

Digitalisasi Industri Konstruksi dengan Integrasi BIM dan *3D Machine Control* untuk Meningkatkan Performa Pelaksanaan Konstruksi

Iwan Hermawan ^{[1]*}, Sutardi Sudirman ^[2]

^{[1]*} Divisi Perencanaan Jalan Tol, PT Hutama Karya (Persero), Jakarta Timur, 13340, Indonesia

^[2] Magister Teknik Sipil, Universitas Trisakti, Jakarta Barat, 11440, Indonesia

Email: iwan_hermawan_st@yahoo.co.uk*, sutardi10353@yahoo.com

*) Correspondent Author

Received: 02 November 2022; Revised: 07 August 2023; Accepted: 08 August 2023

How to cited this article:

Hermawan, I., Sudirman, S., (2023). Digitalisasi Industri Konstruksi dengan Integrasi BIM dan *3D Machine Control* untuk Meningkatkan Performa Pelaksanaan Konstruksi. Jurnal Teknik Sipil, 19(2), 185–XX. <https://doi.org/10.28932/jts.v19i2.4497>

ABSTRAK

Pemerintah Republik Indonesia melalui Peraturan Presiden Nomor 100 tahun 2014 dan Peraturan Presiden Nomor 117 tahun 2015 menargetkan pembangunan Jalan Tol Trans Sumatera dari Bakauheni sampai dengan Banda Aceh sepanjang 2770 km dapat dibangun seluruhnya pada tahun 2024. Dua tahap yang menjadi kunci dalam pelaksanaan proyek adalah perencanaan dan pelaksanaan. Tahap perencanaan dilaksanakan menggunakan *Building Information Modelling* (BIM), tahap pelaksanaan mengintegrasikan data BIM dengan *3D Machine Control*. Penelitian ini dilakukan dengan studi kasus proyek Jalan Tol Trans Sumatera ruas Pekanbaru – Bangkinang sepanjang 40 km. Metode pengambilan data dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif melalui eksperimen lapangan. Dilakukan pengkajian akurasi *digital survey* LiDAR UAV sebagai data topografi, pengkajian implementasi BIM pada *Level of Development* (LoD) 200, 300 dan 400, serta menguji efisiensi penggunaan *3D Machine Control Motor Grader* pada pekerjaan pemotongan elevasi, serta penggunaan *3D Machine Control Vibro Compactor* untuk pemadatan tanah pada lapisan *subgrade* dan *base A*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa data topografi hasil LiDAR UAV akurat, dengan akurasi LE90 sebesar 0,176 cm. Pemanfaatan *3D Machine Control* yang optimal dapat membuat pelaksanaan pekerjaan tanah di lapangan sesuai dengan desain dan juga sebagai kontrol kuantitas serta mutu pekerjaan tanah. Diperoleh efisiensi waktu sebesar 47% pada penggunaan *3D Machine Control Motor Grader*.

Kata kunci: *Building Information Modelling*, *3D Machine Control*, Efisiensi, Jalan Tol

ABSTRACT. *Digitalization of The Construction Industry with BIM and 3D Machine Control Integration for Construction Performance Improvement. The Government of the Republic of Indonesia through Presidential Regulation Number 100 of 2014 and Presidential Regulation Number 117 of 2015 aims the construction of the 2770 km Trans Sumatra Toll Road from Bakauheni to Banda Aceh to be fully constructed by 2024. There are two key stages in the project phase, i.e planning and construction stages. The planning stage is carried out using the Building Information Model (BIM), while the construction phase integrates BIM with 3D-Machine-Control. This study is conducted in Trans Sumatera Pekanbaru - Bangkinang's Toll Road with 40 kilometers long as a study case. The data acquisition methodology is conducted using qualitative and quantitative methods throughout the field's experiments. This study conducted the examination of the LiDAR UAV digital survey's accuracy, the BIM implementation on Level of Development (LOD) 200, 300, and 400, verification of the usage of Motor Grader with 3D-Machine-Control efficiency in elevation cutting works, and the application of Vibro Compactor with 3D-Machine-Control for improving the accuracy of soil compaction on the subgrade and base course. The results showed that the topographic data from UAV LiDAR are accurate within LE90*

accuracy with 0.176 cm. The optimalization of 3D-Machine-Control could carry out the earthworks as similar as design also can be used as quality and quantity control. The time efficiency which obtained from implementing Motor Grader with 3D-Machine-Control for elevation cutting application is 47%.

Keywords: *Building Information Modelling, 3D Machine Control, Efficiency, Toll Road*

1. PENDAHULUAN

Pemerintah Republik Indonesia melalui Peraturan Presiden Nomor 100 tahun 2014 dan Peraturan Presiden Nomor 117 tahun 2015 menargetkan pembangunan Jalan Tol Trans Sumatera dari Bakauheni sampai dengan Banda Aceh sepanjang 2770 km dapat terbangun seluruhnya pada tahun 2024. Dengan ketatnya target pelaksanaan, ada tuntutan optimalisasi biaya, mutu, dan waktu sehingga pekerjaan di lapangan dapat dilaksanakan secara efektif, efisien, dan sesuai dengan desain yang telah direncanakan.

