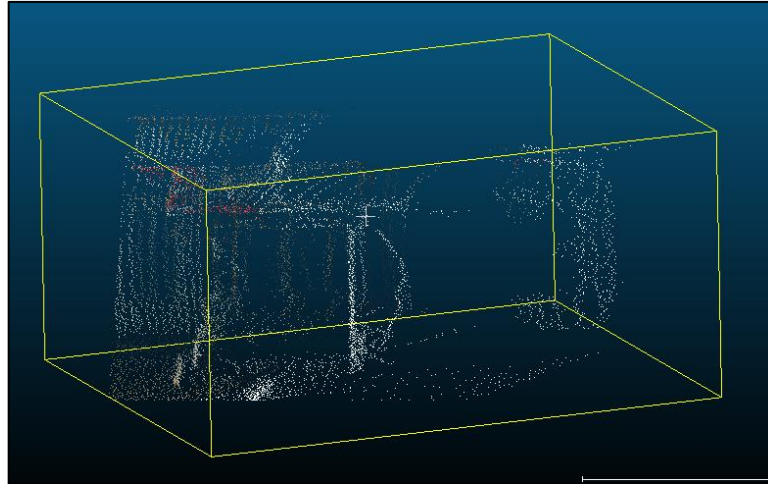
3.6.2. Proses *Segmentasi Point cloud*

Proses segmentasi *Point cloud* merupakan pemisahan data ke dalam kelompok berdasarkan karakteristik tertentu untuk memudahkan analisis. Segmentasi ini juga mendukung eliminasi data yang tidak diperlukan secara manual atau mengidentifikasi secara mandiri titik yang tidak diinginkan (*noise*). Berikut disajikan proses segmentasi yang dilakukan dalam penelitian ini.



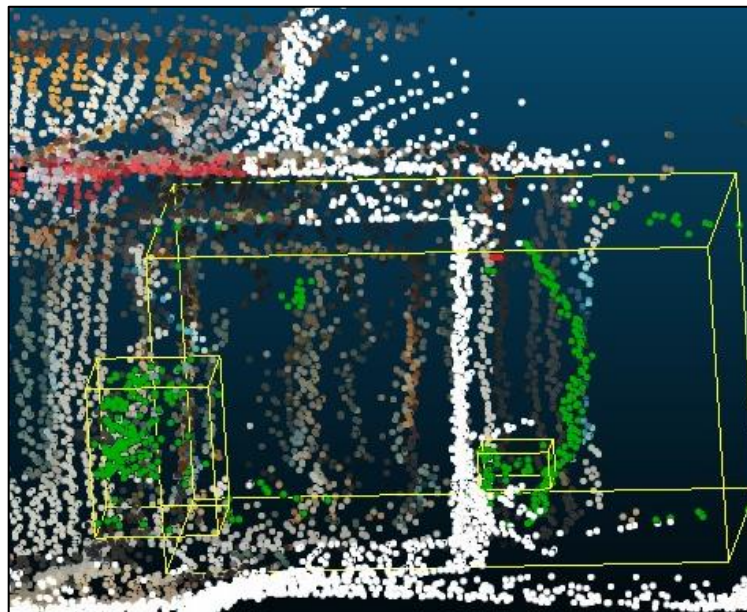
Gambar 29. Proses pemisahan *Segment Point cloud* yang teridentifikasi terdapat *Noise*.

Pada tahap awal proses pembersihan data, dilakukan identifikasi terhadap bagian-bagian *Point cloud* yang secara visual dan statistik menunjukkan indikasi adanya *Noise*, seperti sebaran titik yang tidak sesuai dengan struktur permukaan objek sebenarnya.



Gambar 30. *Segment* data yang teridentifikasi terdapat *Noise*.

Gambar 30 memperlihatkan hasil dari proses *Segmentasi*, di mana titik-titik yang telah diidentifikasi sebagai *Noise* ditampilkan secara terpisah dari dataset utama. *Segment* ini umumnya berisi titik-titik yang tersebar secara acak di luar batas permukaan bangunan, melayang di udara, menembus permukaan, atau terletak pada sudut-sudut sempit yang sulit dijangkau sensor. Tampilan ini mempermudah pengguna dalam melakukan evaluasi terhadap kualitas data hasil pemindaian dan memberikan dasar untuk melakukan proses eliminasi lanjutan guna menghilangkan data yang tidak akurat.



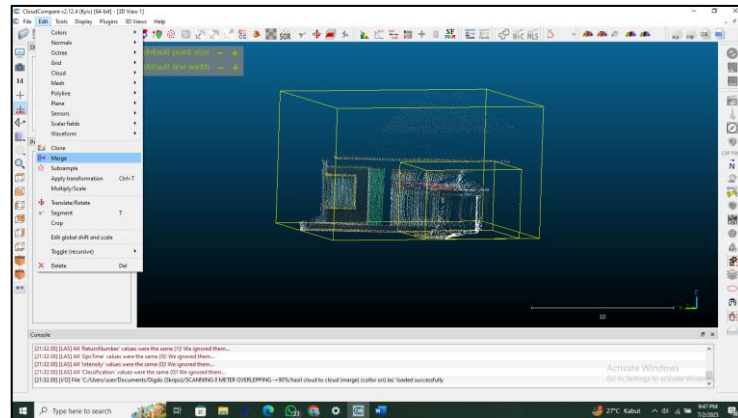
Gambar 31. Proses segmentasi untuk memisahkan *Noise*.

Setelah *Segment* yang mengandung *Noise* berhasil dipisahkan, langkah selanjutnya adalah melakukan eliminasi terhadap data tersebut. Gambar 31 menunjukkan proses eliminasi yang dilakukan untuk menghapus titik-titik yang teridentifikasi sebagai *Noise* yang dipisahkan dan diberi tanda warna hijau didalam kubus batas seperti dapat dilihat pada gambar 31 diatas. Proses Pemisahan titik *noise* ini dilakukan secara manual melalui perangkat lunak pengolah *Point cloud* untuk memastikan bahwa hanya titik-titik yang benar-benar tidak relevan yang dihapus, tanpa mengganggu struktur data utama yang valid dengan menggunakan *tool segment* pada *software*.



Gambar 32. *Segment* data yang sudah bersih dari *point noise*.

Titik-titik *Noise* yang sebelumnya tersebar acak telah berhasil dihapus, menyisakan data yang lebih bersih dan representatif terhadap bentuk asli objek. Hasil ini menunjukkan efektivitas tahapan pembersihan data dalam meningkatkan kualitas visual dan akurasi dimensi *Planimetrik* dari *Point cloud* bangunan. *Segment* yang telah dieliminasi dari titik *noise* ini kemudian siap untuk digunakan kembali sebagai bagian dari dataset model akhir.



Gambar 33. Proses Penggabungan kembali *Segment* yang sudah difilterisasi ke data set *Point cloud scen*.

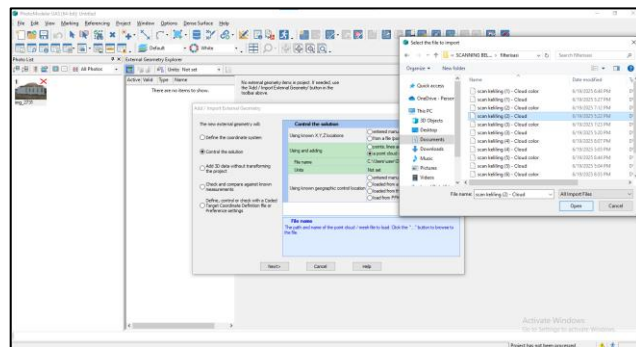
Setelah proses eliminasi *noise* selesai, *Segment* dari *Point cloud* yang telah dibersihkan kemudian digabungkan kembali ke dalam keseluruhan *scan Point cloud*. Gambar diatas memperlihatkan proses *re-integrasi Segment* tersebut ke dalam dataset utama dengan menggunakan *tool (marge)* tahapan ini penting dilakukan untuk menyatukan kembali komponen-komponen data yang valid ke dalam satu kesatuan model utuh, sehingga seluruh bagian objek dapat direpresentasikan dengan akurat tanpa gangguan dari titik-titik *Noise*. Hasil akhir dari penggabungan ini akan menjadi dasar dalam tahapan visualisasi model 3D, pengukuran dimensi, maupun analisis lebih lanjut terhadap bentuk bangunan yang dipindai.

