

Evaluasi Akurasi Pemetaan Dalam Ruangan Berbasis LiDAR-SLAM Menggunakan Metode *Single mapping* dan *Multi mapping* pada Gedung 18 ITENAS

Indra Jayusman¹, Gusti Ayu Jessy Kartini²

^{1,2}Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

Email: ¹Indra.jayusman06@gmail.com, ²ayujessy@itenas.ac.id

Abstrak

Teknologi *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) berbasis LiDAR telah menjadi salah satu metode yang banyak digunakan untuk pemetaan tiga dimensi (3D) lingkungan *indoor* karena mampu menghasilkan model *point cloud* secara cepat tanpa bergantung pada sinyal *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Namun, strategi akuisisi data yang digunakan berpotensi memengaruhi kualitas geometrik model yang dihasilkan, terutama pada bangunan bertingkat dengan lintasan pemetaan yang kompleks. Penelitian ini bertujuan membandingkan akurasi model *point cloud* hasil metode *single mapping* dan *multi mapping* menggunakan SLAM LiDAR pada Gedung 18 Institut Teknologi Nasional Bandung. Penelitian dilakukan menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimen komparatif. Data diperoleh melalui akuisisi *point cloud* menggunakan Hi-Target V700S SLAM LiDAR, pengukuran 10 titik *check point* menggunakan *Total Station* sebagai referensi koordinat, serta pengukuran dimensi 12 objek bangunan menggunakan meteran dan distometer untuk validasi geometri. Akurasi koordinat dievaluasi menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE), *Circular Error 90* (CE90), dan *Linear Error 90* (LE90), sedangkan kesesuaian geometri dianalisis menggunakan *paired sample t-test*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *single mapping* menghasilkan akurasi koordinat yang lebih baik dibandingkan *multi mapping*, yang diindikasikan oleh nilai RMSE horizontal sebesar 0,0916 m dan CE90 sebesar 0,1390 m. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa proses registrasi pada metode *multi mapping* berpotensi meningkatkan propagasi kesalahan koordinat. Meskipun demikian, hasil uji statistik menunjukkan bahwa kedua metode mampu merepresentasikan geometri bangunan secara konsisten tanpa perbedaan yang signifikan terhadap hasil pengukuran lapangan ($p > 0,05$). Penelitian ini menunjukkan bahwa *single mapping* lebih sesuai untuk pekerjaan yang memerlukan ketelitian koordinat tinggi, sedangkan *multi mapping* tetap dapat diterapkan pada bangunan dengan keterbatasan akses selama proses registrasi dilakukan secara optimal.

Kata kunci: akurasi koordinat, CE90, LE90, *multi mapping*, *point cloud*, *single mapping*, SLAM LiDAR.

Accuracy Evaluation of LiDAR-SLAM-Based Indoor Mapping Using Single mapping and Multi-Mapping Methods at Building 18, ITENAS

Abstract

LiDAR-based *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) has become one of the most widely used technologies for three-dimensional (3D) indoor mapping due to its ability to efficiently generate point cloud models without relying on *Global Navigation Satellite System* (GNSS) signals. However, the selected data acquisition strategy may affect the geometric quality of the resulting model, particularly in multi-storey buildings with complex survey trajectories. This study aims to compare the accuracy of point cloud models generated using *single mapping* and *multi mapping* acquisition strategies with LiDAR SLAM at Building 18 of Institut Teknologi Nasional Bandung. A quantitative comparative experimental approach was employed. Data were collected using a Hi-Target V700S SLAM LiDAR, 10 *Total Station* checkpoints as coordinate references, and measurements of 12 building elements using a tape measure and a laser distance meter for geometric validation. Coordinate accuracy was evaluated using the *Root Mean Square Error* (RMSE), *Circular Error 90* (CE90), and *Linear Error 90* (LE90), while geometric consistency was assessed using a *paired sample t-test*. The results indicate that the *single mapping* approach achieved higher coordinate accuracy than the *multi mapping* approach, with a horizontal RMSE of 0.0916 m and a CE90 of 0.1390 m. These findings suggest that the registration process required in *multi mapping* may increase coordinate error propagation. Nevertheless, the statistical analysis revealed no significant difference between the geometric dimensions extracted from the point cloud models and the field measurements ($p > 0.05$), indicating that both methods adequately preserved building geometry. This study demonstrates that *single mapping* is more suitable for applications requiring high coordinate accuracy, whereas *multi mapping* remains a

practical alternative for buildings with limited accessibility, provided that registration quality is carefully controlled.

Keywords: *coordinate accuracy, CE90, LE90, multi mapping, point cloud, single mapping, SLAM LiDAR.*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pemetaan tiga dimensi (*3D mapping*) telah mendorong transformasi berbagai sektor yang membutuhkan representasi spasial beresolusi tinggi, seperti *Building Information Modeling* (BIM), *digital twin*, manajemen aset bangunan, konstruksi, serta navigasi dalam ruangan. Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi *Light Detection and Ranging* (LiDAR) yang dipadukan dengan *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) menjadi salah satu metode yang paling banyak digunakan untuk menghasilkan model tiga dimensi secara cepat dan efisien pada lingkungan *indoor*. Berbeda dengan metode survei konvensional yang memerlukan banyak titik kontrol dan waktu akuisisi yang relatif panjang, SLAM LiDAR memungkinkan proses pemetaan dilakukan secara real-time sekaligus membangun representasi lingkungan tiga dimensi dan menentukan posisi sensor secara simultan. Kemampuan tersebut menjadikan SLAM sebagai salah satu teknologi utama dalam pemetaan *indoor* modern [1], [11].

Kebutuhan terhadap model tiga dimensi yang akurat semakin meningkat seiring berkembangnya konsep *smart building* dan *digital twin*. Dalam konteks bangunan bertingkat, model *point cloud* yang memiliki ketelitian posisi dan geometri yang baik menjadi dasar penting untuk inventarisasi aset, pemeliharaan fasilitas, dokumentasi bangunan, serta integrasi dengan sistem BIM. Namun demikian, kualitas model yang dihasilkan tidak hanya dipengaruhi oleh sensor yang digunakan, tetapi juga oleh strategi akuisisi data dan tahapan pengolahan *point cloud* yang diterapkan [1].

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengevaluasi performa teknologi SLAM LiDAR pada berbagai kondisi pemetaan. Akpinar [4] membandingkan beberapa algoritma SLAM pada lingkungan *indoor* dan *outdoor* berdasarkan akurasi lintasan dan kualitas model yang dihasilkan. Ress et al. [2] mengevaluasi penerapan LiDAR-SLAM pada lingkungan konstruksi *indoor* berskala besar dengan menitikberatkan pada *konsistensi lintasan* dan representasi geometri model. Sementara itu, Shan et al. [5] serta Li et al. [3] mengembangkan pendekatan LiDAR-inertial odometry and mapping untuk meningkatkan stabilitas estimasi posisi sensor dan kualitas pemetaan. Hasil penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa performa sistem SLAM sangat dipengaruhi oleh kualitas estimasi lintasan, mekanisme optimasi, dan proses registrasi selama pembentukan model tiga dimensi.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut lebih berfokus pada pengembangan algoritma SLAM, peningkatan metode estimasi lintasan, maupun evaluasi performa sistem pada berbagai kondisi lingkungan. Strategi akuisisi data yang digunakan umumnya dilakukan dalam satu lintasan pemetaan (*single-session mapping*) tanpa membandingkan pengaruh metode akuisisi terhadap kualitas model *point cloud*. Akibatnya, pengaruh strategi akuisisi terhadap akurasi koordinat dan representasi geometri model tiga dimensi, khususnya pada bangunan bertingkat, masih belum banyak dikaji secara sistematis [2], [3], [5].