Terdapat dua tahap yang menjadi kunci dalam sebuah proyek yaitu tahap perencanaan dan tahap pelaksanaan. Tahap perencanaan dilaksanakan menggunakan *Building Information Model (BIM)* dimana proses pengecekan desain maupun penjadwalan dilakukan secara digital. Melalui BIM, proses perencanaan dapat dilakukan dengan efektif dimana tersedianya informasi visual serta terdeteksinya masalah dalam desain jauh sebelum desain tersebut dilaksanakan di lapangan. BIM juga memungkinkan adanya kolaborasi antar *stakeholder* untuk melakukan pengecekan desain maupun penjadwalan. Proses pembangunan dalam suatu proyek sering mengalami berbagai kendala yang mengakibatkan adanya ketidaksesuaian antara data desain dan keadaan lapangan serta tidak tercapainya mutu, waktu dan biaya yang diharapkan. Untuk mencapai hal tersebut diperlukan integrasi langsung antara desain digital menggunakan BIM dengan proses konstruksi melalui alat berat untuk dapat mengurangi kendala yang muncul akibat *human error* saat proses konstruksi. Salah satu solusinya adalah menggunakan *3D Machine Control* pada pekerjaan tanah.

3D Machine Control merupakan sistem yang dapat mengintegrasikan data desain digital ke dalam alat berat (*excavator, motor grader, dan vibro roller*) untuk pekerjaan tanah yang digunakan sehingga biaya, mutu, waktu dan *manpower* menjadi efisien. Dengan kombinasi *3D Design* dan data *geoposition*, operator alat berat dapat diberikan gambaran mengenai bentuk dan hasil yang akan dicapai dalam melaksanakan pekerjaan tanah hanya dalam sebuah tampilan di kabin alat. *3D Machine Control* juga dapat digunakan sebagai sarana monitoring secara *real-time* serta transparan melalui hasil pekerjaan dalam bentuk digital.

Informasi posisi untuk menentukan area pekerjaan dan merekam data *progress* berbasis spasial secara *real-time* diperoleh dengan memanfaatkan teknologi *Real Time Kinematic (RTK)-GNSS*. Terdapat minimal dua *receiver GNSS* yang digunakan, satu unit sebagai *base station* dan satu unit sebagai *rover*. Penggunaan *receiver GNSS* yang berfungsi sebagai *rover* pada alat berat

berfungsi untuk memandu alat berat untuk proses *stake-out* posisi *3D Design* di lapangan (Tanoli et al., 2018a). *Rover* memperoleh koreksi posisi secara *real-time* dari 1 unit *receiver* GNSS yang berfungsi sebagai *base station*, menggunakan gelombang radio dengan protokol komunikasi *Radio Technical Commission for Maritime* (RTCM). Koreksi dari *base station* ke *rover* dipengaruhi oleh jarak antar kedua *receiver* GNSS, dimana terdapat kesalahan sebesar 2 mm setiap penambahan satu kilometer (Olivart i Llop et al., 2020). Akurasi RTK-Radio dengan jarak *base station - rover* kurang dari satu kilometer, deviasi data antara pembacaan elevasi dari *3D Machine Control* terhadap elevasi *3D Design* cocok untuk jenis pekerjaan tanah yang mensyaratkan keterimaan data ≥ 2 cm. Penggunaan multi GNSS (kombinasi pengamatan satelit GPS, GLONASS, BEIDOU, GALILEO dll) dan dengan obstruksi maksimal 60%, dapat diperoleh akurasi posisi vertikal atau elevasi (Z) mencapai 0,01 m atau satu centimeter (Andreas et al., 2019). Berdasarkan akurasi posisi yang mungkin dicapai, *3D Machine Control* juga dapat digunakan sebagai sarana monitoring secara *real-time* serta transparan melalui hasil pekerjaan yang akurat dan dalam bentuk digital.

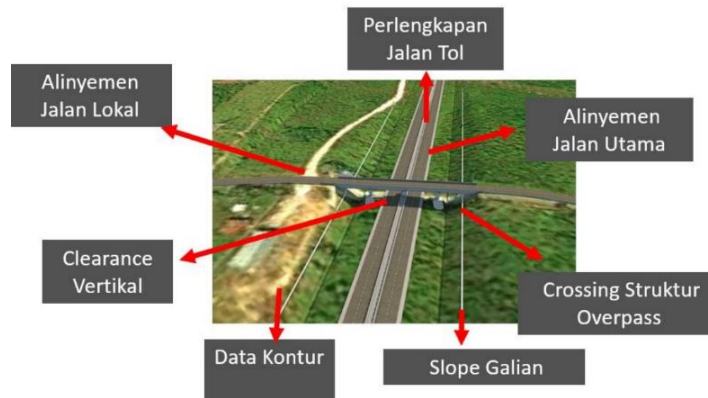
Beberapa perusahaan besar yang bergerak di bidang alat berat telah memasarkan produk *3D Machine Control* dimana berdasarkan hasil studi yang dilakukan didapatkan bahwa dengan pemakaian alat tersebut menghasilkan efisiensi hasil pekerjaan (Azar & Kamat, 2017). Penggunaan *3D Machine Control* pada pekerjaan tanah sudah banyak dilakukan dan membuat proyek menjadi lebih efisien, seperti pada proyek pembuatan instalasi pipa saluran bawah tanah, pembuatan bendungan, perluasan aliran sungai, dan pembentukan lereng (Tanoli et al., 2018a). Hanya saja penggunaan *3D Machine Control* yang sudah ada masih jarang dilakukan di proyek infrastruktur jalan (Chong et al., 2016) yang meneliti penggunaan BIM dan *3D Machine Control* di Shanghai, China dan Australia Barat, Australia. Selain itu, penggunaan *3D Machine Control* masih banyak terpaku pada alat jenis *excavator* yang lebih mengarah ke akurasi volume galian yang dikerjakan (Makkonen et al., 2017; Rasul et al., 2021; Vahdatikhaki et al., 2015).