3.6.3. Proses Pewarnaan *Point cloud*

Pada penelitian ini, 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. Adapun tahapan pewarnaan secara umum terdiri dari beberapa langkah berikut:

1. Data *Point cloud*

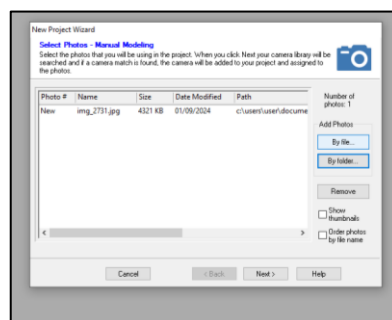
Point cloud yang telah dihasilkan dari proses akuisisi dan registrasi awal di *import* ke dalam perangkat lunak *PhotoModeler*. Data *Point cloud* ini merupakan hasil pemindaian dari beberapa titik pemindaian yang tersebar merata mengelilingi bangunan dengan orientasi vertikal *scanning*. File *Point cloud* yang digunakan memiliki format umum seperti *.xyz* atau *.las*.



Gambar 34. *Import Data Point cloud* untuk proses pewarnaan

2. Citra Foto RGB

Foto-foto RGB yang diambil dari kamera digital selama proses pengambilan data di lapangan di *import* ke dalam perangkat lunak. Foto-foto ini harus memperlihatkan bagian bangunan yang juga dipindai oleh TLS100, sehingga proses proyeksi warna dapat dilakukan dengan akurat.

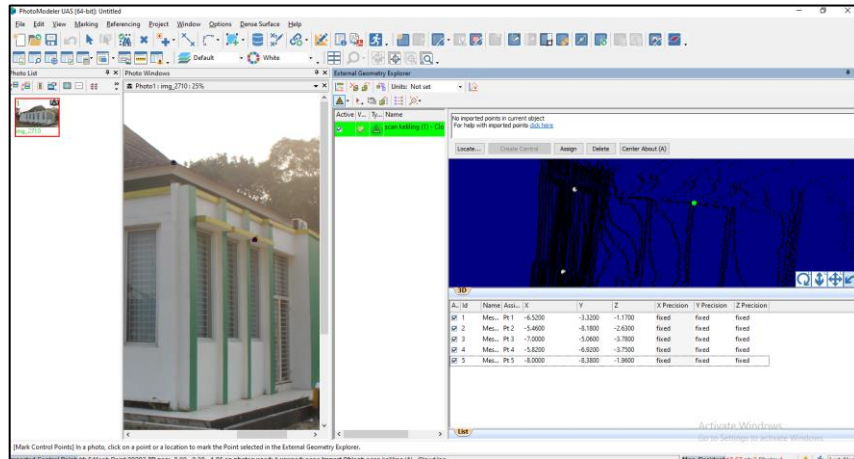


Gambar 35. *Import foto* untuk pewarnaan *Point cloud*

3. Orientasi Gambar

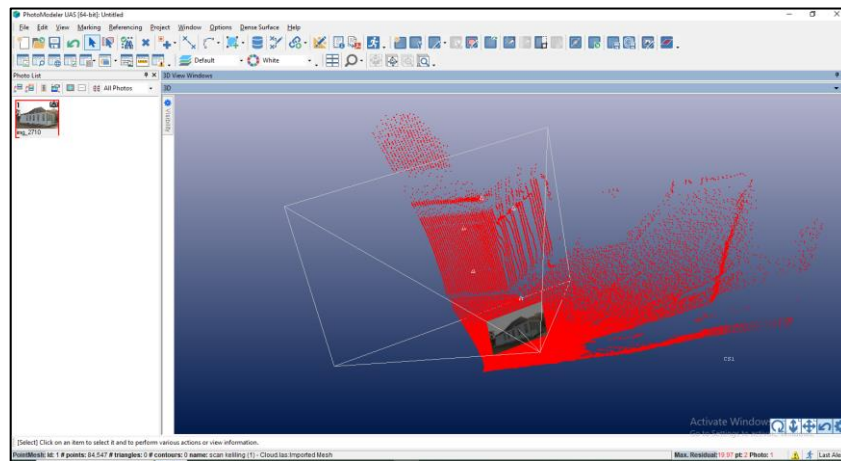
Sebelum melakukan proyeksi warna, dilakukan kalibrasi kamera untuk mendapatkan parameter intrinsik (fokus lensa, dsb.) dan ekstrinsik (posisi dan

orientasi kamera). Kalibrasi ini penting untuk memastikan bahwa sistem kamera dapat digunakan secara tepat dalam memetakan warna ke titik-titik *Point cloud*.



Gambar 36. Proses penyelarasan posisi foto dengan *Point cloud*

Proses ini melibatkan *Point cloud* dan gambar dengan menyelaraskan bentuk objek pada gambar dan *Point cloud*. Seperti pada gambar diatas, seluruh proses penyelarasan pada proses ini dilakukan dengan pemilihan *point* referensi dan *point align* secara manual satu persatu pada gambar dan *Point cloud*.



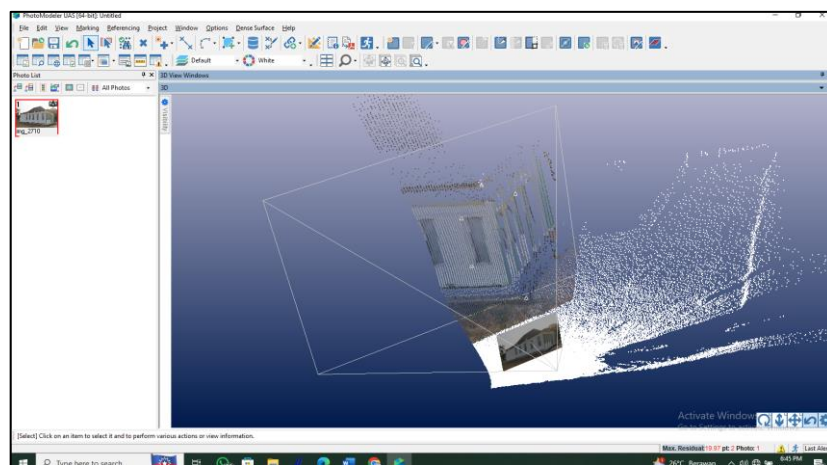
Gambar 37. Reorientasi *Image* terhadap *point cloud*

Setelah Proses penyelarasan Gambar dengan *Point cloud*. Gambar akan secara otomatis terorientasi dan akan menampilkan area *Point cloud* yang akan terwarnai oleh gambar. Proses ini dimaksudkan untuk memasukan *value* dari *digital number*

color (R,G,B) ke *Point cloud* sesuai dengan arah atau area yang telah di selaraskan dengan Gambar.

4. Hasil Proyeksi Warna

Setelah posisi kamera dan parameter kalibrasi ditentukan, dilakukan proses *color projection*, yaitu pemetaan nilai warna RGB dari citra ke titik-titik *Point cloud*. Setiap titik akan menerima nilai warna berdasarkan piksel foto yang berada dalam arah pandangnya, sesuai hasil proyeksi perspektif kamera.



Gambar 38. Contoh Hasil *Point cloud* yang sudah melalui proses pewarnaan

Hasil akhir dari proses ini adalah *Point cloud* berwarna (*colored Point cloud*), di mana tiap titik memiliki informasi koordinat (X, Y, Z) serta nilai warna (R, G, B). *Point cloud* berwarna ini tidak digunakan untuk pengukuran dimensi, melainkan hanya untuk mempermudah visualisasi dan interpretasi objek secara kasat mata.

3.6.4. 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 kontrol (*Target to Target*), untuk

mengevaluasi pengaruh pendekatan registrasi terhadap ketelitian hasil pemodelan bangunan (Reshetyuk, 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, 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.