Pada bangunan bertingkat yang memiliki koridor panjang, ruang dengan pola berulang (*repetitive features*), serta keterbatasan akses antar lantai, pelaksanaan *single mapping* menjadi lebih menantang karena lintasan akuisisi harus dipertahankan tetap kontinu agar estimasi posisi sensor tetap konsisten. Lintasan yang semakin panjang berpotensi meningkatkan akumulasi kesalahan estimasi posisi (*drift error*) apabila koreksi global tidak berlangsung secara optimal [1], [5], [10]. Sebagai alternatif, proses akuisisi sering dilakukan menggunakan pendekatan *multi mapping*, yaitu pemindaian dilakukan secara terpisah pada setiap lantai atau bagian bangunan, kemudian seluruh dataset digabungkan melalui proses registrasi dan transformasi koordinat. Meskipun pendekatan ini memberikan fleksibilitas yang lebih tinggi dalam pelaksanaan survei pada bangunan kompleks, setiap proses registrasi berpotensi menghasilkan *residual transformation* dan propagasi kesalahan yang dapat memengaruhi ketelitian koordinat model akhir [8], [12]. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi terhadap kedua strategi akuisisi tersebut untuk mengetahui metode yang mampu menghasilkan model *point cloud* dengan tingkat akurasi yang lebih baik pada bangunan bertingkat.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi secara komprehensif pengaruh strategi akuisisi *single mapping* dan *multi mapping* terhadap kualitas model *point cloud* hasil pemetaan *indoor* berbasis LiDAR-SLAM. Evaluasi dilakukan melalui kombinasi validasi koordinat menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE), *Circular Error 90* (CE90), dan *Linear Error 90* (LE90), serta validasi geometri objek menggunakan *paired sample t-test*. Pendekatan tersebut diharapkan memberikan dasar empiris dalam menentukan strategi akuisisi yang sesuai dengan kebutuhan tingkat akurasi pemetaan pada bangunan bertingkat serta memperkaya kajian mengenai evaluasi kualitas model *point cloud* berbasis LiDAR-SLAM. (Paragraf ini menggantikan paragraf keenam lama yang mengulang kajian penelitian terdahulu.).

Selain itu, evaluasi akurasi pada penelitian sebelumnya umumnya dilakukan menggunakan indikator performa sistem, seperti akurasi lintasan, kualitas registrasi, atau konsistensi model, sedangkan pendekatan yang mengombinasikan validasi koordinat menggunakan parameter RMSE, CE90, dan LE90 dengan validasi geometri objek melalui pengukuran lapangan masih relatif terbatas [8]. Hingga saat ini, penelitian yang secara khusus mengkaji perbandingan metode *single mapping* dan *multi mapping* pada bangunan pendidikan bertingkat di Indonesia dengan memanfaatkan koordinat hasil pengukuran *Total Station* sebagai data referensi juga masih belum banyak dilaporkan dalam publikasi ilmiah. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan tersebut melalui evaluasi komprehensif terhadap akurasi koordinat dan representasi geometri model *point cloud* hasil kedua strategi akuisisi tersebut.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan membandingkan akurasi model *point cloud* hasil akuisisi *single mapping* dan *multi mapping* menggunakan teknologi LiDAR-SLAM pada Gedung 18 Institut Teknologi Nasional Bandung. Evaluasi dilakukan melalui validasi koordinat menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE), *Circular Error 90* (CE90), dan *Linear Error 90* (LE90) terhadap koordinat hasil pengukuran *Total Station*, serta validasi geometri model menggunakan pengukuran meteran dan distometer yang dianalisis melalui *paired sample t-test*. Hipotesis penelitian menyatakan bahwa terdapat perbedaan tingkat akurasi antara metode *single mapping* dan *multi mapping* dalam menghasilkan model *point cloud indoor*. Berdasarkan tujuan tersebut, pertanyaan penelitian yang diajukan adalah: (1) metode akuisisi manakah yang menghasilkan akurasi koordinat terbaik, dan (2) apakah model yang dihasilkan memiliki kesesuaian geometri yang signifikan terhadap kondisi lapangan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan referensi bagi pengembangan metodologi pemetaan *indoor* berbasis LiDAR-SLAM serta menjadi dasar dalam pemilihan strategi akuisisi pada bangunan bertingkat.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang disusun secara sistematis, dimulai dari studi literatur, perencanaan survei, akuisisi data, pengolahan *point cloud*, validasi hasil, hingga analisis akurasi. Setiap tahapan saling berkaitan untuk memastikan bahwa proses pengambilan data, pengolahan, dan evaluasi dilakukan secara terstruktur sehingga hasil yang diperoleh dapat dipertanggung jawabkan secara ilmiah. Alur lengkap tahapan penelitian yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Gambar 1.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimen komparatif (*comparative experimental research*), yaitu pendekatan yang digunakan untuk membandingkan pengaruh suatu perlakuan terhadap variabel yang diamati [6]. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah metode akuisisi data yang terdiri atas *single mapping* dan *multi mapping*, sedangkan variabel terikat berupa akurasi model *point cloud* yang dievaluasi berdasarkan ketelitian koordinat dan geometri objek. Penelitian dilaksanakan di Gedung 18 Institut Teknologi Nasional Bandung yang dipilih karena memiliki karakteristik bangunan bertingkat dengan konfigurasi ruang, koridor, dan elemen struktural yang kompleks sehingga representatif sebagai lokasi pengujian pemetaan dalam ruangan berbasis SLAM LiDAR.