2. METODOLOGI

2.1. Landasan Teori

2.1.1. *Building Information Modelling*

Building Information Modeling (BIM) merupakan representasi digital dari karakteristik fisik dan karakter fungsional dari suatu bangunan, terkandung semua informasi mengenai elemen-elemen bangunan yang digunakan sebagai basis pengambilan keputusan dalam kurun waktu siklus umur bangunan mulai dari konsep hingga demolisi (*Building Information Modelling*, 2019). BIM 3D model seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. BIM 3D model (Divisi Perencanaan Jalan Tol, 2021)

2.1.2. 3D Machine Control

3D Machine Control merupakan sistem pemandu operator untuk memposisikan alat yang digunakan pada posisi yang sesuai dengan data desain secara tiga dimensi, terhubung dengan *base station* melalui radio serta melalui internet untuk digunakan dalam monitoring sistem. *3D Machine Control* memiliki suatu *control box* yang menampilkan posisi alat relatif dengan data desain BIM yang telah dimasukkan pada alat. *Control box* dapat menampilkan setiap tahapan pekerjaan secara *real-time*.

3D Machine Control merupakan aplikasi turunan yang bisa diterapkan pada proyek jalan raya. Dengan sistem tersebut diharapkan menghasilkan efisiensi dari segi mutu, biaya, dan waktu. Cara kerja *3D Machine Control* seperti pada Gambar 2, menggunakan titik referensi yang didapatkan dengan penerapan teknologi *Global Navigation Positioning System* (GNSS) dan disambungkan ke komputer yang terpasang di alat berat.



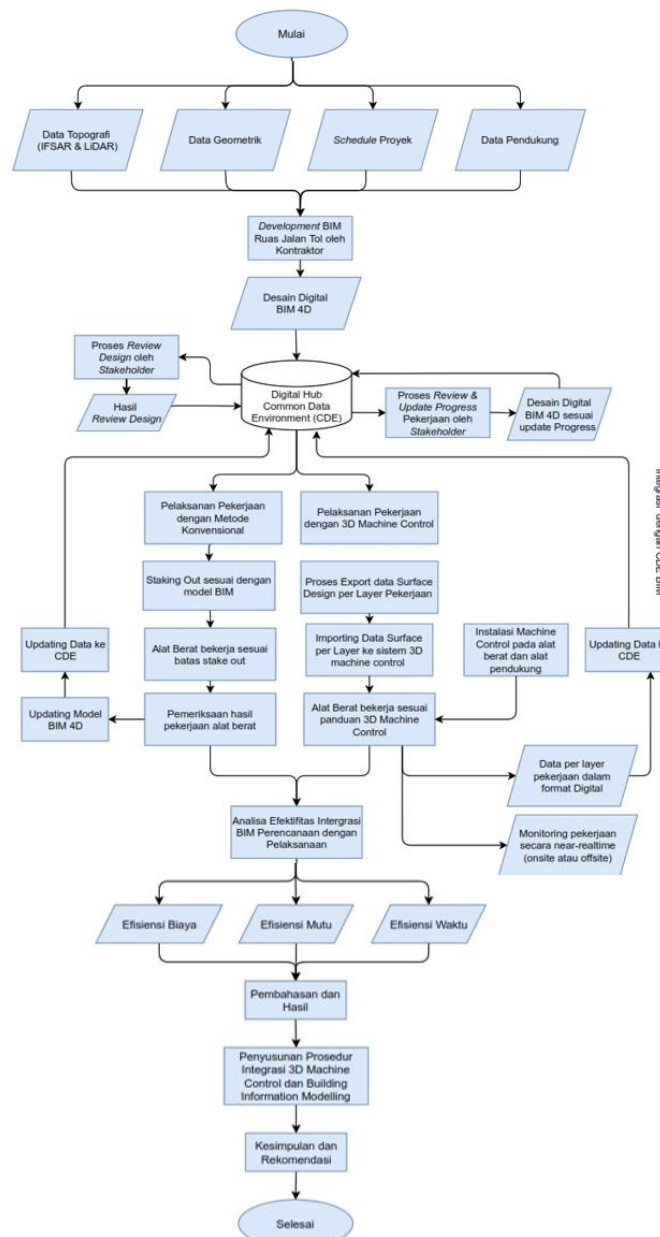
Gambar 2. Cara kerja 3D machine control (Position Indonesia, 2021)

Dengan kombinasi *3D Modelling* dan GNSS, *3D Machine Control* dapat menyajikan acuan vertikal dan horizontal secara *real-time* yang mudah dibaca oleh operator alat berat. Dengan cara kerja tersebut, pekerjaan dapat diselesaikan dalam waktu lebih singkat, biaya lebih rendah dan mutu lebih terjaga tanpa mengabaikan aspek keselamatan (White et al., 2018).

2.2. Obyek dan Lokasi Penelitian

Obyek dan lokasi penelitian adalah Proyek Jalan Tol Trans Sumatera Seksi Pekanbaru – Bangkinang STA 22+800 s.d STA 22+925, Kabupaten Kampar, Provinsi Riau.

2.3. Alur Penelitian



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Data yang diperoleh dari penelitian berupa data primer dari penggunaan alat berat dengan *3D Machine Control* dan data sekunder dari penggunaan alat berat konvensional.

