PEMINDAIAN OBJEK JALAN MENGGUNAKAN SOLID-STATE LIDAR

Muhamad Agung Fabiyanto¹, M. Abdul Basyid¹, G A Jessy Kartini¹

¹Program Studi Teknik Geodesi, FTSP – Institut Teknologi Nasional, Bandung Email: agungfabiyanto10@gmail.com

ABSTRAK

Pemodelan 3D menggunakan Solid-State LiDAR merupakan suatu teknologi yang menawarkan kemudahan dalam kegiatan pengukuran seperti pemetaan jalan. Namun pemanfaatannya yang belum massive dan maksimal menjadikan sebuah pertanyaan apakah perangkat ini mampu untuk dijadikan acuan pemetaan. Karenanya diperlukan pertimbangan hasil menggunakan perangkat ini dan bagaimana cara akuisisi data yang baik. Maka dari itu pada penelitian kali ini dilakukan pembuatan model 3 dimensi lapang tenis dan sampel jalan ITENAS dari data point cloud menggunakan perangkat iPhone, menggunakan 4 skenario pada setiap lokasi penelitian, serta melakukan analisis kerapatan point cloud dan uji ketelitian dengan objek rambu ukur, sehingga penelitian ini menjadikan penggunaan Solid-State LiDAR terbukti efektif dan mampu menghasilkan ketelitian yang memenuhi untuk pemodelan 3 dimensi. Teknik akuisisi data yang baik ditunjukkan dengan akuisisi data skenario 1 menggunakan perangkat iPhone, yaitu dengan posisi perangkat yang dipegang 90° (siku-siku) serta berjalan. Ketelitian yang diberikan oleh skenario 1 rata-rata mencapai 10 cm dan hasil model tiga dimensinya pun sudah cukup baik.

Kata Kunci: Jalan, Solid-State LiDAR, Model 3D

1. PENDAHULUAN

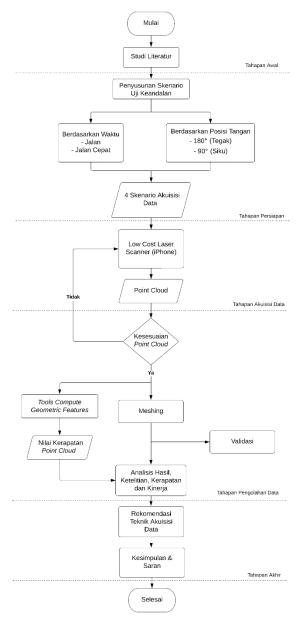
Teknologi pemantauan jalan saat ini terus berkembang, salah satunya adalah dengan menggunakan Light Detection and Ranging (LiDAR). Hasil dari perekaman LiDAR dapat menghasilkan banyak titik dalam satu waktu saat memindai obyek. Teknologi LiDAR dapat dibedakan menjadi dua, yaitu kinematic scanner dan static scanner (Pradhan & Sameen, 2017). Terrestrial Laser Scanner (TLS) tergolong kategori perangkat statis dimana dalam hal ini pengukuran objek dilakukan dengan posisi tetap. Sistem pengukuran ini mendapatkan koordinat point clouds yang relative terhadap tempat berdiri alat (Zakaria, 2016). Handheld Laser Scanner (HLS) tergolong kategori perangkat dinamis dimana dalam hal ini pengukuran objek dilakukan dengan posisi yang berubah-ubah. HLS ini memiliki prinsip menggabungkan Time of Flight (TOF) dengan unit navigasi inersia untuk merekam data spasial dari bidang pemindaian tanpa perlu menggunakan sistem navigasi satelit (Bosse, dkk, 2012). Perangkat LiDAR lainnya yang saat ini sedang diteliti beragam pihak adalah Solid-State LIDAR (SSL) yang ada pada perangkat Apple. Solid-state LiDAR bekerja dengan mengirimkan semburan foton dalam pola dan fase tertentu untuk menciptakan emisi terarah, yang fokus dan ukurannya dapat disesuaikan. SSL memiliki teknologi yang membuatnya tahan terhadap getaran dan lebih ringkas (Li dkk., 2022).