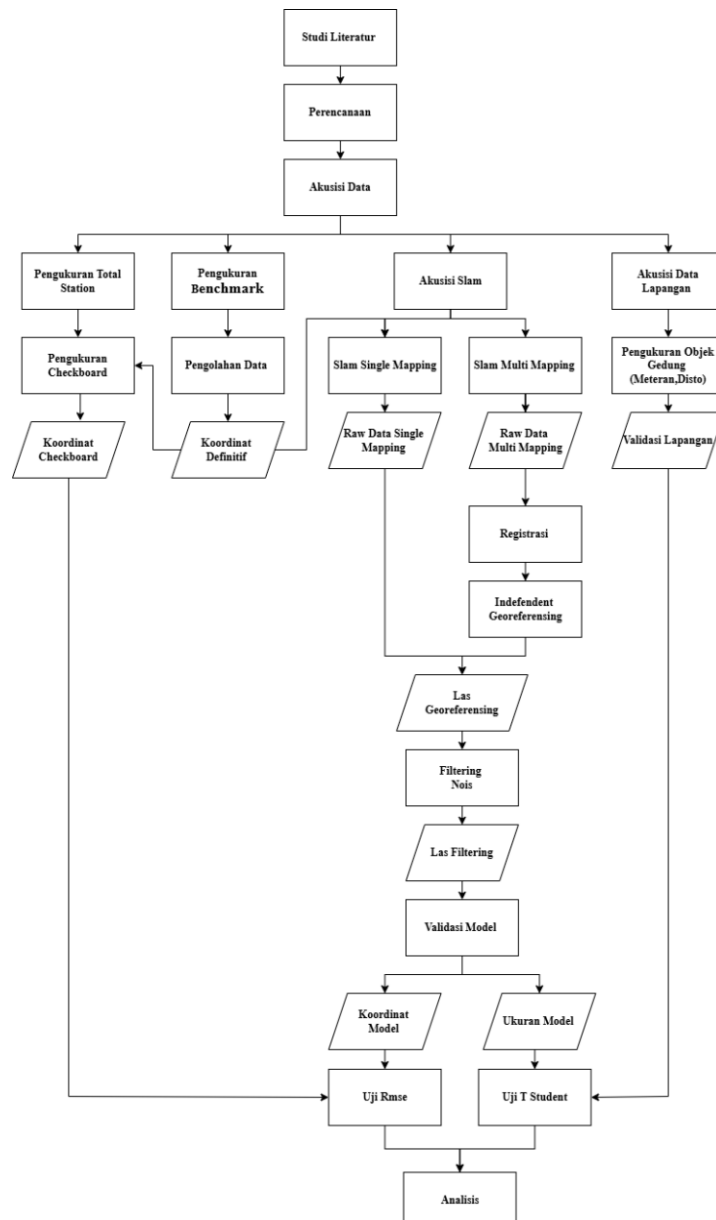
Data yang digunakan merupakan data primer yang diperoleh melalui pengukuran lapangan dan akuisisi *point cloud*. Akuisisi data dilakukan menggunakan perangkat Hi-Target V700S SLAM LiDAR dengan dua skenario pemetaan. Pada metode *single mapping*, seluruh area bangunan dipetakan dalam satu lintasan akuisisi sehingga menghasilkan satu model *point cloud* dengan sistem koordinat global. Pada metode *multi mapping*, akuisisi dilakukan secara bertahap pada setiap lantai bangunan sehingga menghasilkan beberapa dataset *point cloud* yang kemudian disatukan melalui proses registrasi dan georeferensi. Selain data *point cloud*, penelitian ini juga menggunakan data koordinat hasil pengukuran *Total Station* sebagai data referensi untuk validasi koordinat serta data pengukuran objek menggunakan meteran dan distometer sebagai referensi validasi geometri model. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui observasi lapangan, pengukuran terestris, dan eksperimen pemetaan *indoor*.

Populasi penelitian mencakup seluruh elemen spasial yang terdapat pada area Gedung 18 Institut Teknologi Nasional Bandung. Sampel penelitian terdiri atas 10 titik validasi koordinat (*check point*) yang tersebar merata pada setiap lantai serta 12 objek bangunan yang digunakan sebagai sampel validasi geometri, seperti lebar koridor, bukaan pintu, lebar jendela, dan elemen struktural lainnya yang dapat diidentifikasi baik pada model *point cloud* maupun di lapangan. Pengambilan sampel dilakukan menggunakan teknik *purposive sampling* dengan mempertimbangkan keterwakilan bentuk geometrik bangunan, distribusi spasial sampel, serta kemudahan identifikasi objek pada model. Teknik *purposive sampling* dipilih karena memungkinkan peneliti menentukan sampel yang paling representatif sesuai dengan tujuan penelitian dan karakteristik objek yang akan dievaluasi [11].

Jumlah sampel yang digunakan pada penelitian ini ditentukan berdasarkan keterwakilan karakteristik spasial objek penelitian, bukan berdasarkan pendekatan statistik *inferensial*. Sebanyak 10 *check point* dipilih agar distribusi titik validasi mencakup seluruh lantai dan area pengamatan sehingga mampu merepresentasikan variasi posisi horizontal maupun vertikal pada model *point cloud*. Sementara itu, sebanyak 12 objek validasi dipilih karena

mewakili berbagai elemen arsitektural bangunan, seperti koridor, kolom, pintu, jendela, dan tangga, yang memiliki karakteristik geometrik berbeda serta dapat diidentifikasi secara jelas baik pada model *point cloud* maupun pada pengukuran lapangan. Dengan distribusi tersebut, proses validasi diharapkan mampu memberikan gambaran yang representatif terhadap kualitas koordinat dan geometri model hasil pemetaan.

Instrumen penelitian yang digunakan meliputi perangkat Hi-Target V700S SLAM LiDAR sebagai alat utama akuisisi *point cloud* yang mampu merekam hingga 200.000 titik per detik dengan jangkauan 70 m. Selain itu digunakan perangkat Hi-Target iRTK5 sebagai GNSS RTK serta Hi-Target ZTS-320R *Total Station* untuk memperoleh koordinat referensi. Instrumen tambahan berupa meteran dan distometer digunakan untuk pengukuran dimensi objek di lapangan. Setelah proses akuisisi selesai dilakukan, data *point cloud* menjalani proses *filtering* untuk mengurangi titik-titik yang tidak merepresentasikan objek sebenarnya. Validitas koordinat dievaluasi menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE), *Circular Error 90* (CE90), dan *Linear Error 90* (LE90) sesuai Persamaan (1), Persamaan (2), dan Persamaan (3), sedangkan validasi geometri dilakukan menggunakan *paired sample t-test* sesuai Persamaan (4) untuk mengetahui signifikansi perbedaan ukuran antara model *point cloud* dan hasil pengukuran lapangan. Reliabilitas data geometri dijaga melalui pengukuran berulang sebanyak tiga kali pada setiap objek, kemudian dihitung nilai rata-ratanya sebelum digunakan sebagai data referensi.



Gambar 1 Metodologi Penelitian

RMSE Horizontal

$$RMSE_r = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (1)$$

Nilai RMSE horizontal dihitung menggunakan Persamaan (1) untuk memperoleh besarnya penyimpangan posisi horizontal antara koordinat hasil ekstraksi *point cloud* dan koordinat referensi hasil pengukuran *Total Station*. Semakin kecil nilai RMSE yang diperoleh, semakin tinggi tingkat akurasi koordinat horizontal model yang dihasilkan.

CE90

$$CE90 = 1.5175 \times RMSE_r \quad (2)$$

Nilai *Circular Error 90* (CE90) dihitung menggunakan Persamaan (2) sebagai ukuran ketelitian horizontal yang menunjukkan bahwa 90% titik uji memiliki kesalahan posisi horizontal yang tidak melebihi nilai CE90.

LE90

$$LE90 = 1.6499 \times RMSE_z \quad (3)$$

Nilai *Linear Error 90* (LE90) dihitung menggunakan Persamaan (3) untuk mengevaluasi ketelitian vertikal model *point cloud*. Parameter ini menunjukkan bahwa 90% titik uji memiliki kesalahan elevasi yang lebih kecil atau sama dengan nilai LE90.

Paired sample t-test

$$t = \frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}} \quad (4)$$

Pengujian *paired sample t-test* dilakukan menggunakan Persamaan (4) untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara ukuran objek hasil pengukuran pada model *point cloud* dan hasil pengukuran langsung di lapangan. Pengujian dilakukan pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$.