2.4. Motor Grader

3D Machine Control pada *Motor Grader* bekerja dengan merekam posisi *blade* dalam 3 dimensi (x, y, z). Setelah diketahui posisi *blade* maka dapat dibandingkan dengan data desain digital sehingga diperoleh panduan elevasi dan kemiringan *blade* agar memenuhi target desain. Pada *control box* akan terlihat nilai elevasi target dari *blade* pada 3 posisi yaitu kiri, tengah dan kanan *blade* serta nilai elevasi targetnya sehingga operator dapat memposisikan *blade* untuk penghamparan yang optimal. Selain indikator nilai, terdapat indikator visual warna dimana operator dapat melihat daerah mana saja yang telah memiliki elevasi sesuai desain maupun yang masih belum sesuai pada *grade* yang ditentukan.

2.5. Vibro Roller

3D Machine Control pada *Vibro Roller* juga memiliki prinsip kerja yang sama dengan *Motor Grader* dimana sistem merekam posisi *drum/roller* dalam 3 dimensi (x, y, z). *Vibro Roller* bekerja dengan melakukan perekaman data getaran dari sensor yang dipasang pada *drum compactor*. Nilai perekaman data yang diperoleh merupakan nilai *Compaction Meter Value* (CMV) yang menggambarkan nilai kepadatan, dimana nilai tersebut telah dikalibrasi/disesuaikan terhadap hasil pengujian kepadatan konvensional (*sand cone/nuke density*). Interpretasi nilai CMV digunakan untuk mengidentifikasi objek yang berada dibawah tanah.

Data hasil pemotongan elevasi pada lapisan TSG dan *base A* dengan *Motor Grader* dan data pemadatan dengan *Vibro Compactor* baik secara konvensional maupun dengan menggunakan sistem *3D Machine Control* selanjutnya dianalisis pada aspek waktu, mutu dan biaya sesuai dengan diagram alir penelitian pada Gambar 3.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Data Topografi Hasil LiDAR

3.1.1. Akurasi Data Topografi LiDAR

Dalam penelitian ini dilakukan pengambilan data topografi dengan dua metode, yaitu (1) terestrial dan (2) LiDAR. Pengambilan data secara terestrial dilakukan dengan menggabungkan pengukuran dengan *Total Station* dan *Receiver GNSS*, sedangkan pengambilan data LiDAR menggunakan wahana *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) yang telah diinstall sensor LiDAR.

Uji akurasi LiDAR dilakukan dengan membandingkan nilai elevasi (z) hasil pengukuran metode LiDAR terhadap hasil uji pada *Bench Mark* (BM) yang sama dengan metode terestrial. Selisih kedua elevasi tersebut yang disebut sebagai akurasi elevasi LiDAR. Proses uji akurasi

menggunakan *Independent Check Point* (ICP) yang tersebar sepanjang rencana Jalan Tol Pekanbaru – Bangkinang seperti Gambar 4 dengan nilai selisih elevasi pada Tabel 1 dan statistik nilai selisih elevasi antara kedua metode pada Tabel 2.



Gambar 4. Distribusi ICP LiDAR pada Rencana Jalan Tol Pekanbaru – Bangkinang

Tabel 1. Uji Akurasi LiDAR pada ICP di Jalan Tol Pekanbaru – Bangkinang

No	Nama ICP	Elevasi Terestrial (m)	Elevasi LiDAR (m)	Selisih Elevasi (m)
1	CP.5	66,702	66,788	-0,086
2	HKI.1'	20,006	19,480	0,226
3	HKI.1A'	19,773	19,430	0,043
4	HKI.2'	22,352	22,092	0,040
5	HKI.2A'	21,650	21,287	0,063
6	HKI.3'	42,814	42,381	0,133
7	HKI.3A'	43,065	42,737	0,028
8	HKI.5	55,097	54,804	0,007
9	HKI.8	69,151	69,062	0,211
10	HKI.8A	69,599	69,598	0,299
11	HKI.9	38,853	38,345	0,208
12	HKI.9A	38,964	38,742	0,078
13	HKJT.32	19,606	19,225	0,081
14	HKJT.32A	19,416	19,109	0,007
15	HKJT.34	32,532	32,328	0,096
16	HKJT.34A	31,579	31,484	0,205
17	HKJT.35A	39,882	39,713	0,131
18	HKJT.5	63,754	63,724	0,270

Tabel 2. Statistik Selisih Elevasi Metode Terrestrial dan LiDAR

Hasil Statistik Selisih Elevasi Metode Terrestrial dan LiDAR (m)			
Minimum	Maksimum	Rerata	Simpangan Baku
0,007	0,386	0,140	0,107

Berdasarkan Tabel 2, data LiDAR paling akurat memiliki kedekatan nilai terhadap terrestrial dengan perbedaan hanya 0,007 m atau 7 mm yaitu pada ICP HKI 5 dan HKJT.32 A, sedangkan selisih terbesar atau nilai LiDAR yang paling tidak akurat adalah 0,386 m atau 38,6 cm yaitu pada ICP CP. 5. Secara rerata, selisih antar kedua metode yaitu 0,14 m atau 14 cm, serta memiliki nilai simpangan baku yang cukup baik yaitu 0,107 m atau 10,7 cm.