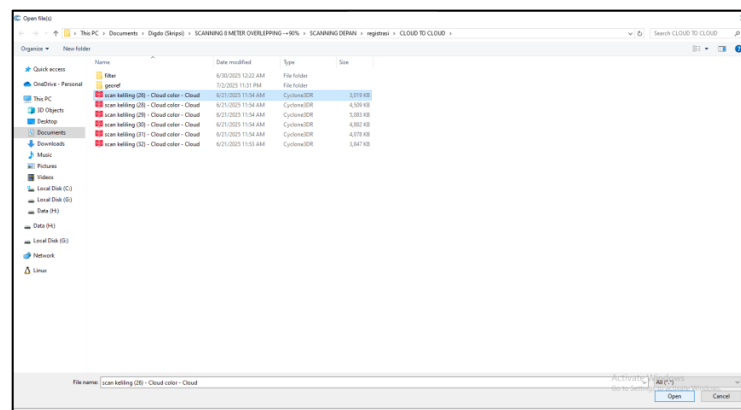
a. Proses Registrasi Antar Awan Titik (*Cloud to Cloud*)

Registrasi *Cloud to Cloud* (C2C) dilakukan dengan menyatukan data *Point cloud* hasil pemindaian bangunan Kantor BAZNAS ke dalam satu sistem koordinat. Proses ini memanfaatkan area tumpang tindih (*overlap*) antar data sebagai dasar penyelarasan dan dilakukan secara otomatis menggunakan fitur *Align* pada perangkat lunak *CloudCompare*. Metode ini bekerja dengan menyelaraskan bentuk permukaan bangunan dari beberapa posisi pemindaian menggunakan algoritma *Iterative Closest Point* (ICP). Hasil registrasi kemudian dievaluasi melalui nilai

Root Mean Square (RMS) error dan *Final Overlap*, sehingga diperoleh *Point cloud* yang terintegrasi dan siap digunakan untuk pemodelan 3D. Adapun langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

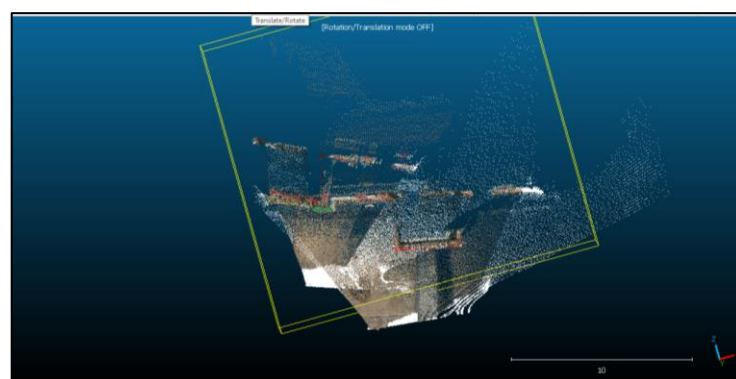
1. Penyesuaian Awal Data

Tahap awal melibatkan pemuatan (*import*) data *Point cloud* ke dalam *CloudCompare* dan dilanjutkan dengan pendekatan transformasi awal secara manual.



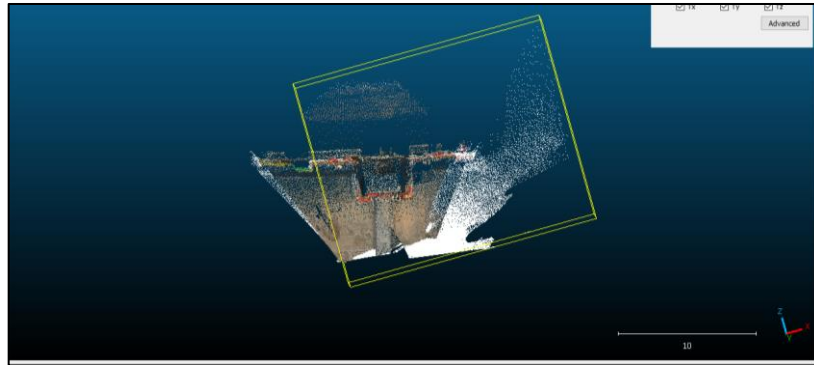
Gambar 39. Impor data yang akan dilakukan registrasi *Cloud to Cloud*

Proses pemuatan dua set data *Point cloud* hasil pemindaian dari dua posisi berbeda. Kedua dataset perlu dimuat secara terpisah untuk kemudian diselaraskan satu sama lain. Tahap ini menjadi awal dari keseluruhan proses registrasi.



Gambar 40. Proses pendekatan rotasi secara manual agar memudahkan proses registrasi

Proses rotasi awal yang dilakukan secara manual untuk mendekatkan orientasi kedua dataset. Pendekatan ini bertujuan agar algoritma ICP dapat bekerja lebih efektif dan lebih cepat. Proses ini penting terutama jika orientasi awal antar data berbeda cukup signifikan.

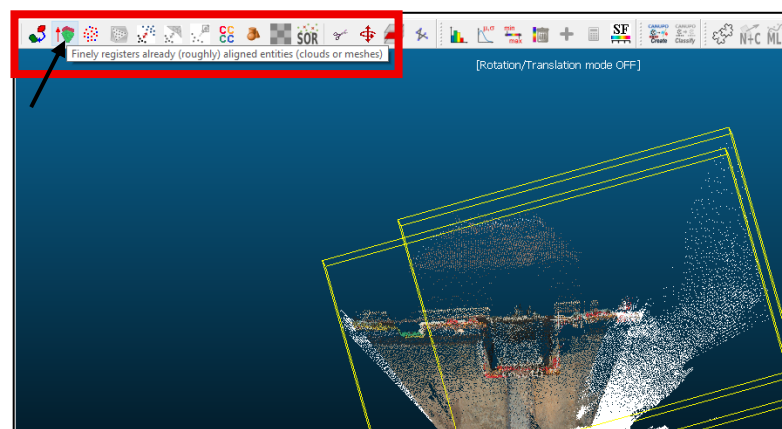


Gambar 41. Visualisasi hasil pendekatan rotasi antara dua set *Point cloud*

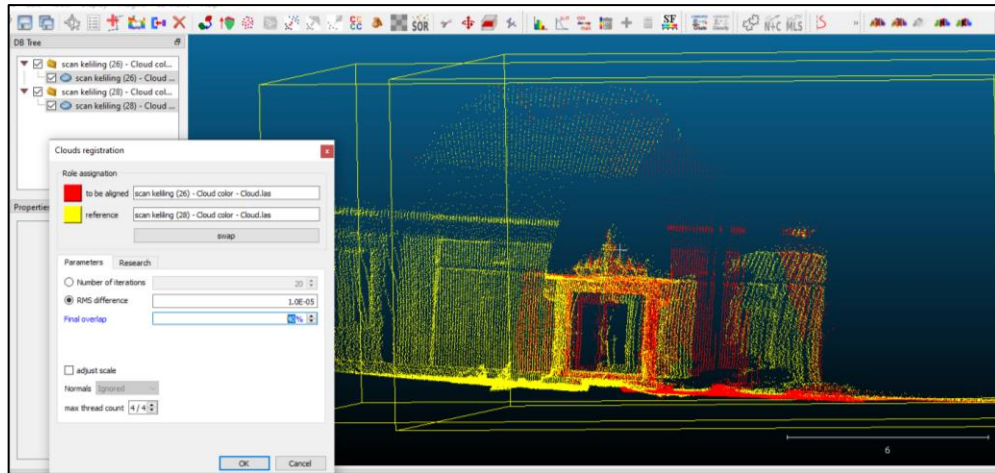
Gambar diatas memperlihatkan dua dataset yang telah didekatkan orientasinya secara visual. Penyelarasan awal ini belum presisi namun cukup untuk menjadi dasar algoritma registrasi otomatis.

2. Registrasi otomatis *Cloud to Cloud*

Registrasi dilakukan dengan fitur (*tool*) khusus dalam *CloudCompare* yang mengimplementasikan algoritma *Iterative Closest Point* (ICP) untuk menyelaraskan dua permukaan awan titik.