Berdasarkan Gambar 1, penelitian diawali dengan studi literatur, perencanaan survei, dan akuisisi data di Gedung 18 Institut Teknologi Nasional Bandung. Pengukuran benchmark dan *check point* dilakukan menggunakan *Total Station* untuk memperoleh koordinat referensi. Selanjutnya dilakukan akuisisi *point cloud* menggunakan metode *single mapping* dan *multi mapping*. Dataset hasil *multi mapping* kemudian diregistrasi menggunakan metode *point picking registration* pada perangkat lunak Hi-LiDAR dengan memanfaatkan titik-titik yang merepresentasikan objek yang sama pada area tumpang tindih (*overlap*) antar dataset. Titik-titik korespondensi dipilih pada fitur bangunan yang bersifat permanen dan mudah dikenali, seperti sudut dinding, kolom, dan bukaan pintu, sehingga proses transformasi antar dataset dapat dilakukan secara konsisten. Setelah seluruh dataset berada pada sistem koordinat yang sama, dilakukan proses *georeferencing* menggunakan koordinat referensi hasil pengukuran lapangan sehingga model akhir memiliki sistem koordinat global yang seragam sebelum dilakukan proses *filtering* dan evaluasi akurasi. Setelah proses *filtering*, model *point cloud* divalidasi melalui dua pendekatan, yaitu validasi koordinat menggunakan parameter RMSE, CE90, dan LE90 serta validasi geometri melalui perbandingan ukuran objek hasil pengukuran lapangan menggunakan *paired sample t-test*. Seluruh proses pengolahan *point cloud* dilakukan menggunakan perangkat lunak Hi-LiDAR dan CloudCompare, sedangkan analisis statistik dilakukan menggunakan Microsoft Excel.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN**3.1. Karakteristik Model *Point cloud* Hasil Akuisisi *Single mapping* dan *Multi mapping***

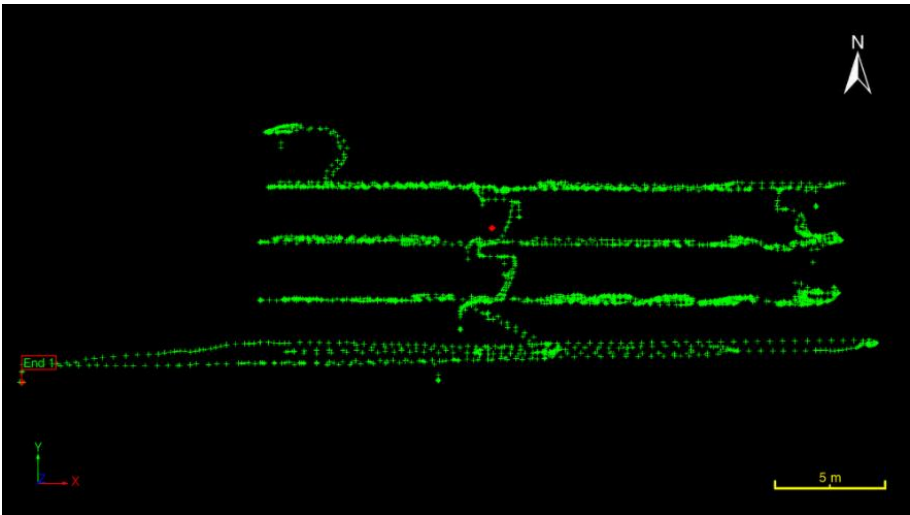
Akuisisi data menggunakan teknologi SLAM LiDAR menghasilkan dua model *point cloud* yang diperoleh melalui metode *single mapping* dan *multi mapping*. Metode *single mapping* dilakukan melalui satu lintasan akuisisi yang mencakup seluruh area Gedung 18 Institut Teknologi Nasional Bandung sehingga menghasilkan satu dataset *point cloud* yang langsung berada pada sistem koordinat global. Sebaliknya, metode *multi mapping*

dilakukan secara bertahap pada setiap lantai bangunan sehingga menghasilkan beberapa dataset *point cloud* yang memerlukan proses registrasi dan georeferensi sebelum membentuk satu model tiga dimensi terpadu. Perbandingan karakteristik hasil akuisisi dari kedua metode tersebut disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Karakteristik Hasil Akuisisi <i>Single mapping</i> dan <i>Multi mapping</i>		
Parameter	<i>Single mapping</i>	<i>Multi mapping</i>
Waktu akuisisi	45 menit	52 menit
Jumlah titik	192.090.976	238.755.365
Ukuran file	6.378.000 KB	7.925.000 KB
Jumlah sesi akuisisi	1 sesi	4 sesi
Registrasi <i>point cloud</i>	Tidak diperlukan	Diperlukan
Georeferensi	Langsung	Setelah registrasi
Sistem koordinat akhir	Global	Global (setelah registrasi)

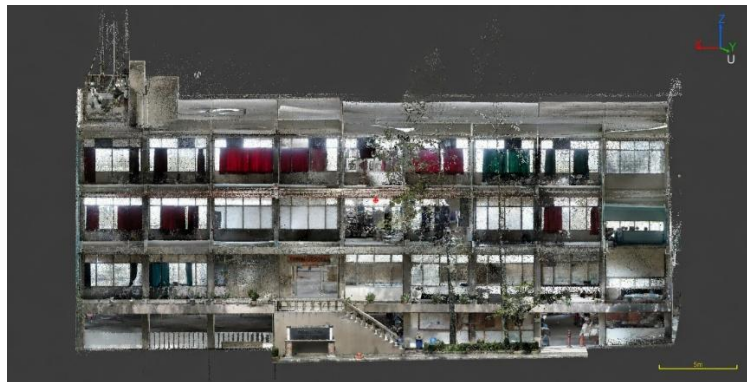
Tabel 1 menunjukkan bahwa metode *single mapping* memiliki waktu akuisisi yang lebih singkat dibandingkan *multi mapping*, sedangkan metode *multi mapping* menghasilkan jumlah titik dan ukuran file yang lebih besar. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh strategi akuisisi yang digunakan, di mana *multi mapping* dilakukan dalam beberapa sesi pemindaian sehingga menghasilkan beberapa dataset yang harus diregistrasi sebelum membentuk satu model *point cloud*. Sebaliknya, *single mapping* dilakukan dalam satu lintasan kontinu sehingga tidak memerlukan proses registrasi tambahan. Meskipun menghasilkan jumlah titik yang lebih sedikit, metode *single mapping* memiliki alur pengolahan yang lebih sederhana karena tidak melibatkan proses transformasi antar dataset. Sebaliknya, kepadatan titik yang lebih tinggi pada *multi mapping* belum tentu menghasilkan kualitas geometrik yang lebih baik apabila proses registrasi menimbulkan *residual transformation*. Temuan ini menunjukkan bahwa kualitas model *point cloud* tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah titik yang diperoleh, tetapi juga oleh konsistensi proses akuisisi dan integrasi antar dataset.

Lintasan akuisisi yang dihasilkan pada metode *single mapping* ditunjukkan pada Gambar 2 sebagai ilustrasi jalur pemindaian yang dilakukan secara kontinu selama proses akuisisi data.