Pemanfaatan *Solid-State* LiDAR memiliki keuntungan dari segi fleksibilitas akuisisi data dan efektifitas dalam melakukan pemindaian. Penelitian ini akan melakukan eksperimen apakah SSL dapat digunakan untuk melakukan pemindaian pada objek jalan. Hasil yang diharapkan pada penelitian ini adalah bagaimana teknik akuisisi data yang disarankan dalam upaya pemindaian jalan menggunakan sensor SSL pada perangkat Apple.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Prosedur Pelaksanaan Penelitian

Penelitian dimulai dengan proses akuisisi data menggunakan iPhone 13 Pro Max yang akan menghasilkan *point cloud*. Aplikasi yang digunakan adalah SiteScape. *Point cloud* hasil akuisisi data di lapangan, diolah menggunakan *software* Cloud Compare. Pada *software* tersebut dilakukan proses *meshing*. Prosedur pelaksanaan penelitian ini dapat dilihat dalam diagram alir pada Gambar 1. dan Gambar 2.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2 Tahapan Awal

Tahapan awal dilakukan sebelum penelitian dilaksanakan. Hal-hal yang perlu dilakukan agar penelitian dapat berjalan dengan baik seperti studi literatur, Studi literatur bertujuan untuk mendapatkan berbagai referensi yang berhubungan dengan pembuatan model 3D untuk uji keandalan perangkat dan juga menjadi perbandingan hasil antar perangkat dan skenario.

2.3 Tahapan Persiapan

Tahap persiapan dilakukan sebelum penelitian dilaksanakan. Hal-hal yang perlu dilakukan agar penelitian dapat berjalan dengan baik antara lain, studi literatur, perencanaan skenario, penentuan dan survei lokasi pengukuran dan pengadaan alat.

1. Penyusunan skenario dilakukan untuk menjadi pertimbangan akuisisi data mana yang memberikan hasil yang maksimal. Perencanaan ini didasarkan atas pertimbangan perangkat yang bersifat fleksibel dan dinamis, skenario dibentuk dengan cara mempertimbangkan waktu akuisisi data dengan membedakan antara jalan dan jalan cepat, skenario juga mempertimbangkan jalur pengakuisisan data, sebagai contoh dalam penelitian ini menggunakan jalur pengakuisisian data secara zigzag dan tegak lurus, lalu cara menggengam alat pun menjadi pertimbangan perencanaan skenario, posisi lengan ketika mengenggam perangkat dengan 90° atau membentuk sudut siku siku seperti pada gambar 3. dan ketika mengenggam perangkat dengan 180° atau membentuk sudut lurus seperti pada gambar 4.







Gambar 3. 180° (sudut lurus)

Sehingga dari pertimbangan diatas terdapat 4 skenario utama dalam penelitian ini yang dapat dilihat pada tabel 3.1 berikut:

Tabel 1. Informasi Skenario

Skenario	Kecepatan Pengakuisisian Data	Mengenggam Alat	
1	Berjalan	90° (Siku-Siku)	
2	Berjalan cepat	90° (Siku-Siku)	
3	Berjalan cepat	180° (Sudut Lurus)	
4	Berjalan	180° (Sudut Lurus)	

- 2. Penentuan dan survei lokasi pengukuran, pada tahap penentuan lokasi dilaksanakan dengan mempertimbangkan material pembentuk objek dan ramainya keadaan lingkungan di sekitar objek penelitian, oleh karena itu peneliti menentukan lokasi penelitian di lapangan tenis dan sampel jalan ITENAS, sebagai lokasi pemindaian dan uji keandalan.
- 3. Pembuatan rencana jalur pemindaian, jalur pemindaian pada lokasi penelitian. Kerapatan dan panjang jalur pemindaian mempertimbangkan cakupan lokasi. Hasil yang diperoleh setelah melaksanakan pembuatan rencana jalur berupa estimasi waktu yang dibutuhkan untuk melaksanakan pengukuran, jalur pengakuisisian data dan jumlah personil yang dibutuhkan