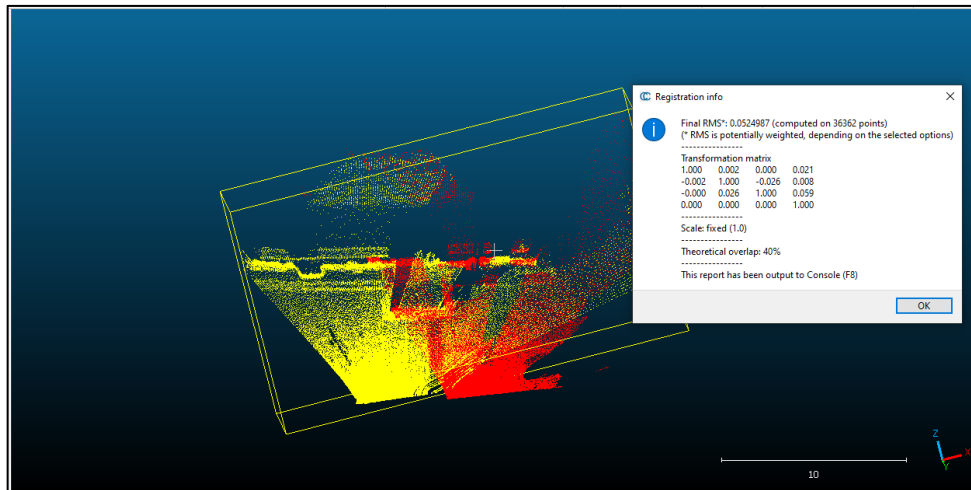
Gambar 42. Regsitras menggunakan *tool Finely registers already (roughly) aligned entities (clouds or meshes)*



Gambar 43. Proses Registrasi *cloud to cloud*, kuning berarti *cloud* referensi dan merah berarti *cloud* yang akan di translasi.

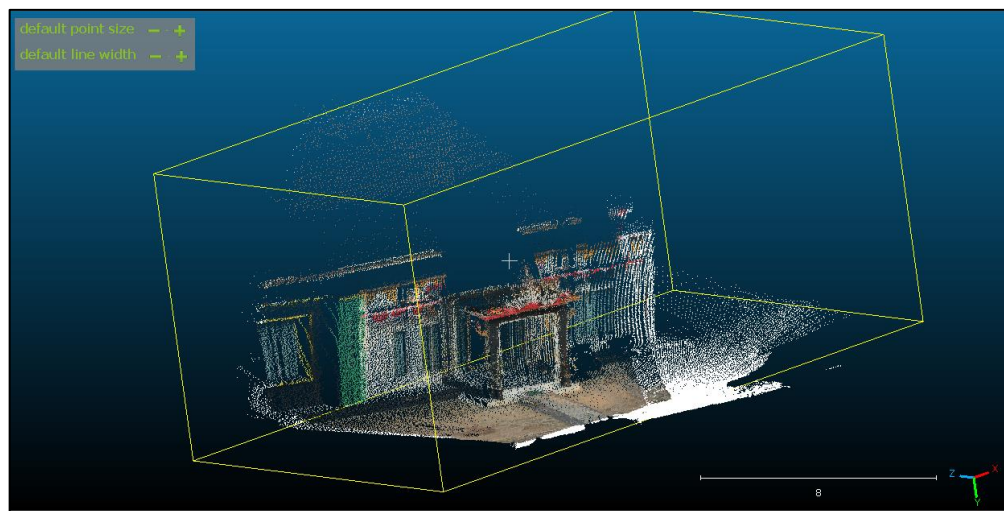
Gambar diatas memperlihatkan dua awan titik yang sedang diproses: warna kuning mewakili dataset referensi, sedangkan warna merah adalah dataset yang akan ditranslasikan. Warna yang berbeda memudahkan dalam membedakan peran masing-masing dataset dalam proses ICP. Tahap ini merupakan inti dari proses penyelarasan otomatis, dalam registrasi *Cloud to Cloud*, parameter *Number of Iterations/RMS Difference* berfungsi mengontrol proses penyelarasan dengan menurunkan kesalahan registrasi secara bertahap pada tiap iterasi.

Proses ini dapat dihentikan otomatis berdasarkan jumlah iterasi maksimum atau ambang RMS tertentu. Semakin kecil ambang RMS, hasil registrasi semakin presisi, meskipun membutuhkan waktu lebih lama. Namun, nilai yang terlalu kecil tidak disarankan karena mendekati batas akurasi komputasi *CloudCompare*. Sementara itu, parameter *Final Overlap* menentukan persentase area yang benar-benar tumpang tindih antara *Point cloud* dengan referensi. Pengaturan ini penting saat data memiliki *overlap* terbatas (sekitar 30% atau kurang), sehingga proses registrasi tetap dapat berlangsung efektif meskipun cakupan tumpang tindih tidak besar (Reshetyuk, 2009a).



Gambar 44. Hasil Regsitrasi *Cloud to Cloud*. diperlihatkan melalui RMS hasil translasi

Gambar ini menunjukkan hasil akhir dari proses ICP dalam bentuk nilai RMS (*Root Mean Square*). Nilai RMS digunakan untuk mengukur tingkat kecocokan atau akurasi registrasi antar awan titik. Semakin kecil nilai RMS, maka semakin baik hasil penyelarasan antar dataset.



Gambar 45. Visualisasi Dua data set *Point cloud* yang telah di registrasi

Hasil akhir berupa dua dataset *Point cloud* yang telah terselaraskan secara menyeluruh. Tidak tampak adanya pergeseran atau tumpang tindih signifikan, menandakan proses registrasi berjalan dengan baik. Hasil ini menunjukkan efektifitas metode *Cloud to Cloud* dalam menggabungkan data dari berbagai sudut pemindaian tanpa titik kontrol fisik.

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). 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:

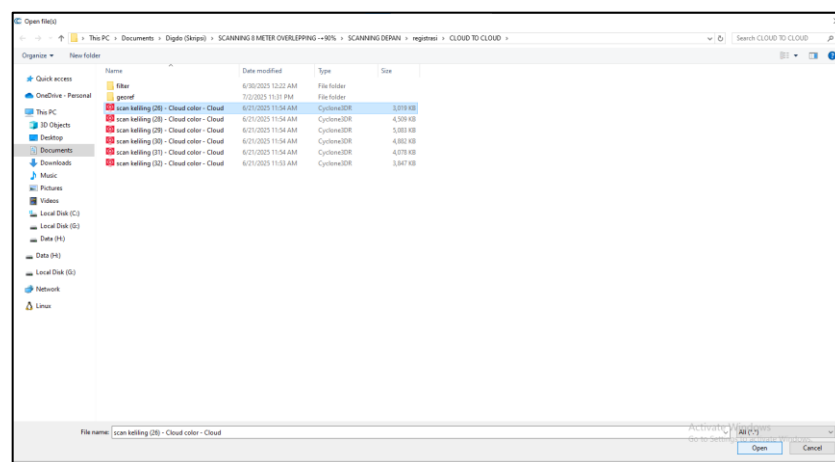
1. Awan Titik Telah Diberi Warna (Berbasis Citra/Gambar) Data hasil pemindaian perlu dilengkapi dengan informasi warna dari hasil dokumentasi foto agar memudahkan proses identifikasi visual titik referensi.
2. Registrasi Mengacu pada Titik Kontrol Tanah (GCP) Proses ini dilakukan dengan mencocokkan posisi 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 sebelumnya menggunakan *Total Station*. Titik kontrol tersebut berperan sebagai acuan utama dalam proses penyalarsan *Point cloud*, karena posisinya telah terikat pada sistem koordinat hasil pengukuran *terrestris*. Dengan demikian, registrasi dapat menghasilkan data *Point cloud* yang tidak hanya konsisten secara internal, tetapi juga terhubung dengan sistem koordinat yang lebih presisi.