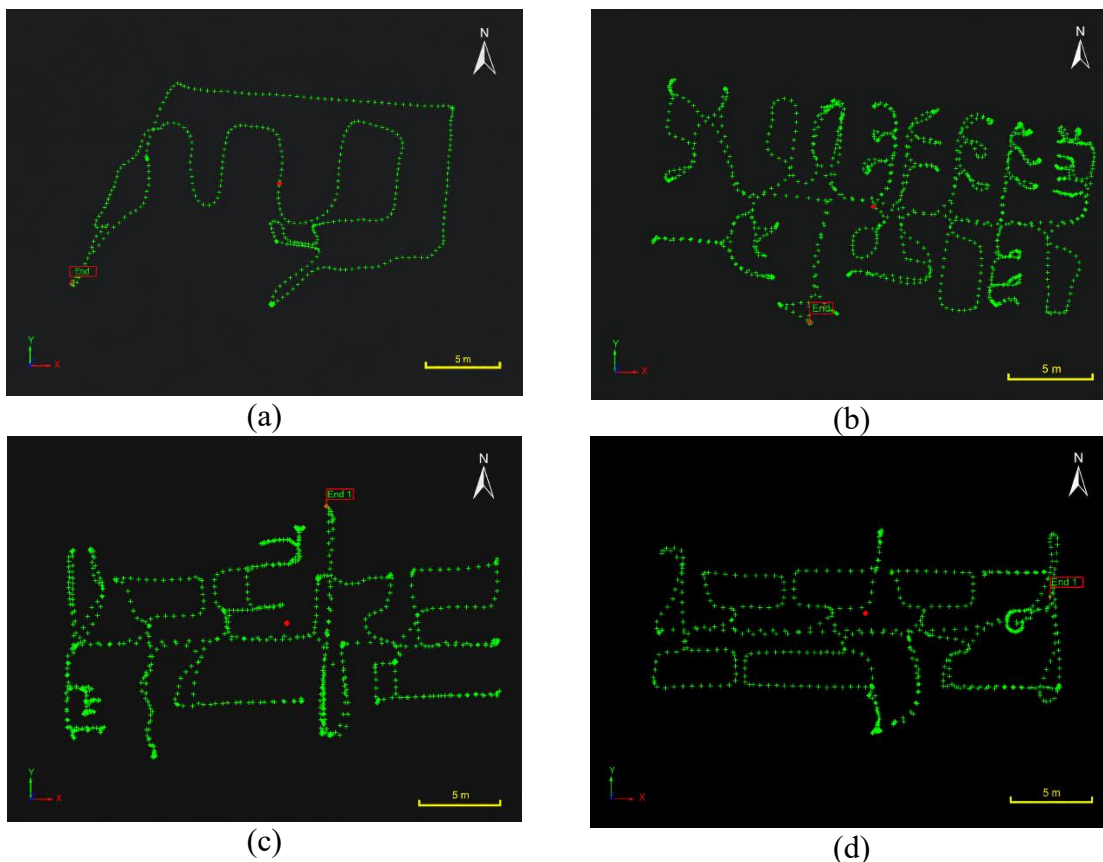
Gambar 2 *Trajectory* akuisisi *single mapping*

Trajectory pada Gambar 2 menunjukkan bahwa proses akuisisi dilakukan dalam satu lintasan yang saling terhubung tanpa pemisahan sesi pemindaian. Kontinuitas lintasan tersebut memungkinkan sistem SLAM mempertahankan estimasi posisi secara berkesinambungan selama proses pemetaan sehingga hubungan antar scan tetap konsisten. Kondisi ini menjadi salah satu karakteristik utama metode *single mapping* sebelum dilakukan evaluasi terhadap akurasi koordinat dan geometri model.

Gambar 3 Hasil *Single mapping*

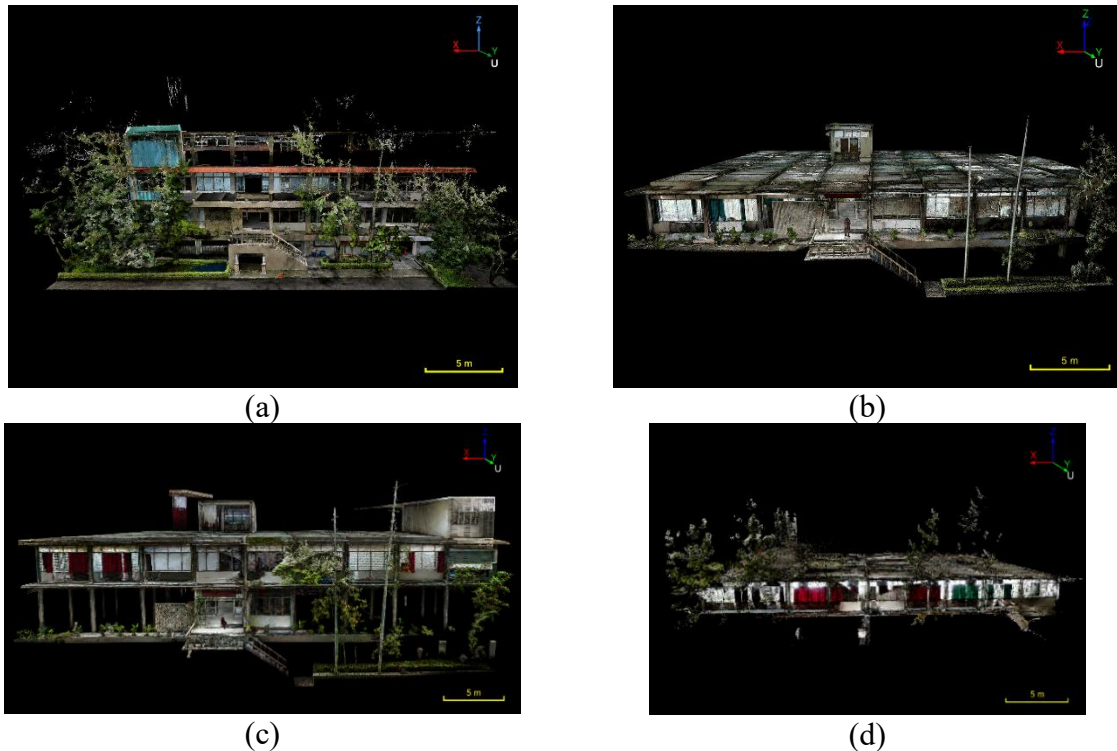
Model *point cloud* pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa seluruh bagian bangunan berhasil direkonstruksi menjadi satu model tiga dimensi dalam sistem koordinat global tanpa memerlukan proses registrasi antar dataset. Hasil ini menunjukkan bahwa seluruh proses akuisisi dan pembentukan model dilakukan secara langsung dalam satu sesi pemetaan sehingga menghasilkan representasi geometri bangunan yang utuh. Selain menghasilkan model yang utuh, pendekatan ini mempertahankan kontinuitas estimasi posisi selama proses akuisisi sehingga hubungan spasial antar bagian bangunan terbentuk secara langsung tanpa memerlukan koreksi tambahan melalui registrasi. Kondisi tersebut berpotensi mengurangi akumulasi kesalahan posisi yang umumnya muncul pada proses penggabungan beberapa dataset.

Berbeda dengan metode *single mapping*, proses akuisisi pada metode *multi mapping* dilakukan secara terpisah pada setiap lantai bangunan. *Trajectory* hasil akuisisi masing-masing lantai ditunjukkan pada Gambar 4.

Gambar 4 *Trajectory* akuisisi *Multi mapping* (a) Basement (b) Lantai 1 (c) Lantai 2 (d) Lantai 3.

Trajectory pada Gambar 4 menunjukkan bahwa setiap lantai direkam sebagai lintasan yang berdiri sendiri sehingga menghasilkan beberapa dataset *point cloud* yang belum berada dalam satu sistem koordinat yang sama.

Oleh karena itu, seluruh dataset memerlukan tahapan registrasi dan georeferensi sebelum dapat digabungkan menjadi satu model tiga dimensi yang utuh.



Gambar 5 Hasil *Multi mapping* (a) Basement (b) Lantai 1 (c) Lantai 2 (d) Lantai 3.