2.4 Tahapan Pengakuisian Data

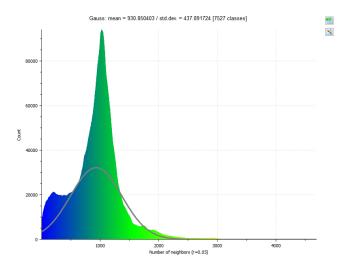
Tahapan pengakuisisian data dilakukan untuk mengumpulkan data-data yang diperlukan dalam penelitian ini. Data-data yang dibutuhkan merupakan data *point cloud* yang didapatkan dari pengukuran langsung menggunakan *Solid-State LiDAR*. Proses pengakuisisian data antar perangkat diawali dengan penentuan titik awal dan titik akhir proses pemindaian agar antar skenario dan perangkat memiliki kesamaan jalur penelitian, lalu dalam melakukan pemindaian, pemindaian menggunakan *Solid-State LiDAR* dibantu dengan perangkat lunak SiteScape mengikuti jalur pemindaian yang sudah ditentukan pada tahapan persiapan, setelah melakukan akuisisi data penelitian unduh data pemindaian dalam berbagai format seperti .E57, dan .ply sesuai dengan kebutuhan pengolahan

2.5 Tahapan Pengolahan Data

Tahapan Pengolahan data dilakukan setelah memiliki data *point cloud* hasil pengukuran lapangan, tahap ini menggunakan perangkat lunak CloudCompare. Pada tahapan awal peneliti perlu menormalisasikan nilai *point cloud* agar memudahkan proses pembentukan model 3 dimensi.

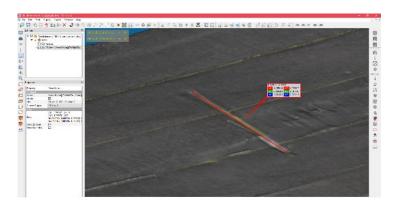
Membuat model 3 dimensi pada penelitian ini peneliti menggunakan proses *meshing*, hasil dari proses *meshing* ini digunakan untuk menganalisis bentuk permukaan hasil pemindaian. Diharapkan pada hasil proses ini rambu ukur sebagai objek validasi yang akan dianalisa terlihat dan mengetahui hasil antar skenario proses akuisisi data yang menghasilkan model 3 dimensi secara maksimal sesuai dengan keadaan sebenarnya di lapangan.

Pembuatan model 3 dimensi ini tidak terlepas dari pengaruh kerapatan *point cloud*, dari hasil *filtering* yang sudah dilakukan dapat dilihat kerapatan *point cloud* pada area penelitian dengan menggunakan *tools* (*Compute stats. Params Active SF*), namun sebelumnya radius analisis kerapatan *point cloud* dirubah terlebih dahulu perskenario dan lokasi penelitiannya menjadi 5 cm, hasil dari penggunaan *tools* (*Compute stats. Params Active SF*)



Gambar 4. Diagram Kerapatan Point Cloud

Setelah terbentuknya model 3 dimensi dari tiap skenario dari lokasi penelitian. Selanjutnya dilakukan proses validasi, proses ini akan menyimpulkan hasil, kelebihan dan kekurangan dari masing-masing skenario. Proses validasi ini penliti akan melakukan identifikasi visual rambu ukur yang telah diletakkan pada objek jalan. Setelah dilakukannya proses validasi pada hasil model 3 dimensi pada lokasi penelitian, maka dilakukannya uji ketelitian model 3 dimensi hasil pemindaian dari perangkat yang dikaitkan secara geometri, dengan cara menghitung panjang rambu ukur secara *real* dilapangan dengan meghitung panjang rambu ukur pada model 3 dimensi hasil proses *meshing*, dilakukan pengukuran dengan *pointpicking tools*.



Gambar 5. Proses *Pointpicking* pada Hasil *Meshing* iPhone

2.6 Tahapan Akhir

Pada tahapan akhir ini ditampilkan hasil model 3 dimensi dari setiap perangkat dan skenario, tabulasi kerapatan *point cloud* dan tabulasi hasil ketelitiannya, untuk dianalisa dan disimpulkan sebagai hasil keluaran rekomendasi penggunaan perangkat dan cara akuisisi data secara maksimal, lalu pada tahapan ini juga akan dilampirkan kesimpulan dan saran dalam penelitian ini, sebagai masukan dan arahan bagi penelitian selanjutnya.