Nilai tersebut perlu dibandingkan terhadap suatu acuan untuk menentukan apakah data LiDAR yang dihasilkan cukup teliti untuk menghasilkan peta topografi dalam skala tertentu. Acuan yang digunakan untuk pengambilan kesimpulan adalah standar ketelitian geometri Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI), yang tertuang pada Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar sesuai Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014, dengan membandingkan nilai *Linear Error* 90% (LE 90) ketelitian geometric vertikal (z) LiDAR terhadap terrestrial seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Kesimpulan Uji Akurasi LiDAR pada Ruas Jalan Tol Pekanbaru – Bangkinang

Rerata	Simpangan Baku	LE 90	Toleransi Elevasi Peta Skala 1 : 1000 Kelas 1	Keterangan
0,140	0,107	0,176	0,20	Diterima

Mengacu Tabel 3, secara statistik dengan nilai LE 90 sebesar 0,176 m atau 17,6 cm lebih kecil dari toleransi ketelitian elevasi untuk Peta Skala 1 : 1000 Kelas 1 sebesar 20 cm. Sehingga disimpulkan bahwa elevasi LiDAR untuk merepresentasikan topografi Jalan Tol Ruas Pekanbaru – Bangkinang tidak berbeda signifikan dengan *true-value*-nya, dan memiliki nilai akurasi yang memenuhi toleransi peta topografi skala 1 : 1000 Kelas 1.

3.1.2. Hasil Efisiensi Penggunaan LiDAR

Penerapan teknologi LiDAR UAV sudah dilakukan PT. Utama Karya (Persero) untuk penyediaan data topografi Jalan Tol Trans Sumatera pada tahap DED. Sampai dengan akhir tahun 2021, setidaknya 70% dari 2.836 km rencana jalan tol dari Bakauheni s/d Aceh telah dilakukan pengambilan data dengan teknologi LiDAR, sejak bulan Maret 2020 dengan waktu efektif pengambilan data 94 hari. Efisiensi biaya investasi LiDAR UAV terhadap perhitungan biaya pengadaan jasa LiDAR untuk pekerjaan serupa sebesar 38%. Biaya investasi termasuk pembelian 2 unit *Fixed Wing* UAV dan LiDAR, pembayaran asuransi dan biaya pemeliharaan.

Dari pengambilan data LiDAR proyek jalan tol Ruas Pekanbaru – Bangkinang yang telah dilakukan pada bulan 1 Juli 2020, akuisisi data dilakukan dengan waktu efektif 3 hari oleh 1 tim (3 orang). Jika dibandingkan dengan metode terrestrial untuk penyediaan topografi sepanjang 40 km, diperlukan 3 tim survei (9 orang) dengan durasi pekerjaan 22 hari. Survei yang dilakukan

secara terestrial menggunakan alat *total station* dan GPS geodetik. Efisiensi waktu untuk penyediaan data topografi pada proyek jalan tol Ruas Pekanbaru – Bangkinang adalah 85,8%. Jika merujuk jumlah tim yang bekerja, akan berpengaruh terhadap biaya operasional yang terdiri dari gaji personel tim survei, transportasi, konsumsi, dan akomodasi. Berdasarkan parameter tersebut, efisiensi biaya operasional survei dengan LiDAR UAV sebesar 87% jika dibandingkan dengan metode terestrial untuk pekerjaan sepanjang 40 kilometer.

Penerapan teknologi LiDAR UAV cukup efisien secara biaya dan waktu, namun efisiensi biaya dicapai dengan membandingkan biaya investasi teknologi LiDAR UAV dengan pengadaan jasa LiDAR untuk menyelesaikan keseluruhan pengambilan data topografi pekerjaan DED di Jalan Tol Trans Sumatera sepanjang 2.836 km. Jika investasi LiDAR UAV dilakukan hanya untuk melakukan survei yang sifatnya tidak kontinyu dan hanya digunakan untuk 1 atau 2 proyek, maka tidak akan tercapai efisiensi biaya dengan skema pembelian unit atau investasi.

3.2. Pemanfaatan BIM pada Desain Jalan Tol

Pemanfaatan *Building Information Modelling* (BIM) pada pembangunan Jalan Tol Pekanbaru – Bangkinang dengan penggunaan *Exchange Information Requirement* (EIR) yaitu standar persyaratan pertukaran informasi yang disampaikan oleh pengguna jasa kepada penyedia jasa. Standar tersebut akan ditanggapi oleh penyedia jasa melalui *BIM Execution Plan* (BEP) yaitu rencana pelaksanaan implementasi BIM pada proyek terkait. EIR dan BEP yang disepakati oleh pengguna jasa, penyedia jasa, dan para *stakeholder*, memiliki tingkat kedetailan obyek informasi dalam setiap tahapan yang akan disampaikan. Tingkat kedetailan dituangkan dalam *level of development* (LOD) dan pada Jalan Tol Ruas Pekanbaru – Bangkinang seperti Gambar 5.

Data topografi yang dapat digunakan sebagai data kontur eksisting tahapan DED (LoD 200) adalah LiDAR UAV dan pada tahapan *shop drawing* (LoD 300-400) adalah data terestrial GPS, *total station*, dan *waterpass* atau yang disebut dengan terestrial dan ekstraterestrial. *Surface* dan koridor jalan yang dibuat dalam tahapan ini juga akan dilanjutkan ke tahap pengerjaan output BIM 3D visualisasi jalan tol seperti Gambar 6 sebagai data teknis perencanaan jalan tol.

Lebih lanjut, dari data teknis perencanaan jalan tol juga dapat dihasilkan keluaran BIM 5D sebagai fungsi perhitungan *quantity take off*/volume pekerjaan jalan tol sesuai dengan perencanaan. *Quantity take off* yang tergambar dalam bentuk tabel/gambar diantaranya: pekerjaan galian dan timbunan tanah sesuai rencana elevasi *finish grade* dan data ukur topografi yang diambil pada kondisi eksisting, serta volume lapis perkerasan jalan tol, seperti *base A*, *lean concrete* (LC), dan *rigid pavement*.