Pada metode *multi mapping*, proses registrasi dilakukan menggunakan teknik *point picking registration* untuk menyatukan *point cloud* antar lantai ke dalam satu sistem koordinat yang sama. Hasil model setelah proses registrasi dan georeferensi ditunjukkan pada Gambar 5. kedua model *point cloud* menjalani proses *filtering noise* untuk menghilangkan titik-titik yang tidak merepresentasikan objek sebenarnya. Hasil pengolahan menunjukkan bahwa kedua metode mampu menghasilkan model tiga dimensi yang merepresentasikan geometri bangunan secara baik, namun memiliki karakteristik akurasi yang berbeda.



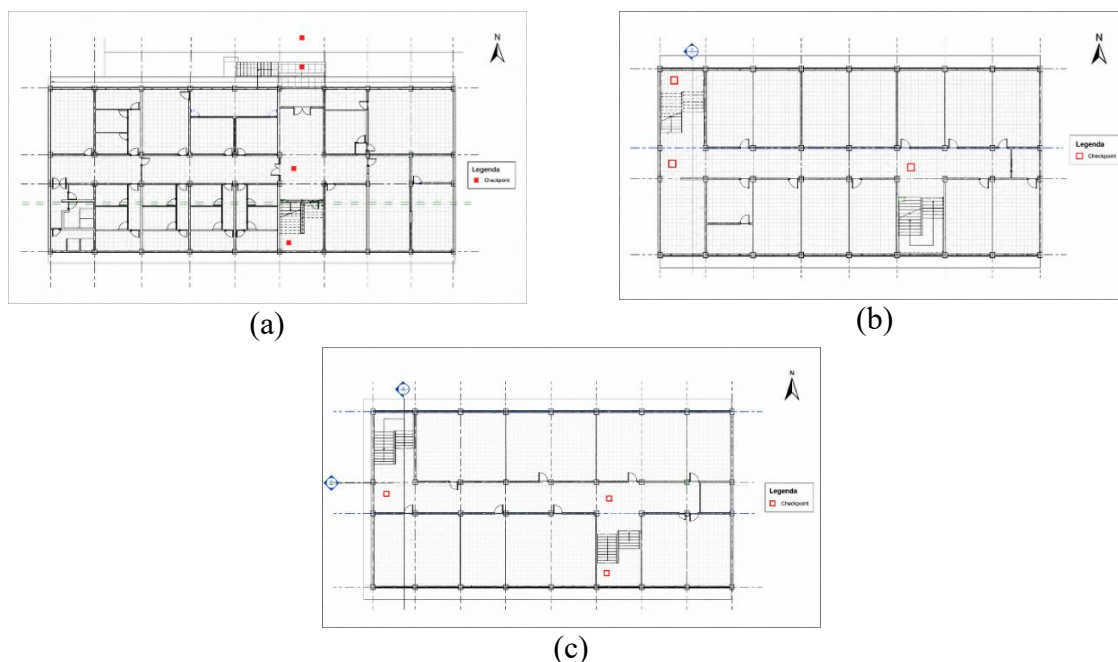
Gambar 6 Hasil registrasi *multi mapping*

Gambar 6 menunjukkan bahwa seluruh dataset *point cloud* berhasil digabungkan menjadi satu model tiga dimensi yang utuh setelah proses registrasi dan georeferensi. Meskipun secara visual model telah membentuk representasi bangunan yang lengkap, setiap tahapan registrasi tetap berpotensi menghasilkan residual transformasi yang dapat memengaruhi ketelitian koordinat model akhir.

Meskipun demikian, karakteristik proses akuisisi pada kedua metode menunjukkan perbedaan mendasar yang berpotensi memengaruhi kualitas model. Metode *single mapping* menghasilkan satu lintasan akuisisi yang kontinu sehingga kontinuitas estimasi posisi dapat dipertahankan selama proses pemetaan. Sebaliknya, metode *multi mapping* memerlukan tahapan registrasi dan transformasi koordinat tambahan untuk menyatukan beberapa dataset menjadi satu model utuh. Setiap proses registrasi berpotensi menghasilkan residual transformasi yang dapat terakumulasi dan memengaruhi ketelitian posisi model akhir. Oleh karena itu, evaluasi terhadap akurasi koordinat dan geometri diperlukan untuk mengetahui pengaruh kedua strategi akuisisi tersebut terhadap kualitas model *point cloud* yang dihasilkan.

3.2. Evaluasi Akurasi Koordinat Model *Point cloud*

Validasi koordinat dilakukan dengan membandingkan koordinat titik uji (*check point*) pada model *point cloud* terhadap koordinat referensi hasil pengukuran *Total Station*. Proses ini bertujuan untuk menilai tingkat pergeseran posisi absolut dari model tiga dimensi yang dihasilkan oleh sistem SLAM LiDAR. Evaluasi akurasi posisi horizontal dianalisis menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE) horizontal dan *Circular Error 90%* (CE90). Parameter CE90 memberikan batas kepastian bahwa 90% dari titik uji memiliki kesalahan posisi horizontal di bawah nilai tersebut. Sementara itu, akurasi posisi vertikal dievaluasi melalui parameter RMSE vertikal dan *Linear Error 90%* (LE90) untuk mengukur konsistensi elevasi model. Kombinasi keempat parameter statistik ini memberikan gambaran yang komprehensif mengenai kualitas geometris dan ketelitian posisi model *point cloud* secara spasial. Persebaran titik validasi koordinat pada setiap lantai bangunan ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7 Denah Posisi *Check point* (a) Lantai 1 (b) Lantai 2 (c) Lantai 3.

Gambar 7 menunjukkan bahwa sepuluh *check point* didistribusikan pada setiap lantai bangunan dengan mempertimbangkan persebaran spasial, variasi bentuk ruang, serta keterwakilan area pengamatan. Distribusi tersebut bertujuan agar evaluasi akurasi koordinat tidak hanya merepresentasikan satu bagian bangunan, tetapi mencerminkan kondisi model secara keseluruhan.

Tabel 2. Hasil RMSE

Parameter	<i>Single mapping</i> (m)	<i>Multi mapping</i> (m)
RMSE Horizontal	0,0916	0,2017
RMSE Vertikal	0,2017	0,2767
CE90	0,1390	0,3061
LE90	0,3327	0,4565

Berdasarkan Tabel 1, metode *single mapping* secara konsisten menghasilkan nilai RMSE horizontal, RMSE vertikal, CE90, dan LE90 yang lebih rendah dibandingkan metode *multi mapping*. Perbedaan terbesar terlihat pada parameter horizontal, di mana nilai RMSE horizontal metode *multi mapping* meningkat sekitar 120,2% dibandingkan metode *single mapping*, sedangkan peningkatan RMSE vertikal sebesar 37,2%. Temuan ini menunjukkan bahwa strategi akuisisi berpengaruh terhadap ketelitian koordinat model *point cloud*, khususnya pada akurasi posisi horizontal.

Perbedaan nilai RMSE horizontal yang lebih besar dibandingkan RMSE vertikal menunjukkan bahwa pengaruh registrasi lebih dominan terhadap ketelitian posisi horizontal daripada elevasi. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa proses transformasi antar dataset lebih berpengaruh terhadap kesesuaian posisi relatif pada bidang horizontal, sedangkan informasi elevasi masih dapat dipertahankan dengan lebih baik. Dengan demikian, strategi akuisisi menjadi salah satu faktor yang menentukan kualitas koordinat absolut model *point cloud*, terutama ketika model akan digunakan sebagai dasar analisis spasial yang memerlukan ketelitian posisi tinggi.