3. HASIL DAN ANALISIS

3.1 Hasil Model 3 Dimensi

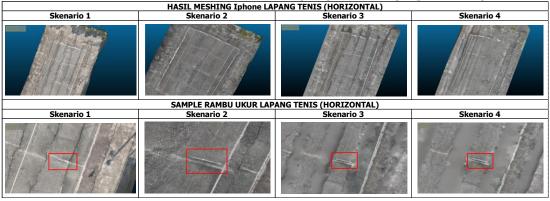
Hasil pengolahan *point cloud* proses pengakuisisian data menggunakan perangkat iPhone pada lokasi penelitian lapangan tenis dan jalan ITENAS yang sudah dilakukan proses *meshing* hingga menjadi model 3 dimensi dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. Model 3 Dimensi iPhone Lapangan Tenis (Zigzag)



: Visualisasi Rambu Ukur Pada Hasil Model 3 dimensi

Tabel 3. Model 3 Dimensi iPhone Lapangan Tenis (Tegak Lurus)



: Visualisasi Rambu Ukur Pada Hasil Model 3 dimensi

Tabel 4. Model 3 Dimensi iPhone Jalan ITENAS (Zigzag)



: Visualisasi Rambu Ukur Pada Hasil Model 3 dimensi

Tabel 5. Model 3 Dimensi iPhone Jalan ITENAS (Tegak Lurus)

HASIL MESHING Iphone JALAN ITENAS (HORIZONTAL)

Skenario 1 Skenario 2 Skenario 3 Skenario 4

SAMPLE RAMBU UKUR JALAN ITENAS (HORIZONTAL)

Skenario 1 Skenario 2 Skenario 3 Skenario 4

: Visualisasi Rambu Ukur Pada Hasil Model 3 dimensi

Model 3 dimensi hasil pemindaian menggunakan iPhone pada setiap lokasi penelitian dan jalur penelitian, dilakukan menggunakan skenario yang telah ditentukan. Pada model 3 dimensi setiap skenario ditemukan berbagai variasi hasil model 3 dimensi, dari ke-4 skenario yang telah dilakukan skenario 1 memberikan hasil yang maksimal pada pembuatan model 3 dimensi dengan hasil model 3 dimensi yang sedikit sekali memiliki *noisy point* dan memiliki bidang pandang pemindaian yang lebih luas maka pada hasil modelnyapun rambu ukur untuk kepentingan uji ketelitian mudah untuk diidentifikasi, sedangkan pada skenario lainnya hasil model tiga dimensi masih ditemukan banyak titik yang tidak terpindai dikarenakan bidang pandang iPhone yang kecil.

3.2 Analisis Kerapatan *Point Cloud*

Dari analisis visual sepintas pada hasil model 3 dimensi terlihat cukup jelas bahwa hasil model 3 dimensi dari ke empat skenario memiliki cukup perbedaan, dalam hal kerapatan titik dan kelengkapan informasi. Dengan demikian dilakukan analisis kerapatan *point cloud* menggunakan *software* CloudCompare. Hasilnya dapat dilihat pada tabel 6 hingga tabel 9.

Tabel 6. Kerapatan Point Cloud Skenario 1 (Berjalan / 90°)

		Jalur	Skenario 1			
Alat	Lokasi Penelitian	Penelitian	Radius (m)	Kerapatan <i>Point Cloud</i> (Mean)		
	Lapangan Tenis	Zig-Zag	0,05	1004		
iPhone		Tegak Lurus	0,05	931		
irilone		Zig-Zag	0,05	5108		
	Jalan ITENAS	Tegak Lurus	0,05	5678		
			\bar{x} =	3180,25		

Tabel 7. Kerapatan Point Cloud Skenario 2 (Berjalan Cepat / 90°)

			Skenario 2		
Alat	Lokasi Penelitian	Jalur Penelitian	Radius (m)	Kerapatan <i>Point Cloud</i> (Mean)	
	Lapangan Tenis	Zig-Zag	0,05	1322	
:Dhana		Tegak Lurus	0,05	347	
iPhone		Zig-Zag	0,05	2467	
	Jalan ITENAS	Tegak Lurus	0,05	3554	
			\bar{x} =	1922,5	

Tabel 8. Kerapatan *Point Cloud* Skenario 3 (Berjalan Cepat / 180°)

	_		Skenario 3			
Alat	Lokasi Penelitian	Jalur Penelitian	Radius (m)	Kerapatan <i>Point Cloud</i> (Mean)		
	Lapangan Tenis	Zig-Zag	0,05	4152		
iPhone		Tegak Lurus	0,05	1092		
irrione		Zig-Zag	0,05	5122		
	Jalan ITENAS	Tegak Lurus	0,05	3538		
			\bar{x} =	3476		