Komponen		Level of Development
Kategori	Deskripsi	
Topografi	Kontur eksisting termasuk semua komponen kondisi eksisting	Level of Development : 200 Digital Survey - Ifsar Stereoplotting toleransi akurasi : ± 5 m - LiDAR UAV toleransi akurasi : ± 1 m Kondisi Eksisting yang tercantum meliputi : Sungai, Alur Sungai, Jalan Lokal, Jalan Kereta Api, Struktur Eksisting
		Level of Development : 300 - 400 Terrestrial GPS, Total Station, Waterpass Kondisi Eksisting yang tercantum meliputi : Sungai, Alur Sungai, Jalan Lokal, Jalan Kereta Api,
		Level of Development : 500 Laser scanning toleransi akurasi : ± 2 cm Kondisi Eksisting yang tercantum meliputi : Sungai, Alur Sungai, Jalan Lokal, Infrastruktur terbangun

Gambar 5. EIR Jalan Tol Trans Sumatera Kategori Topografi
 (Sumber: PT. HK - Exchange Information Requirements Jalan Tol Trans Sumatera, 2020)



Gambar 6. 3D Model Visualisasi Seksi Pekanbaru – Bangkinang

3.3. Akurasi Peta Topografi, Potongan Memanjang, dan Potongan Melintang Desain Jalan Tol pada Sistem 3D Machine Control

Pada sistem *3D Machine Control*, akurasi hasil pekerjaan tanah sangat dipengaruhi oleh akurasi peta topografi, potongan memanjang, dan potongan melintang desain jalan tol. Akurasi tersebut dapat dipengaruhi oleh akurasi LiDAR, maupun faktor lainnya seperti: (1) faktor reduksi/penambahan kuantitas volume pekerjaan tanah karena konversi data dari *software* yang berbeda (2) akurasi pengamatan GNSS yang menjadi *guidance* alat berat dalam menentukan

elevasi desain maupun elevasi eksisting di lapangan, serta (3) akurasi hasil interpretasi *3D Machine Control* terhadap elevasi rencana yang akan dituju.

3.3.1. Konversi Data Topografi *Surface Civil 3D* ke Format Data Input *Control Box*

Setelah diperoleh *surface* topografi hasil LiDAR, dibuat *3D Model Detailed Engineering Design* (DED) jalan tol serta *shop drawing model* dengan *BIM authoring software* diperlukan konversi data dari format .XML ke .SVD, yaitu format *surface* yang diakomodir oleh *platform* Trimble. Proses konversi data rentan mengalami perbedaan baik reduksi atau penambahan.

Tabel 4 adalah pemeriksaan untuk mengetahui ada/tidaknya reduksi data, dilakukan dengan membandingkan hitungan *cut* (galian) dan *fill* (timbunan) pada *surface* BIM di *software* Auto CAD *Civil 3D* dalam format .XML, dengan *surface* BIM ketika dikonversi ke .SVD.

Tabel 4. Volume Pekerjaan Hasil *Software* BIM dan Hasil Import ke *3D Machine Control*

No	Surface	Volume (m ³)	
		Cut	Fill
1	Surface .XML	2.168.291,00	3.267.692,00
2	Surface .SVD	2.168.322,70	3.267.616,60
	Selisih Volume (m ³)	31,70	75,40
	Persentase Selisih	0,001%	0,002%

Dari Tabel 4, untuk ruas jalan tol sepanjang 40 km terdapat selisih 31,70 m³ (0,001 %) untuk galian dan 75,40 m³ (0,002 %) untuk timbunan. Selisih tersebut tidak konsisten, dikarenakan untuk daerah galian bertambah dari hitungan awalnya, sedangkan untuk daerah timbunan berkurang. Dari kondisi ini dapat disimpulkan bahwa kualitas data topografi LiDAR pada saat dikonversi ke format yang cocok untuk *control box 3D Machine Control* tidak berubah secara signifikan dan masih akurat untuk merepresentasikan topografi eksisting.

3.3.2. Akurasi Topografi, Potongan Memanjang, dan Potongan Melintang Eksisting Hasil Pengukuran *Receiver GNSS* pada Sistem *3D Machine Control*

Seperti dijelaskan pada sub bab 2.1.2, *guidance sistem 3D Machine Control* dalam menentukan elevasi tanah eksisting dan menentukan ketinggian tertentu yang harus dicapai terhadap elevasi desain (*shop drawing*) menggunakan teknologi ekstraterrestrial GNSS, dengan metode *real-time kinematic*.

Berdasarkan pengecekan akurasi bacaan koordinat *receiver* GNSS pada alat berat *motor grader* yang berfungsi sebagai *rover* terhadap *receiver* GNSS yang difungsikan sebagai pengecekan secara terrestrial, diperoleh perbedaan $x = 0,008$ m; $y = 0,035$ m dan $z = 0,009$ m.

Sehingga perhitungan selisih secara horizontal (x,y) sebesar 0,036 m atau 3,6 cm dan selisih secara vertikal (z) sebesar 0,009 m atau 9 mm.

Memperhatikan hasil tersebut, untuk pekerjaan tanah selisih horisontal 3,6 cm masih memenuhi toleransi dikarenakan jarak $\pm 3,6$ cm dari *blade motor grader*, memiliki kondisi yang cukup homogen. Berbeda dengan nilai vertikal (z) sebesar 9 mm, yang tergolong kecil dan akurat, namun tidak cukup akurat untuk pekerjaan tanah pada proyek Jalan Tol Pekanbaru – Bangkinang. Hal ini dikarenakan toleransi selisih elevasi hasil pekerjaan alat berat terhadap elevasi desain hanya ditoleransi sebesar 2 cm untuk lapisan *subgrade* dan 1 cm untuk lapisan *base A*.