Proses registrasi dilakukan dengan mencocokkan titik-titik kontrol yang teridentifikasi pada hasil pemindaian TLS dengan koordinat yang diperoleh dari *Total Station*. Tahapan ini meliputi pemilihan titik kontrol yang jelas dan mudah dikenali pada permukaan bangunan, pemetaan titik pada *Point cloud* sesuai hasil pengukuran, serta penerapan transformasi geometris untuk menyesuaikan kedua dataset. Evaluasi kualitas registrasi dilakukan dengan mengamati nilai residu atau selisih koordinat antara titik hasil registrasi dengan titik referensi, sehingga dapat diketahui tingkat ketelitian penyalarsan yang dicapai melalui metode *Target to Target*. Langkah-langkah dalam proses ini meliputi:

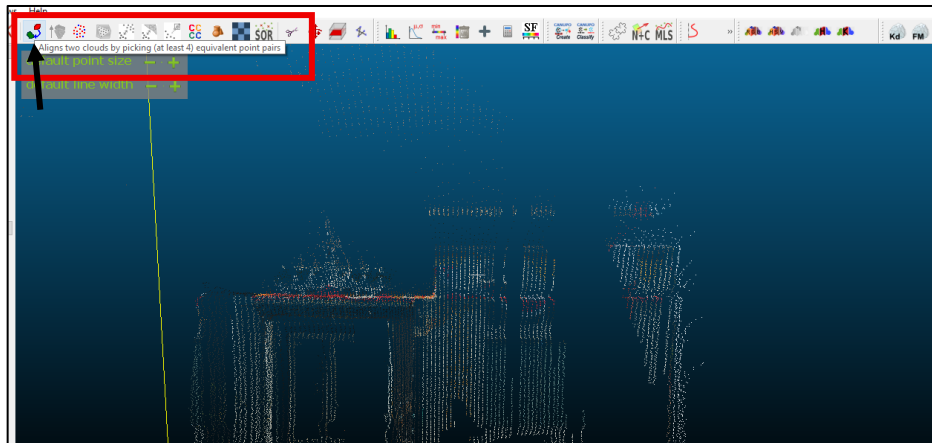
1. *Import Data Awan Titik dan Titik GCP*

Langkah pertama adalah mengimpor data awan titik dari alat TLS100 dan data GCP hasil pengukuran ke dalam perangkat lunak *CloudCompare*.



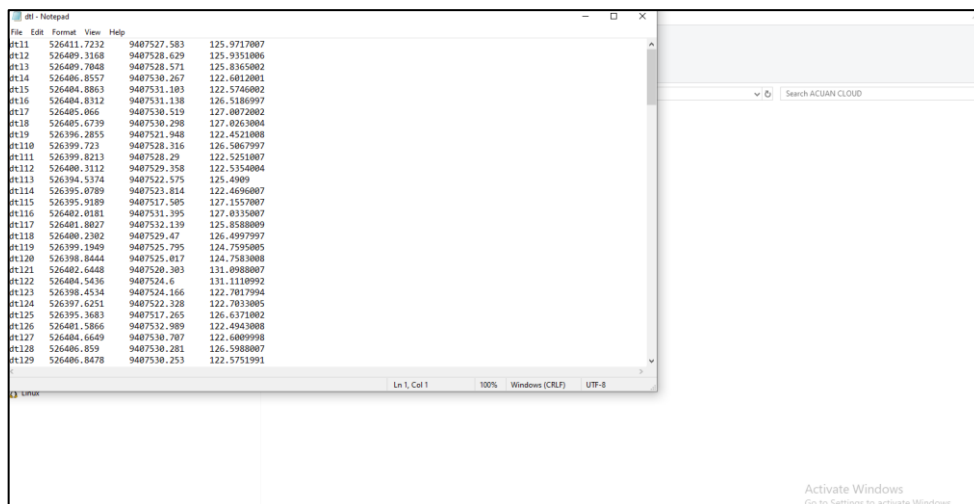
Gambar 46. Proses *Import* data *Point cloud* yang akan di registrasi

Gambar 46 diatas menunjukkan proses awal pemuatan data hasil pemindaian TLS100 ke dalam perangkat lunak *CloudCompare*. Proses ini merupakan tahap penting sebelum dilakukan penyelarasan titik. Data *Point cloud* dimuat secara utuh untuk kemudian dianalisis dan diolah lebih lanjut.



Gambar 47. Tampilan data yang telah di *import*

Hasil pemindaian dari TLS100 yang telah di kalibrasi dimuat dalam *CloudCompare*. Gambar diatas merupakan Visualisasi kondisi data awan titik setelah berhasil di *import*. Seluruh titik dari satu posisi pemindaian terlihat dengan jelas. Hal ini memudahkan proses identifikasi dan pemilihan titik referensi selanjutnya.

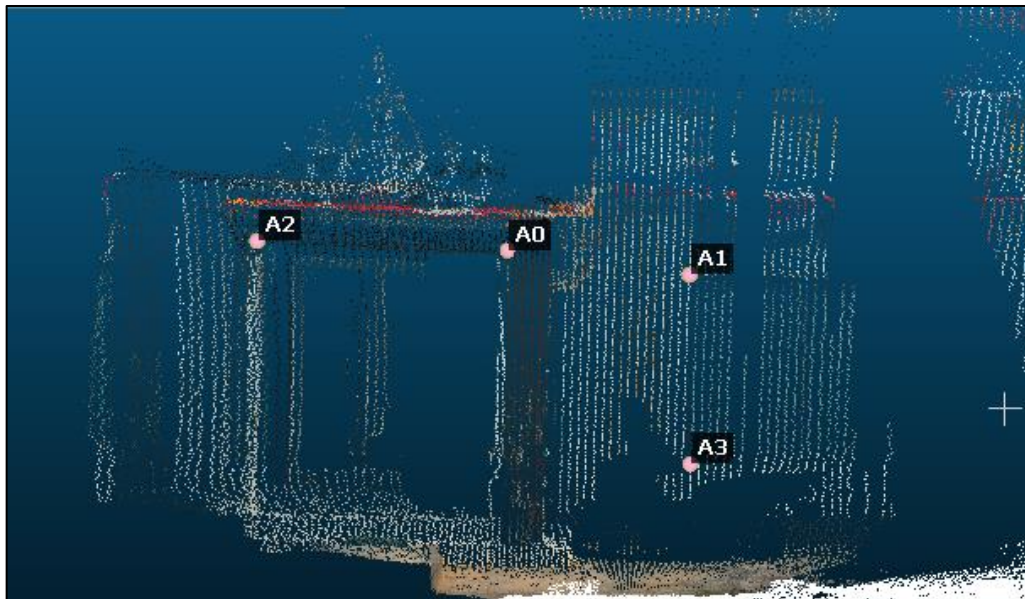


Gambar 48. Data GCP yang digunakan sebagai referensi registrasi

Hasil pengukuran dengan *Total Station* yang akan digunakan sebagai referensi utama registrasi. Titik-titik ini menjadi acuan untuk menyelaraskan posisi pindaian.

2. Identifikasi Titik-Titik Registrasi

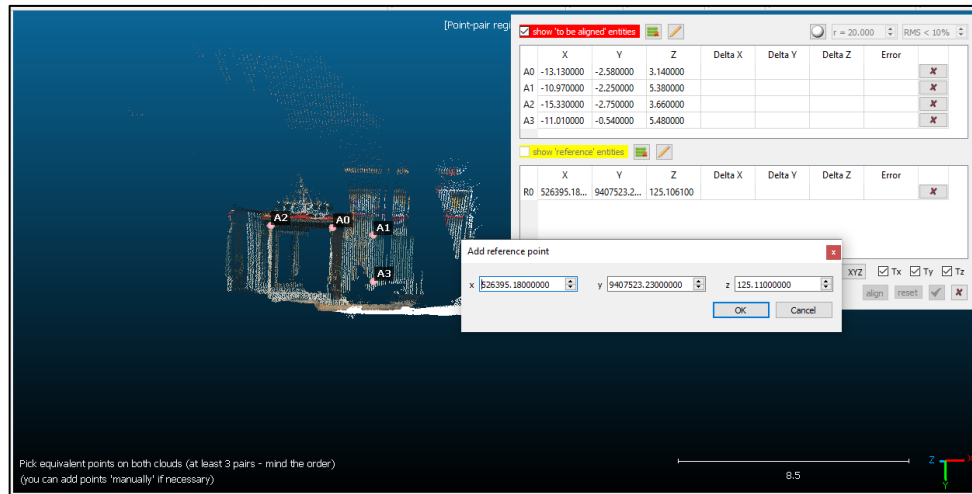
Selanjutnya, titik-titik registrasi pada permukaan bangunan diidentifikasi dan dipilih secara manual berdasarkan kesesuaian visual dengan titik GCP dilapangan.