Tabel 9. Kerapatan *Point Cloud* Skenario 4 (Berjalan / 180°)

			Skenario 4		
Alat	Lokasi Penelitian	Jalur Penelitian	Radius (m)	Kerapatan <i>Point Cloud</i> (Mean)	
	Lapangan Tenis Jalan ITENAS	Zig-Zag	0,05	6127	
iPhone		Tegak Lurus	0,05	1337	
irnone		Zig-Zag	0,05	10238	
		Tegak Lurus	0,05	4118	
			\bar{x} =	5455	

Hasil kerapatan *point cloud*, tidak terlepas dari peran sensor yang digunakkan yaitu *solid-state* LiDAR, dalam melakukan generate *point cloud* dibantu oleh perangkat lunak yang digunakkan, tentunya perangkat lunak pada IOS ini berbeda-beda maka hasil kerapatannya pun akan memiliki perbedaan. Menurut (Teppati Losè, 2022) perangkat lunak SiteScape memberikan 200-2.000.000 poin/m² pada jarak 1 m pada permukaan objek penelitian, maka dari itu perangkat lunak SiteScape memungkinkan memperoleh jumlah *point cloud* yang lebih tinggi dibandingkan dengan 3D *App Scanner* dan *every point*. Jarak perangkat dengan objek pun menjadi faktor kerapatan *point cloud*, pada tabel 8. kerapatan *point cloud* skenario 3 (berjalan cepat / 180°) dan pada tabel 9. kerapatan *point cloud* skenario 4 (berjalan / 180°) memberikan kerapatan *point cloud* yang lebih besar dikarenakan cara menggenggam perangkat dengan sudut lurus atau menghadap langsung pada objek.

3.3 Analisis Ketelitian Skenario

Rambu ukur yang sudah diletakkan pada lapang tenis maupun jalan ITENAS diukur panjangnya menggunakan pita ukur untuk mendapatkan nilai panjang rambu ukur sebenarnya. Nilai panjang rambu ukur sebenarnya tersebut menjadi nilai acuan ketelitian untuk dibandingkan dengan nilai panjang rambu ukur pada hasil model 3 dimensi, selisih diantara nilai-nilai tersbeut menjadi nilai ketelitian. Pada tabel 10. hinggan tabel 13. Merupakan hasil analisis nilai ketelitian dari skenario dan lokasi penelitian dari pengakusisian perangkat iPhone.

Tabel 10. Ketelitian Skenario 1 (Berjalan / 90°)

			Sken		
Alat	Lokasi Penelitian	Jalur Penelitian	Panjang Rambu Ukur Model 3D (m)	Panjang Rambu Ukur Sebenarnya (m)	Selisih
	Lapangan Tenis	Zig-Zag	1,1112	1,27	0,16
:Dhana		Tegak Lurus	1,3157	1,27	0,05
iPhone	Jalan ITENAS	Zig-Zag	1,3217	1,27	0,05
	Jaidii I I ENAS	Tegak Lurus	1,4042	1,27	0,13
	$ar{x}$ =				

Tabel 11. Ketelitian Skenario 2 (Berjalan Cepat / 90°)

			Sken		
Alat	Lokasi Penelitian	Jalur Penelitian	Panjang Rambu Ukur Model 3D (m)	Panjang Rambu Ukur Sebenarnya (m)	Selisih
	Lapangan Tenis	Zig-Zag	1,0815	1,27	0,19
iPhone		Tegak Lurus	1,4158	1,27	0,15
iPhone	Jalan ITENAS	Zig-Zag	1,4021	1,27	0,13
	Jaidii ITENAS	Tegak Lurus	1,4312	1,27	0,16
				$\bar{\chi}$ =	0,16

Tabel 12. Ketelitian Skenario 3 (Berjalan Cepat / 180°)

			Sken		
Alat	Lokasi Penelitian	Jalur Penelitian	Panjang Rambu Ukur Model 3D (m)	Panjang Rambu Ukur Sebenarnya (m)	Selisih
	Lapangan Tenis	Zig-Zag	1,0546	1,27	0,22
:Dhono		Tegak Lurus	1,4129	1,27	0,14
iPhone Jalan I	Jalan ITENAS	Zig-Zag	1,4413	1,27	0,17
	Jaian TENAS	Tegak Lurus	1,6321	1,27	0,36
			_	=	0,22