3.3.3. Akurasi Topografi, Potongan Memanjang, dan Potongan Melintang Hasil Pekerjaan Tanah dengan *Guidance System 3D Machine Control* terhadap Desain

Proses pemotongan elevasi tanah pada area Jalan Tol Ruas Pekanbaru – Bangkinang dilakukan pada STA 22+900 s/d STA 22+925. Tabel 5 untuk mengetahui akurasi hasil pekerjaan dengan *3D Machine Control* yang di-*install* pada *Motor Grader*.

Tabel 5. Hasil Pemotongan Elevasi Tanah dengan *3D Machine Control* terhadap Toleransi

STA	Selisih elevasi FG terhadap FG desain	Toleransi	Kesimpulan	STA	Selisih elevasi FG terhadap FG desain	Toleransi	Kesimpulan
Pekerjaan: TSG				Pekerjaan: Base A			
STA 22+875	0,02	0,02	Diterima	STA 22+800	0,02	0,01	Ditolak
	0,03	0,02	Ditolak		0,04	0,01	Ditolak
	0,01	0,02	Diterima		0,04	0,01	Ditolak
STA 22+900	0,04	0,02	Ditolak		0	0,01	Diterima
	0,03	0,02	Ditolak	STA 22+825	0,02	0,01	Ditolak
	0,02	0,02	Diterima		0,05	0,01	Ditolak
STA 22+925	0,03	0,02	Ditolak		0,06	0,01	Ditolak
	0,04	0,02	Ditolak		0,02	0,01	Ditolak
	0,03	0,02	Ditolak	STA 22+850	0	0,01	Diterima
					0,04	0,01	Ditolak
					0,06	0,01	Ditolak
					0,04	0,01	Ditolak
				STA 22+875	0	0,01	Diterima
					0,03	0,01	Ditolak
					0,05	0,01	Ditolak
					0,02	0,01	Ditolak

Dari Tabel 5 diperoleh hasil bahwa untuk pekerjaan pemotongan pada lapisan TSG, terdapat 3 sampel yang diterima dan 6 sampel ditolak (prosentase keberhasilan 50 %). Sedangkan untuk pekerjaan pada lapisan *Base A* terdapat 3 sampel yang diterima dan 9 sampel ditolak (prosentase keberhasilan 25 %). Sehingga disimpulkan bahwa hasil pekerjaan pemotongan elevasi pada lapisan TSG dan *base A* tidak memenuhi toleransi yang disyaratkan.

SITECH Indonesia mengungkapkan, pekerjaan pemotongan elevasi lapisan TSG STA 22+875 – STA 22+925 dan *Base A* STA 22+800 – STA 22+875 adalah operator *motor grader* yang baru pertama kali bekerja menggunakan *guidance 3D Machine Control* dan belum memperoleh pelatihan yang cukup. Kurangnya pelatihan operator dapat menjadi faktor penyebab resiko terbesar (75%) dalam kegagalan implementasi penerapan *3D Machine Control* (Darby, 2015).

3.4. Pengendalian Kuantitas Pekerjaan Tanah dengan Sistem *3D Machine Control*

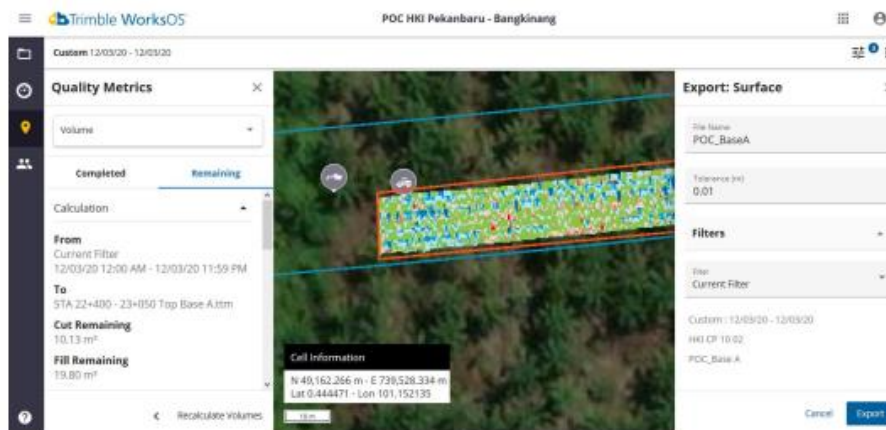
Salah satu kelebihan penggunaan sistem *3D Machine Control* pada kegiatan pemotongan elevasi dengan *3D Motor Grader* dan pemadatan tanah dengan *3D Vibro Compactor* adalah data *progress* yang terdigitalisasi.

Gambar 7 adalah gambar perekaman *progress* harian data kepadatan tanah dengan *3D Machine Control Vibro Compactor* pada Ruas Jalan tol Pekanbaru – Bangkinang STA 22+750 – STA 22+800 Jalur L1. Pada bagian atas merupakan pekerjaan pemadatan yang direkam pada jalur L1 saat dilakukan *passing* ke – 5, sedangkan pada bagian bawah merupakan pekerjaan pemadatan yang direkam saat telah dilakukan *passing* ke – 40.