Gambar 49. Proses pemilihan titik *align* yang akan di translasikan ke titik referensi

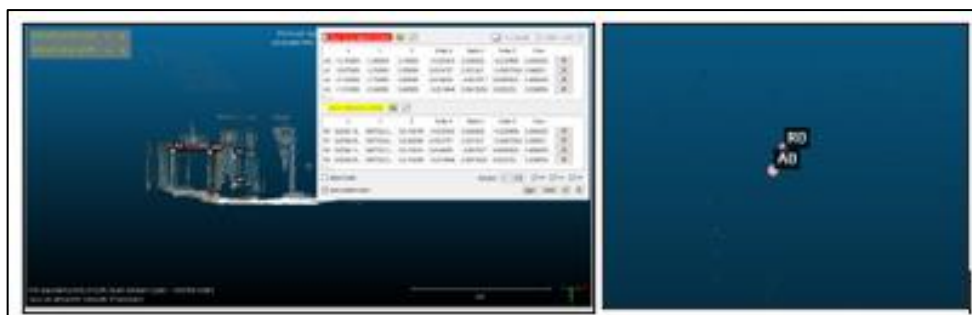
Pemilihan titik dilakukan secara manual dengan mencocokkan bentuk dan posisi visual objek bangunan. Minimal empat pasang titik yang ekuivalen diperlukan untuk proses translasi. Pemilihan titik dilakukan secara manual menggunakan *tool Aligns two clouds by picking (at least 4) equivalent point pairs*.

Proses ini dilakukan menggunakan dengan memanfaatkan lima pasangan titik (A0–A4 dan R0–R4) yang dipilih secara visual berdasarkan bentuk dan warna dari hasil pemindaian. Titik-titik tersebut diambil dari fasad alami bangunan, bukan dari target buatan seperti *Premark*, karena keterbatasan identifikasi akibat rendahnya kerapatan data pada satu posisi pemindaian, dan *Premark* dapat merusak bangunan.



Gambar 50. Proses memasukan koordinat Referensi sesuai dengan penomoran *point align*

Gambar ini menggambarkan tahap input koordinat referensi yang sesuai dengan titik-titik yang telah dipilih pada *Point cloud*. Penomoran titik dijaga konsisten agar tidak terjadi kesalahan translasi antara titik acuan dan titik hasil pemindaian. Langkah ini merupakan bagian penting dalam memastikan proses dilakukan secara tepat.

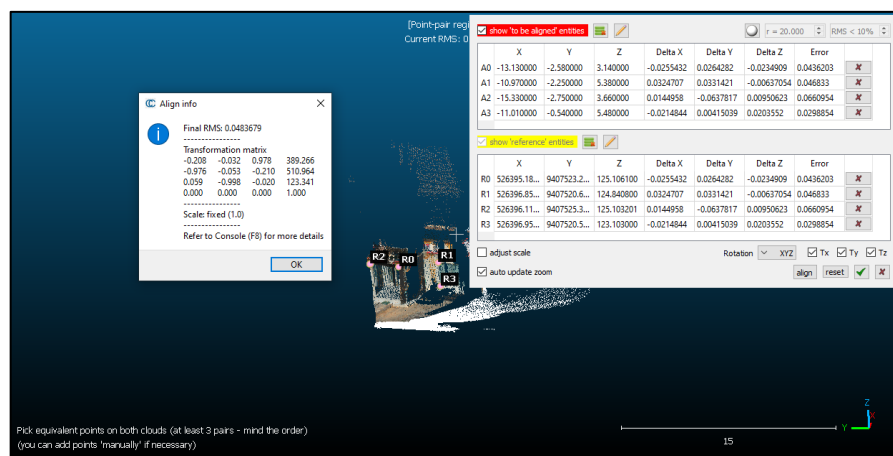


Gambar 51. Koordinat GCP Referensi dan koordinat *point align* (*Point cloud*)

Gambar diatas menampilkan tabel perbandingan koordinat antara titik GCP referensi dan titik yang dipilih dari *Point cloud*. Perbandingan ini menjadi dasar dalam menghitung translasi, meliputi keterangan *error* translasi sumbu x, y, dan z. Ketepatan pencocokan koordinat sangat berpengaruh pada hasil akhir registrasi. Hasil visualisasi perbedaan posisi antara titik referensi dan titik hasil translasi. Perbedaan posisi tersebut mengidentifikasi terdapat kesalahan jarak hasil registrasi jarak yang dilakukan.

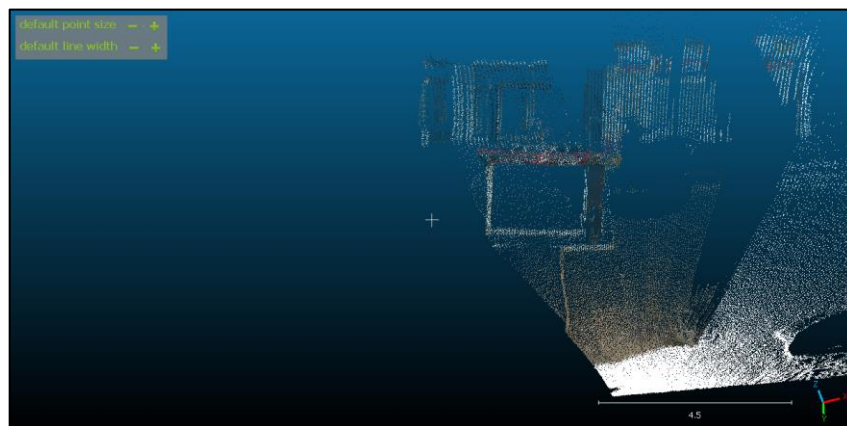
3. Contoh Hasil Registrasi *Target to Target*

Setelah proses transformasi dilakukan, dua set data yang berasal dari posisi pemindaian berbeda dapat digabungkan ke dalam satu sistem koordinat yang konsisten. Proses registrasi *Target to Target* ini memanfaatkan titik kontrol (*target*) yang telah ditempatkan secara strategis di sekitar objek bangunan, sehingga setiap titik target dapat terdeteksi pada berbagai posisi pemindaian. Dengan cara ini, kesalahan pergeseran maupun rotasi antar *scan* dapat diminimalkan, dan data *Point cloud* yang dihasilkan mampu merepresentasikan bentuk bangunan secara utuh.



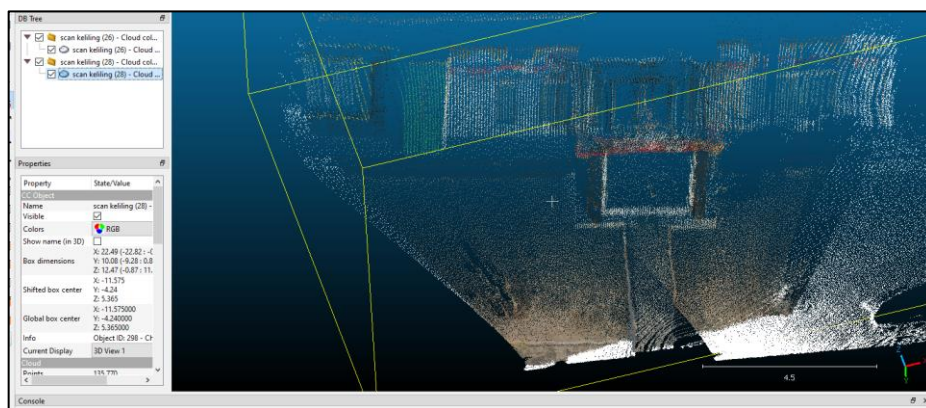
Gambar 52. Hasil registrasi *Target to Target*

Gambar ini memperlihatkan hasil akhir dari proses penyelarasan antara *Point cloud* dengan titik referensi. Registrasi dilakukan berdasarkan titik-titik GCP yang telah ditentukan sebelumnya. Keselarasan ini menjadi dasar integrasi antar data.