Tabel 13. Ketelitian Skenario 4 (Berjalan / 180°)

			Sken		
Alat	Lokasi Penelitian	Jalur Penelitian	Panjang Rambu Ukur Model 3D (m)	Panjang Rambu Ukur Sebenarnya (m)	Selisih
	Lapangan Tenis Jalan ITENAS	Zig-Zag	1,1121	1,27	0,16
iPhone		Tegak Lurus	1,3829	1,27	0,11
iPhone		Zig-Zag	1,3911	1,27	0,12
		Tegak Lurus	1,3921	1,27	0,12
				=	0,13

Analisis ini dilakukan guna mengetahui keakuratan dari setiap skenario yang dilakukan dengan objek rambu ukur. Hasil model 3 dimensi setiap pengakuisisian data diidentifikasi rambu ukurnya lalu dikaitkan dengan ketelitian secara geometri. Dari data tabulasi diatas, didapatkan nilai ketelitian yang paling kecil yaitu dengan nilai **10 cm** pada proses pemindaian menggunakan skenario 1 dengan menggenggam alat pada posisi 90° (Siku-Siku) dengan cara berjalan. Ketelitian dari iPhone dinilai cukup baik dikarenakan menggunakan sensor *solid-state* LiDAR sehingga pada skenario 3 dan 4 yang dalam pengakusisian datanya secara berjalan cepat, *solid-state* LiDAR ini dapat mengurangi guncangan dan getaran menjadikan hasil pemindaian menangkap informasi sesuai dengan keadaan dilapangan, namun jangkauan pemindaian yang kecil membuat hasil analisis ketelitian menggunakan perangkat iPhone pada skenario 3 dan 4 menjadi kurang maksimal dikarenakan adanya hasil model 3 dimensi rambu ukur yang tidak terpandai sempurna pada jalur penelitian.

3.4 Analisis Kinerja Skenario

Tabel 18. Analisis Kinerja Skenario

	label 16. Alialisis Killerja Skellario							
Skenario		Aspek	Keterangan	Predikat				
Skenario		Visual	Kerapatan / 5 cm	Ketelitian				
1	• •	Terdapat <i>noise</i> pada sekitar bagian rambu ukur. Visualisasi rambu ukur yang mudah diidentifikasi.	3180,25 Titik <i>Point</i>	$\bar{x} = 10 \ cm$	Sangat Baik	A		
2	•	Terdapat beberapa <i>noise</i> pada bagian rambu ukur dan ujung pada lokasi penelitian. Visualisasi rambu ukur mudah diidentifikasi, tetapi peneliti kesulitan menentukan <i>point cloud</i> sisi rambu ukur.	1922,5 Titik Point	$\bar{x} = 16 \text{ cm}$	Cukup	С		
3	•	Terdapat banyak sekali <i>noise</i> pada hasil 3 dimensi. Hasil model 3 dimensi terdapat <i>point cloud</i> yang tidak akurat sesuai dengan keadaan dilapangan. Visualisasi rambu ukur sulit dilakukan.	3476 Titik Point	$\bar{x} = 22 \ cm$	Kurang	D		
4	•	Memiliki <i>noisy point cloud</i> yang sedikit. Visualisasi rambu ukur mudah didentifikasi.	5455 Titik Point	$\bar{x} = 13 \text{ cm}$	Baik	В		

Penilaian kualitatif dilakukan dengan mempertimbangkan hasil pemindaian model 3 dimensi, analisa kerapatan dan uji ketelitian data pengukuran dilapangan. Maka dapat disimpulkan bahwa kualitas hasil dengan predikat **A / SANGAT BAIK** dilakukan dengan menggunakan skenario 1 dan kualitas hasil dengan predikat **D / KURANG** dilakukan dengan menggunakan skenario 3.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1.Kesimpulan