Hasil penelitian ini sejalan dengan Ress et al. [2] yang menyatakan bahwa kualitas model *point cloud* sangat dipengaruhi oleh *konsistensi lintasan* akuisisi dan jumlah proses registrasi selama pembentukan model tiga dimensi. Li et al. [3] juga menjelaskan bahwa registrasi merupakan salah satu sumber utama kesalahan spasial pada sistem pemetaan berbasis LiDAR-SLAM, terutama ketika beberapa dataset digabungkan menjadi satu model. Temuan tersebut mendukung hasil penelitian ini bahwa metode *multi mapping* memiliki akurasi koordinat yang lebih rendah akibat adanya proses registrasi tambahan.

Selain faktor registrasi, optimasi lintasan (*loop closure*) juga berkontribusi terhadap perbedaan akurasi yang diperoleh. Shan et al. [5] menunjukkan bahwa optimasi lintasan berbasis *loop closure* mampu mengurangi akumulasi drift dan meningkatkan konsistensi peta secara global. Pada penelitian ini, metode *single mapping* memberikan peluang yang lebih besar bagi sistem untuk mempertahankan kontinuitas lintasan dibandingkan *multi mapping*, sehingga kesalahan posisi dapat ditekan selama proses pemetaan berlangsung.

Hasil penelitian Akpınar [4] juga menunjukkan bahwa performa pemetaan dalam ruangan dipengaruhi oleh karakteristik lintasan dan strategi akuisisi yang digunakan. Temuan tersebut konsisten dengan penelitian ini, di mana metode *single mapping* menghasilkan ketelitian koordinat yang lebih baik meskipun jumlah titik yang dihasilkan lebih sedikit dibandingkan *multi mapping*. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah titik tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan akurasi koordinat apabila proses pembentukan model melibatkan tahapan registrasi tambahan.

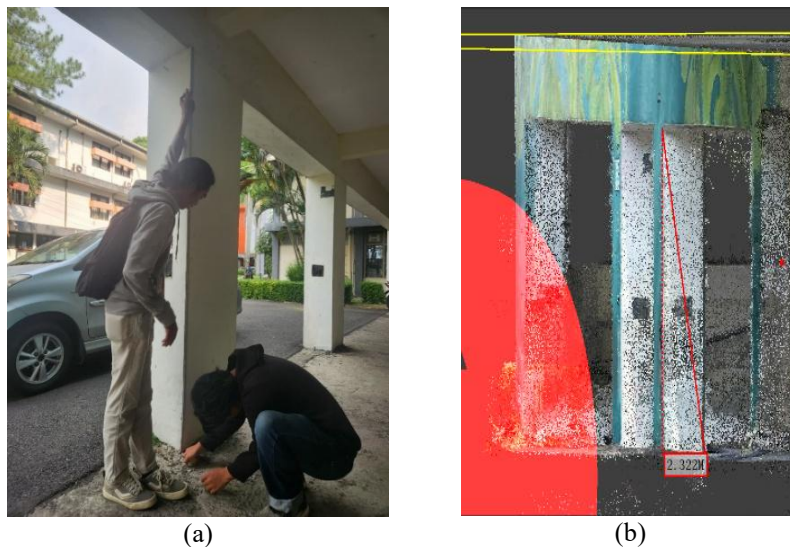
3.3. Evaluasi Representasi Geometri Model *Point cloud*

Selain validasi koordinat, penelitian ini juga menguji validasi geometri model untuk menilai tingkat presisi bentuk dan dimensi objek 3D yang dihasilkan. Proses pengujian ini membandingkan secara langsung ukuran elemen bangunan pada model *point cloud* terhadap dimensi aktual objek yang diukur menggunakan meteran dan distometer di lapangan. Pengukuran sampel dimensi dilakukan terhadap 12 objek bangunan yang dipilih menggunakan teknik *purposive sampling* sebagaimana dijelaskan pada bagian metodologi. Jumlah sampel tersebut dipilih karena telah mewakili variasi elemen arsitektural utama pada setiap lantai Gedung 18, meliputi koridor, bukaan pintu, jendela, dan elemen struktural lainnya yang dapat diidentifikasi secara jelas baik pada model *point cloud* maupun pada pengukuran lapangan. Pemilihan objek mempertimbangkan persebaran lokasi, variasi bentuk geometrik, serta kemudahan identifikasi sehingga mampu merepresentasikan kondisi geometrik bangunan secara keseluruhan.

Tabel 3. Objek Validasi

No	Lantai	lokasi objek		
1	Basement	kolom	pintu masuk selatan	pintu masuk utara
2	lantai 1	pintu masuk utama	pintu masuk lab surta	pintu masuk R.dosen
3	lantai 2	koridor	kolom	tangga
4	lantai 3	jendela	jendela	pintu r.306

Tabel 3 menunjukkan bahwa objek validasi dipilih pada setiap lantai dengan mempertimbangkan variasi elemen arsitektural, seperti kolom, koridor, pintu, jendela, dan tangga. Persebaran tersebut diharapkan mampu merepresentasikan kondisi geometri bangunan secara menyeluruh sehingga hasil evaluasi tidak hanya menggambarkan karakteristik pada satu lokasi tertentu.



Gambar 8 Validasi Geometri Objek (a) Objek Validasi Lapangan (b) Objek Validasi Model

Gambar 8 (a) memperlihatkan proses pengukuran dimensi objek secara langsung di lapangan menggunakan meteran sebagai data referensi, sedangkan Gambar 8 (b) menunjukkan proses pengukuran objek yang sama pada model *point cloud*. Perbandingan kedua hasil pengukuran tersebut digunakan sebagai dasar dalam pengujian statistik untuk mengevaluasi kesesuaian representasi geometri model terhadap kondisi sebenarnya.

Tabel 4. Hasil Uji T

Parameter	Nilai
Jumlah Sampel	12
t-hitung	1,4811
p-value	2,201
α	0,05

Berdasarkan hasil uji statistik pada Tabel 4 diperoleh nilai *p-value* sebesar 2,201. Karena nilai tersebut lebih besar dari tingkat signifikansi yang digunakan (0,05), maka hipotesis nol (H_0) diterima dan hipotesis alternatif (H_1) ditolak. Hasil ini menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara ukuran objek pada model *point cloud* dan ukuran objek hasil pengukuran lapangan.

Meskipun metode *multi mapping* menghasilkan kesalahan koordinat yang lebih besar akibat proses registrasi antar dataset, proses tersebut tidak secara langsung mengubah dimensi relatif antar titik pada setiap objek. Hal ini menunjukkan bahwa kesalahan yang timbul lebih banyak memengaruhi ketelitian koordinat absolut dibandingkan hubungan geometrik antar titik penyusun objek. Dengan demikian, bentuk geometrik objek masih dapat dipertahankan meskipun terjadi penurunan ketelitian koordinat absolut. Temuan ini mengindikasikan bahwa evaluasi kualitas model *point cloud* tidak cukup hanya didasarkan pada akurasi koordinat, tetapi juga perlu mempertimbangkan kemampuan model dalam mempertahankan representasi geometri objek sesuai kondisi sebenarnya.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa model *point cloud* yang dihasilkan masih layak digunakan untuk kebutuhan dokumentasi bangunan, inventarisasi aset, maupun visualisasi tiga dimensi. Temuan ini memperlihatkan bahwa kualitas model tidak hanya ditentukan oleh akurasi koordinat absolut, tetapi juga oleh kemampuan sistem dalam mempertahankan bentuk geometris objek selama proses akuisisi dan pemrosesan data. Dari sisi penerapan teknologi pemetaan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan strategi akuisisi perlu disesuaikan dengan tujuan penggunaan data. Metode *single mapping* lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan ketelitian koordinat tinggi, seperti integrasi dengan *Building Information Modeling* (BIM) dan *digital twin*, sedangkan *multi mapping* tetap dapat diterapkan pada bangunan yang memiliki keterbatasan akses atau konfigurasi ruang yang kompleks selama proses registrasi dilakukan secara optimal.