Gambar 53. Visualisasi data set yang sudah ter-registrasi *Target to Target*.

Point cloud yang telah diregistrasi akan secara otomatis menyesuaikan posisi serta rotasi ke sistem koordinat yang telah ditentukan berdasarkan koordinat referensi yang digunakan. Indikasi *Point cloud* sudah terregistrasi berdasarkan titik referensi akan dapat dilihat dari sumbu arah yang berada pada pojok kanan bawah layar, atau dapat juga dilakukan pengecekan koordinat kembali pada titik yang di *alignment*.



Gambar 54. Visualisasi 2 data set *Point cloud* yang telah di registrasi *Target to Target*

Gambar diatas menunjukkan tampilan visual set data yang telah berhasil diselaraskan. Setelah registrasi, kedua set data terlihat terintegrasi tanpa adanya tumpang tindih atau ketidaksesuaian posisi. Hal ini menandakan bahwa transformasi koordinat berhasil dilakukan secara presisi. Pada gambar 54 diatas, ditampilkan dua dataset *Point cloud* yang telah tergabung dalam sistem koordinat yang sama. Registrasi yang baik terlihat dari bentuk bangunan yang utuh tanpa adanya perpindahan Planimetrik yang mencolok. Ini membuktikan bahwa metode *Target to Target* dapat digunakan secara efektif untuk proses penyelarasan data *Point cloud* hasil TLS100.

3.6.5. Georeferencing *Point Cloud*

Georeferensi adalah proses transformasi koordinat data *point cloud* dari sistem lokal pemindai (*scanner*) ke sistem koordinat referensi global atau sistem pemetaan yang ditetapkan (seperti yang diukur oleh *Total Station*). Meskipun tujuan akhirnya sama, pendekatan georeferensi memiliki karakteristik berbeda tergantung pada

metode registrasi yang digunakan. pada penelitian ini yang memerlukan proses georeferensing setelah registrasi yaitu metode *Cloud to cloud*, berikut ini merupakan penjelasan registrasi yang dilakukan.

Georeferensi pada Metode *Cloud-to-Cloud* (C2C)

Pada metode ini, georeferensi biasanya merupakan tahapan terpisah yang dilakukan setelah proses registrasi internal selesai.

- a) Mekanisme: Tahap awal adalah registrasi murni, di mana pemindaian-pemindaian individu disatukan menjadi satu blok model utuh berdasarkan kesamaan fitur geometri (dinding, lantai, struktur) pada area *overlap*. Pada tahap ini, model masih berada dalam sistem koordinat lokal sembarang.
- b) Proses Transformasi: Setelah model C2C menyatu, barulah dilakukan georeferensi (transformasi global). Model utuh tersebut digeser dan diputar agar sesuai dengan titik-titik referensi di lapangan. Titik referensi ini berupa target yang diidentifikasi belakangan, atau fitur alamiah bangunan yang koordinatnya diketahui.
- c) Karakteristik Hasil: Akurasi georeferensi di sini sangat bergantung pada kualitas registrasi C2C awal. Jika terdapat sedikit kesalahan atau pada saat penyatuan geometri awan poin, kesalahan tersebut akan terbawa saat transformasi ke koordinat global (Reshetyuk, 2009).

3.6.6. Uji Akurasi Geometrik Posisi dan Dimensi Bangunan

Sebelum data *point cloud* diproses lebih lanjut untuk perhitungan volume, validitas geometriknya harus diuji terlebih dahulu untuk menjamin bahwa model digital yang terbentuk benar-benar merepresentasikan kondisi fisik bangunan di lapangan. Sebagai tolok ukur objektivitas, penelitian ini tidak menggunakan asumsi sembarang, melainkan mengacu pada standar nasional yang berlaku, yaitu SNI 8202:2019 tentang Ketelitian Peta Dasar. Berdasarkan standar tersebut untuk pemetaan skala besar, ditetapkanlah ambang batas toleransi (*threshold*) kesalahan posisi dan dimensi sebesar 20 cm. Mekanisme validasi ini berjalan mengikuti logika kondisional:

1. Kondisi Deviasi > 20 cm. Apabila hasil uji komparasi menunjukkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) atau selisih dimensi bangunan melebihi 20 cm, hal ini mengindikasikan adanya distorsi geometri atau kesalahan registrasi yang signifikan. Dalam kondisi ini, data dinyatakan tidak layak. Sesuai alur diagram, proses wajib mengalami iterasi atau pengulangan kembali ke tahap Registrasi dan Georeferensi. Peneliti harus melakukan perbaikan pada penyatuan data *scan* hingga deviasi tersebut turun.
2. Kondisi Deviasi ≤ 20 cm, jika nilai kesalahan yang ditemukan berada pada angka 20 cm atau di bawahnya, maka data tersebut dinyatakan telah memenuhi standar ketelitian SNI 8202:2019 (Valid). Kondisi ini memberikan "lampu hijau" bagi penelitian untuk melangkah ke tahap analisis utama, yaitu Analisis Perbandingan Dimensi dan Perhitungan Volume.

Dengan menerapkan filter ketat berbasis SNI ini, penelitian menjamin bahwa hasil akhir perhitungan volume adalah data yang presisi, serta meminimalisir risiko perambatan kesalahan (*error propagation*) dari tahap pengolahan data awal.

3.7. Tahap Analisis

Tahap ini merupakan proses analisis kesesuaian ukuran geometris hasil pemodelan 3D bangunan berdasarkan dua metode registrasi yang digunakan, yaitu metode *Cloud to Cloud* dan *Target to Target*. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat ketelitian hasil pengukuran dimensi yang diperoleh dari pemodelan TLS100 terhadap ukuran geometris yang dianggap benar, yaitu hasil pengukuran menggunakan Total Station.

Evaluasi dilakukan dengan menghitung nilai *Root Mean Square* (RMS) dari selisih antara hasil pengukuran TLS dan data referensi. Nilai RMS digunakan untuk menggambarkan besarnya penyimpangan rata-rata kuadrat terhadap nilai referensi, sehingga dapat menunjukkan tingkat kedekatan hasil pengukuran TLS terhadap data acuan. Semakin kecil nilai RMS yang dihasilkan, maka semakin tinggi tingkat ketelitian dan kesesuaian hasil pemodelan TLS terhadap ukuran geometris

sebenarnya. Sebaliknya, nilai RMS yang besar menunjukkan bahwa hasil pemodelan memiliki deviasi yang lebih tinggi terhadap data referensi sehingga ketelitiannya menurun.

3.8. Perbandingan Volume

Perhitungan volume dalam penelitian ini bertujuan untuk memperoleh estimasi kuantitatif volume bangunan berdasarkan dua sumber data, yaitu hasil pemindaian TLS100 dan pengukuran detail dengan *Total Station* (TS). Pendekatan ini dilakukan agar nilai volume yang dihasilkan dapat dibandingkan dengan data referensi dari pengukuran langsung di lapangan. Tahapan perhitungan meliputi pengolahan data TLS100, penyusunan data referensi TS, penerapan metode *grid* dan interpolasi, estimasi volume, serta perbandingan hasil, sehingga setiap tahap saling berkaitan dan dapat ditelusuri secara sistematis (Gideon Samari Suno dkk., 2025). Persentase selisih volume dilakukan perhitungan seperti dapat dilihat pada persamaan (14).