Setelah dilakukannya penelitian ini dari proses akuisisi data hingga tahap pengolahan data, maka dapat ditarik kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1. Hasil model 3 dimensi lapangan tenis dan jalan ITENAS, dimodelkan secara baik dengan *solid-state* LiDAR, skenario 1 dan 4 memberikan hasil yang paling maksimal pada visualisasi 3 dimensi, skenario 1 sendiri masih terdapat beberapa *noisy point* pada hasil 3 dimensi akan tetapi informasi rambu ukur di pindai dengan baik sehingga proses identifikasi rambu ukur sangatlah mudah, sedangkan pada skenario 4 *noisy point* yang terdapat pada hasil 3 dimensi sangatlah sedikit, tetapi informasi rambu ukur kurang terpandai dengan baik sehingga proses identifikasi rambu ukur pada skenario 4 mengalami kendala, namun dari seluruh skenario visualisasi model 3 dimensi cukup detail dengan keadaan nyata dilapangan, pada tingkat ketelitian perangkat, perangkat memberikan ketelitian rata- rata dari semua skenario yang sudah dilakukan sebesar 13 cm, namun pada skenario 3 dan 4 pada lapangan itenas, ada beberapa titik dari lapangan yang tidak terpandai dikarenakan bidang pandang iPhone yang terbatas.
- 2. Teknik akuisisi data yang baik ditunjukkan dengan akuisisi data skenario 1 yaitu dengan posisi perangkat yang dipegang 90° (siku-siku) serta berjalan. Ketelitian yang diberikan oleh skenario 1 rata-rata mencapai 10 cm dan hasil model tiga dimensinya pun sudah cukup baik.

4.2. Saran

Penelitian ini tentu tidak luput dari ketidaksempuraan sehingga diharapkan nantinya penelitian ini akan dilanjutkan dan disempurnakan agar semakin lebih baik. Beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu:

- Penggunaan spesifikasi perangkat yang lebih tinggi untuk membandingkan hasil pemindaian perangkat, agar tingkat ketelitian dapat dibandingkan dengan lebih kompleks lagi seperti iPhone seri terbaru atau iPad.
- 2. Pada pelaksanaan akuisisi data masih terdapat beberapa titik yang tidak terpindai, maka diperlukannya penambahan jalur penilitian mengingat cakupan pandang iPhone yang terbatas dan pada proses pelaksaan akuisisi data untuk memaksimalkan fitur dan data *point cloud* lakukan pemindaian secara *loop* agar hasil akan lebih maksimal.
- 3. Pemilihan lokasi penelitian dilakukan di objek jalan yang memiliki kerusakan jalan yang cukup besar, agar model 3 dimensi menjadi pertimbangan apakah perangkat ini mampu untuk memodelkan kerusakan pada jalan bermaterialkan aspal.
- 4. Uji ketelitian dapat dimaksimalkan kembali menggunakan perangkat *total station* atau distometer, agar data yang diperoleh dapat menjadi acuan yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

______. 2004. *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2004 Tentang Jalan*. Pemerintah Republik Indonesia. Jakarta. 43 hlm

- Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D city models: State of the art review. ISPRS International Journal of Geo-Information, 4(4), 2842-2889.
- Bosse, M., Zlot, R. and Flick, P., 2012. Zebedee: design of a spring-mounted 3-D range sensor with application to mobile mapping. IEEE Transactions on Robotics, 28(5): 1104–1119.
- CloudCompare. 2020. CloudCompare User Manual. CloudCompare.
- Dhanardono, B., & Hamdani, D. (2022). APLIKASI TERRESTRIAL LASER SCANNER DALAM SIKLUS SIDLACOM JALAN JEMBATAN. *Prosiding KRTJ-HPJI*, 10-10.
- Gollob, Christoph, Tim Ritter, Ralf Kraßnitzer, Andreas Tockner, and Arne Nothdurft. 2021. "Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology" *Remote Sensing* 13, no. 16: 3129. https://doi.org/10.3390/rs13163129
- Jananuragadi. 2010. Rekonstruksi Model 3D dengan Menggunakan Alat Image Station dan Terrestrial Laser Scanner. Tugas Akhir. ITB. Bandung.
- Kartini, Gusti Ayu Jessy & Gumilar, Irwan & Abidin, Hasanuddin Z. & Yondri, Lutfi. (2022). The Comparison of Different LiDAR Acquisition Software on iPad Pro M1 2021. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLVIII-2/W1-2022. 117-120. 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-117-2022.
- King, Fraser & Kelly, Richard & Fletcher, Christopher. (2022). Evaluation of LiDAR-derived Snow Depth Estimates from the iPhone 12 Pro. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 19. 1-1. 10.1109/LGRS.2022.3166665.
- Li, N., Ho, C. P., Xue, J., Lim, L. W., Chen, G., Fu, Y. H., & Lee, L. Y. T. (2022). A progress review on solid-state LiDAR and nanophotonics-based LiDAR sensors. *Laser & Photonics Reviews*, *16*(11), 2100511.
- Mashuri. 2010. Karakteristik Aspal Sebagai Bahan Pengikat Yang Ditambahkan Styrofoam. Palu.
- Määttä, K., Kostamovaara, J., & Myllylä, R. (1993). Profiling of hot surfaces by pulsed time-of-flight laser range finder techniques. *Applied Optics*, *32*(27), 5334-5347.
- MILL, T., ALT, A., dan LIIAS, R. (2013). Combined 3D Building Surveying Techniques Terrestrial Laser Scanning (TLS) And Total Station Surveying For BIM Data Management Purposes. Journal Of CIvil Engineering And Management, 19, S23-S32. doi:ISSN: 1822-3605
- Quintero, M. S., Genechten, B. V., Bruyne, M. D., Ronald, P., Hankar, M., dan Barnes, S., .2008. Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning. Project (3DriskMapping).
- Peraturan menteri pekerjaan umum dan perumahan rakyat republik indonesia nomor 18/PRT/M/2018 tentang penggunaan aspal buton untuk pembangunan dan preservasi jalan.
- Permana, Rezza. 2009. Studi sifat rheologi aspal yang dimodifikasi limbah tas plastik. Surabaya: Universitas Kristen Petra Surabaya.Pradhan, B., & Sameen, M. I. (2017). Laser Scanning Systems in Landslide Studies. In B. Pradhan, Laser Scanning Applications in Landslide Assessment (pp. 3-19). Seri Kembangan: Springer Internatioal.
- Quintero, M. S., Van Genechten, B., De Bruyne, M., Poelman, R., Hankar, M., Barnes, S., et al. (2008). *3D Risk Mapping Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning.* St. Lieven: Flemish Agency of the European Leonardo Da Vinci programme.
- Rabbani, R. (2019). Kajian Model 3D Bangunan Bendung menggunakan Metode BIM dengan Tingkat Kedetailan Bervariasi / Multi-LOD (Level of Detail), Studi Kasus: Bendungan Menganti, Ciamis, Bandung.
- Rahmawati, N., & Prasetyo, Y. (2020). PEMODELAN MODEL 3D MENGGUNAKAN METODE TLS (TERRESTRIAL LASER SCANNER) (STUDI KASUS: CANDI PLAOSAN LOR, KABUPATEN KLATEN). *Jurnal Geodesi Undip*, 10(1), 224-232.

- Riadi, Muchlisin. (2019). Fungsi, Sifat, Jenis dan Analisis Pengujian Aspal.
- Saputra, A. D. (2018). Studi Tingkat Kecelakaan Lalu Lintas Jalan di Indonesia Berdasarkan Data KNKT (Komite Nasional Keselamatan Transportasi) dari Tahun 2007-2016. *Warta Penelitian Perhubungan, 29*(2), 179-190.
- Sukirman, S., 2003. Perkerasan Jalan Raya. Bandung: NOVA.
- Sodikin, I. (2010). Analisis penentuan waktu perawatan dan jumlah persediaan suku cadang rantai garu yang optimal. Jurnal Teknologi, 3(1), 44-52.
- Spreafico, A., Chiabrando, F., Teppati Losè, L., & Giulio Tonolo, F. (2021). The ipad pro built-in lidar sensor: 3d rapid mapping tests and quality assessment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *43*, 63-69.
- Teppati Losè, Lorenzo, Alessandra Spreafico, Filiberto Chiabrando, and Fabio Giulio Tonolo. 2022. "Apple LiDAR Sensor for 3D Surveying: Tests and Results in the Cultural Heritage Domain" *Remote Sensing* 14, no. 17: 4157. https://doi.org/10.3390/rs14174157
- Winkelbach, S., Molkenstruck, S., & Wahl, F. M. (2006). Low-cost laser range scanner and fast surface registration approach. In *Pattern Recognition: 28th DAGM Symposium, Berlin, Germany, September 12-14, 2006. Proceedings 28* (pp. 718-728). Springer Berlin Heidelberg.
- Zakaria, A. (2016). Studi Pemodelan 3D Menggunakan Terrestrial Laser Scanner Berdasarkan Proses Registrasi Cloud to Cloud dan Target to Target (Studi Kasus: Candi Brahu, Mojokerto). Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.