Dalam konteks pendidikan dan teknologi, temuan penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai referensi dalam pembelajaran pemetaan digital dan teknologi LiDAR-SLAM, khususnya untuk memberikan pemahaman

mengenai pengaruh strategi akuisisi terhadap kualitas model *point cloud*. Hasil penelitian ini juga dapat menjadi acuan dalam penyusunan kegiatan praktikum maupun pengembangan prosedur akuisisi data *indoor*, sehingga mahasiswa dan praktisi dapat memilih metode pemetaan yang sesuai dengan kebutuhan ketelitian serta karakteristik objek yang dipetakan.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pengujian hanya dilakukan pada satu objek bangunan sehingga hasil penelitian belum dapat digeneralisasikan pada seluruh jenis bangunan. Selain itu, evaluasi akurasi hanya menggunakan parameter RMSE, CE90, LE90, dan validasi geometri objek tanpa mempertimbangkan indikator kualitas *point cloud* lainnya. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian pada berbagai tipe bangunan dengan tingkat kompleksitas yang berbeda serta menambahkan parameter evaluasi seperti *Cloud-to-Cloud Distance* (C2C), *Cloud-to-Mesh Distance* (C2M), *Absolute Pose Error* (APE), dan *Relative Pose Error* (RPE) untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai performa metode *single mapping* dan *multi mapping*.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa strategi akuisisi data merupakan salah satu faktor yang memengaruhi kualitas model *point cloud* pada pemetaan *indoor* berbasis SLAM LiDAR. Meskipun kedua metode mampu menghasilkan representasi geometri bangunan yang sesuai dengan kondisi lapangan, metode *single mapping* memberikan konsistensi koordinat yang lebih baik karena proses akuisisi dilakukan secara kontinu tanpa memerlukan tahapan registrasi antar dataset. Sebaliknya, metode *multi mapping* memberikan fleksibilitas yang lebih tinggi pada bangunan bertingkat atau area yang sulit dipetakan dalam satu lintasan, namun memerlukan proses registrasi yang berpotensi menurunkan ketelitian koordinat apabila tidak dilakukan secara optimal.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan metode akuisisi tidak hanya ditentukan oleh kemudahan pelaksanaan survei, tetapi juga harus mempertimbangkan kebutuhan ketelitian dari tujuan pemetaan. Untuk pekerjaan yang memerlukan akurasi koordinat tinggi, seperti pembangunan *Building Information Modeling* (BIM), *digital twin*, dan dokumentasi aset, metode *single mapping* lebih direkomendasikan. Sementara itu, metode *multi mapping* tetap menjadi alternatif yang layak pada kondisi lapangan dengan keterbatasan akses, selama proses registrasi dan pengendalian kualitas dilakukan secara cermat.

Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah melalui evaluasi komparatif terhadap strategi akuisisi *single mapping* dan *multi mapping* pada pemetaan *indoor* berbasis LiDAR-SLAM dengan mengintegrasikan validasi koordinat menggunakan parameter RMSE, CE90, dan LE90 serta validasi representasi geometri menggunakan *paired sample t-test*. Pendekatan tersebut menghasilkan bukti empiris bahwa strategi akuisisi merupakan salah satu faktor yang memengaruhi kualitas koordinat model *point cloud* tanpa mengubah kesesuaian geometri objek secara signifikan. Temuan ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pemilihan strategi akuisisi untuk berbagai kebutuhan pemetaan *indoor* serta menjadi dasar bagi penelitian selanjutnya yang melibatkan jenis bangunan, perangkat SLAM, maupun metode registrasi yang berbeda guna memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai kualitas model *point cloud*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Alsadik and S. Karam, "The *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM): An Overview," *Journal of Applied Science and Technology Trends*, vol. 2, no. 4, pp. 120–131, 2021, doi: 10.38094/jastt2443.
- [2] V. Ress, W. Zhang, D. Skuddis, N. Haala, and U. Soergel, "SLAM for *Indoor* Mapping of Wide Area Construction Environments," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. X-2-2024, pp. 209–216, 2024, doi: 10.5194/isprs-annals-X-2-2024-209-2024.
- [3] Q. Li, X. Yu, J. P. Queralta, and T. Westerlund, "Robust Multi-Modal Multi-LiDAR-Inertial Odometry and Mapping for *Indoor* Environments," *Sensors*, vol. 23, no. 7, Art. no. 3572, 2023, doi: 10.3390/s23073572.
- [4] B. Akpınar, "Performance of Different SLAM Algorithms for *Indoor* and Outdoor Mapping Applications," *Applied System Innovation*, vol. 4, no. 4, Art. no. 86, 2021, doi: 10.3390/asi4040086.
- [5] T. Shan, B. Englot, D. Meyers, W. Wang, C. Ratti, and D. Rus, "LIO-SAM: Tightly-Coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020, pp. 5135–5142, doi: 10.1109/IROS45743.2020.9341176.
- [6] J. W. Creswell and J. D. Creswell, *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*, 6th ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2023.
- [7] Y. Liu, C. Wang, H. Wu, and Y. Wei, "An Effective LiDAR-Inertial SLAM-Based Map Construction Method for Outdoor Environments," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 17, Art. no. 3099, 2024, doi:

10.3390/rs16173099.

- [8] A. Filgueira, L. Peña, J. González-Jorge, H. Lorenzo, and P. Arias, "Mobile *Indoor* Mapping Technologies: A Review," *Automation in Construction*, vol. 118, Art. no. 103311, 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103311.
- [9] J. Zhang and S. Singh, "LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-Time," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 36, no. 4, pp. 1125–1142, 2020, doi: 10.1109/TRO.2020.2995081.
- [10] F. Pomerleau, F. Colas, R. Siegwart, and S. Magnenat, "Comparing ICP Variants on Real-World Data Sets," *Autonomous Robots*, vol. 34, no. 3, pp. 133–148, 2013, doi: 10.1007/s10514-013-9327-2.
- [11] V. A. Prisacariu and I. Reid, "SLAM and Dense Surface Reconstruction in Dynamic Environments: A Survey," *Artificial Intelligence*, vol. 252, pp. 1–28, 2017, doi: 10.1016/j.artint.2017.08.002.
- [12] J. Koszyk, P. Łabędź, K. Grzelka, A. Jasińska, K. Pargieła, A. Malczewska, K. Strząbała, M. Michalczak, and Ł. Ambroziński, "Evaluation of LiDAR Odometry and Mapping Based on Reference Laser Scanning," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. XLVIII-1/W3-2023, pp. 79–84, 2023, doi: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W3-2023-79-2023.
- [13] K. Mirzaei, M. Arashpour, H. Li, E. Asadi, H. Masoumi, and A. Behnood, "Automatic Generation of Structural Geometric *Digital twins* from *Point clouds*," *Sci. Rep.*, vol. 12, Art. no. 22321, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-26307-7.