V. SIMPULAN

5.1. Simpulan

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. Berdasarkan Bentuk *Point Cloud* (Analisis Kerapatan) Metode C2C menghasilkan kerapatan rata-rata yang lebih tinggi (1.860,1 titik/m³) dan persentase titik yang lebih besar pada kelas kerapatan tinggi (32,4%), mengindikasikan model yang terlihat lebih padat. Sebaliknya, T2T menghasilkan kerapatan rata-rata yang sedikit lebih rendah (1.772,4 titik/m³), namun memiliki distribusi titik yang lebih realistis dan merata (40,0% di area renggang).
2. Hasil uji RMS Ketelitian ukuran dimensi Geometris membuktikan bahwa metode *Target to Target* (T2T) memiliki tingkat akurasi registrasi yang secara signifikan lebih baik (RMS 5,03 cm) dibandingkan *Cloud to Cloud* (C2C) (RMS 8,36 cm). Perbedaan RMS sebesar 66% ini mengkonfirmasi bahwa C2C kurang optimal dalam menghasilkan akurasi model *point cloud* dibandingkan T2T. dan berdasarkan Evaluasi Geometrik Posisi (ICP) Validasi posisi menggunakan *Independent Check Points* (ICP) menunjukkan bahwa metode T2T lebih unggul dengan nilai RMSE global sebesar 0,0908 m, dibandingkan metode C2C yang memiliki RMSE 0,1304 m. Selisih akurasi sekitar 4 cm ini menegaskan bahwa metode *target to target* memberikan kontrol posisi yang lebih presisi mendekati koordinat referensi lapangan dibandingkan metode *cloud to cloud*

3. Berdasarkan Pengujian Volumetrik (ASTM D6172-98) Metode T2T menghasilkan volume sebesar 1.235,948 m³ dengan deviasi hanya 1,51% terhadap pengukuran *Total Station* (1.254,901 m³). Sedangkan metode C2C memiliki deviasi 8,05%. Hal ini menunjukkan bahwa metode T2T memenuhi batas toleransi kesalahan ASTM sebesar <2%, sehingga dinyatakan lebih akurat dalam estimasi volume bangunan dibandingkan metode C2C.
4. Berdasarkan Standar Ketelitian Peta (SNI 8202:2019) Kedua metode registrasi dinyatakan memenuhi syarat untuk standar Peta Dasar skala 1:1.000 Kelas 1. Metode T2T mencatatkan ketelitian horizontal (*Circular Error* 90% atau CE90) sebesar 0,13 m dan ketelitian vertikal (*Linear Error* 90% atau LE90) sebesar 0,06 m. Hasil ini lebih baik dibandingkan metode C2C (CE90 0,17 m dan LE90 0,10 m). Kedua metode masih berada di bawah batas toleransi maksimum SNI (0,30 m horizontal dan 0,20 m vertikal), sehingga datanya valid dan layak digunakan untuk pemetaan teknik.

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*).

5.2. Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan penulis untuk penelitian dan pengembangan selanjutnya antara lain.

1. Penggunaan target reflektif khusus sangat disarankan dalam metode T2T, agar hasil identifikasi titik lebih akurat dan mengurangi risiko kesalahan hasil interpretasi visual pada elemen arsitektural.
2. Perluasan analisis terhadap objek bertingkat atau kompleks , seperti bangunan berlantai banyak atau fasad yang melengkung, untuk menguji kinerja kedua metode pada geometri *non-linier*.

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.
- Badan, K., Geospasial, I., dan Indonesia, R. 2021.
- Budisusanto, Y., Cahyadi, M. N., Farid, I. W., Ubaidillah, M. R., dan Imani, D. W. 2021. *Low Cost LiDAR Prototype Design for 3D Mapping*. 2021 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation, ICAMIMIA 2021 - Proceeding, 13–17.
- Budisusanto, Y., Rizki Ubaidillah, M., Nur Cahyadi, M., Wahyu Imani, D., dan Wahyudi Farid, I. 2022. *Low-Cost Lidar Tls-100 Comparison With Lidar Ipad Pro For 3d Mapping*. Journal of Marine-Earth Science and Technology,
- Castorena, J., Dickman, L. T., Killebrew, A. J., Gattiker, J. R., Linn, R., dan Loudermilk, E. L. 2024. *ForestAlign: Automatic Forest Structure-based Alignment for Multi-view TLS and ALS Point Clouds*.
- Chan, T. O., Xiao, H., Liu, L., Sun, Y., Chen, T., Lang, W., dan Li, M. H. 2021. *A post-scan point cloud colorization method for cultural heritage documentation*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(11).
- Crombez, N., Caron, G., dan Mouaddib, E. 2015. *3D point cloud model colorization by dense registration of digital images*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 40(5W4), 123–130.
- Genechten, M. S. Q. dan B. Van. 2008. *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning*. Learning Tools for Advanced Three-Dimensional Surveying in Risk Awareness Project, June, 1–241.
- Gideon Samari Suno, Henny Magdalena, Windhu Nugroho, Agus Winarno, dan Tommy Trides. 2025. *Perbandingan Perhitungan Volume Stockpile Batu Andesit Menggunakan Alat Survey Terrestrial Laser Scanner dan Global Positioning Sistem Real Time Kinematik pada PT. Bara Tabang*. Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik, 3(3), 137–153.

- Hidayat, W. 2016. *Analisis proses registrasi data point clouds metode cloud to cloud dan target based pada obyek besar*.
- Maharani, dkk. 2023. Kajian Keandalan Model 3D Hasil Akuisisi *Terrestrial Laser Scanner* Untuk Pembuatan *As Built Drawing*. *Geomatika*, 29(1), 35–44.
- Martinez, E. S., dan McMahan, R. P. 2023. *RecolorCloud: A Point Cloud Tool for Recoloring, Segmentation, and Conversion*. <http://arxiv.org/abs/2310.12470>
- Metawie, M., dan Marzouk, M. 2020. *Optimizing laser scanning positions in buildings exteriors: Heritage building application*. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26(3), 304–314.
- Mill, T. 2016. *Simulation of terrestrial laser scanning errors occurring during deformation monitoring*. *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*.
- Morhart, C., Schindler, Z., Frey, J., Sheppard, J. P., Calders, K., Disney, M., Morsdorf, F., Raunonen, P., dan Seifert, T. 2024. *Limitations of estimating branch volume from terrestrial laser scanning*. *European Journal of Forest Research*, 143(2), 687–702. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01651-z>
- Pitto Yuniar Maharsayanto, Ir. Sutomo Kahar, M.Si., Bandi Sasmito, ST., M. 2014. Aplikasi *Terrestrial Laser Scanner* Untuk Pemodelan Tampak Muka Bangunan (Studi Kasus: Gedung Pt. Almega Geosystems, Kelapa Gading-Jakarta). *Jurnal Geodesi Undip*, 3(4), 201–211.
- Purwaamijaya, I. M. 2018. Teknik Survei dan Pemetaan untuk Sekolah Menengah Kejuruan. In *Teknik Survei dan Pemetaan: Vol. Jilid 2* (Issue 1). <https://medium.com/@arifwicaksanaa/pengertian-use-case-a7e576e1b6bf>
- Rahmawati, N., Prasetyo, Y., dan 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.unpak.ac.id/index.php/teknikgeodesi/article/view/1210>
- Rajendra, Y. D., Mehrotra, S. C., Kale, K. V., Manza, R. R., Dhumal, R. K., Nagne, A. D., dan 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.
- Ramadhani, S. M., Prasetyo, Y., dan Bashit, N. 2021. Analisis Ketelitian *Point Clouds* Teknologi *Terrestrial Laser Scanner*. *Jurnal Geodesi Undip Januari*, 10, 250–258.
- Reshetyuk, Y. 2009. *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning*. In *Department of Transport and Economics Division of Geodesy: Vol. PhD*. (Issue January).

S.Basuki. 2006. Ilmu Ukur Tanah.

Vosselman, G., dan Maas, H. G. 2010. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. CRC Press.

Zagar, B. L., Yurtsever, E., Peters, A., dan Knoll, A. C. 2022. *Point Cloud Registration With Object-Centric Alignment*. *IEEE Access*, 10(July), 76586–76595. <https://doi.org/10.1109/Access.2022.3191352>

Zakaria, A. 2016. *Study Of 3d Modelling Using Terrestrial Laser Scanner Based On Cloud To Cloud And Target To Target Registration Process (Case Study: Brahu Temple, Mojokerto)*.

Zhang, K., dkk. 2016. *Evaluation of low-cost TLS for structural measurement*. *Journal of Applied Geodesy*.

Zhou, T., Cheng, X., Lin, P., Wu, Z., dan Liu, E. 2020. *A general point-based method for self-calibration of terrestrial laser scanners considering stochastic information*. *Remote Sensing*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/RS12182923>

Zhu, Z., Bao, T., Hu, Y., dan Gong, J. 2021. *A novel method for fast positioning of non-standardized ground control points in drone images*. *Remote Sensing*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/rs13152849>