Gambar 7. Perekaman *Progress* Harian Data Kepadatan Tanah dengan *3D Machine Control Vibro Compactor*

Selain pada sistem *3D Machine Control Vibro Compactor*, fitur perekaman *progress* juga ditemukan pada *3D Machine Control Motor Grader* seperti pada Gambar 8. Fitur perekaman data elevasi (*z*) pada suatu periode dapat membantu operator untuk mengetahui elevasi terakhir pada lapisan tanah yang dikerjakan, terutama jika pekerjaan pemotongan elevasi pada suatu lapisan belum selesai dan dilanjutkan pada periode berikutnya. Keuntungan lainnya adalah kontraktor dapat dengan mudah memperoleh kuantifikasi *progress* pekerjaan pemotongan tanah secara *real-time*, karena data elevasi dikonversi menjadi *surface* yang nantinya dapat diunduh dan di-*overlay* terhadap *surface* elevasi FG desain.



Gambar 8. Perekaman *Progress* Data Pemotongan Elevasi Tanah dengan *3D Machine Control Motor Grader*

Gambar 8 menunjukkan bahwa selain tercatat, *progress* pekerjaan dengan *3D Machine Control Motor Grader* dapat dipantau secara *real-time* dengan *dashboard monitoring*. Proses pemantauan dilakukan secara *online*, sehingga dapat dilakukan pemantauan pekerjaan secara *remote* oleh *stakeholder* di lokasi proyek, maupun *stakeholder* di luar lokasi proyek.

Perhitungan volume antara 2 data *progress* harian dilakukan dengan metode *surface to surface*, dengan cara membentuk *surface Triangulated Irregular Network (TIN)* dan melakukan *overlying* serta menghitung perbedaan volume diantara 2 *surface* (*surface progress* hari-h dan *surface progress* hari h-1).

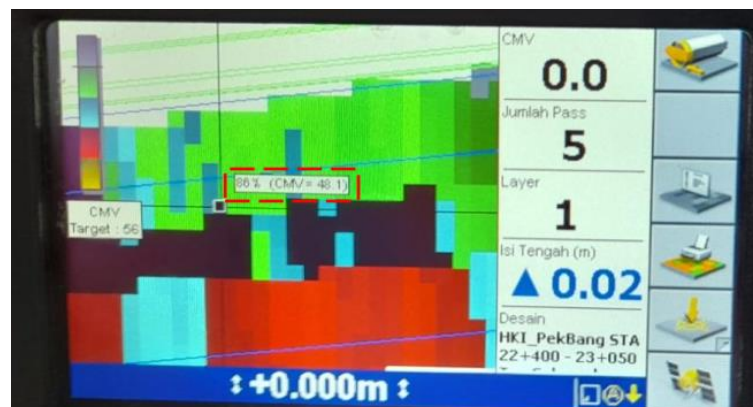
3.5. Pengendalian Mutu Pekerjaan Tanah dengan Sistem *3D Machine Control*

Fungsi utama penerapan *3D Machine Control* selain memperoleh hasil pekerjaan tanah yang akurat adalah pengendalian mutu pekerjaan tanah yang seragam (Wehling, 2009). Pada pekerjaan pemotongan elevasi pada lapisan *base A* pada STA 22+800 – STA 22+875 ruas Proyek Jalan Tol Ruas Pekanbaru – Bangkinang yang dilakukan dengan *3D Machine Control Motor Grader*, operator alat berat memperoleh arahan dari *control box* seperti pada Gambar 9.



Gambar 9. Tampilan Panduan Control Box pada 3D Machine Control Motor Grader

Pengendalian mutu serupa juga diperoleh pada sistem 3D Machine Control Vibro Compactor. Penggunaan sensor CM310 yang mengukur dan mencatat nilai Compactor Meter Value (CMV) dan Resonance Meter Value (RMV) dapat diterjemahkan menjadi telah tercapai/belum kepadatan area lapisan tanah yang sedang dikerjakan oleh operator alat berat. Nilai CMV dan RMV diperoleh berdasarkan konversi nilai getaran drum saat melewati lapisan tanah dengan kepadatan tertentu, selanjutnya dibandingkan dengan nilai CMV rujukan yang diperoleh dengan *sand cone test*, seperti terlihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Tampilan Panduan Control Box pada 3D Machine Control Vibro Compactor Saat Kepadatan 86%

3.6. Efisiensi Pekerjaan Tanah dengan Sistem 3D Machine Control

Telah dilakukan pekerjaan pemotongan elevasi lapisan *Top Subgrade* (TSG) pada STA 22+900 – STA 22+925 dengan 3D Machine Control Motor Grader terhadap metode konvensional tanpa sistem 3D Machine Control dan diperoleh hasil pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan Waktu Pemotongan Elevasi Lapisan TSG dengan Metode Konvensional dan *3D Machine Control Motor Grader* pada Sta 22+900 – Sta 22+925

Uraian Pekerjaan	Metode Konvensional	<i>3D Machine Control (Grader System)</i>
Persiapan	15	5
Pemasangan patok & benang	26	
Pengukuran elevasi eksisting <i>subgrade</i>		
Pemotongan elevasi ke-1	170	106
Pengecekan elevasi ke-1		
Pengulangan pemotongan & pengecekan sampai elevasi desain		
Total waktu (menit)	211	111

Dari Tabel 6 diperoleh hasil bahwa pekerjaan pemotongan elevasi lapisan TSG pada STA 22+900 – STA 22+925 menggunakan metode konvensional membutuhkan waktu 211 menit, sedangkan dengan memanfaatkan *3D Machine Control* membutuhkan waktu 111 menit. Terdapat perbedaan waktu sebesar 100 menit atau 1 jam 40 menit dikarenakan metode konvensional memerlukan waktu persiapan yang lebih lama, waktu tambahan untuk pemasangan patok dan benang serta kegiatan pemotongan dan pengecekan elevasi TSG secara berulang. Perbedaan waktu paling signifikan adalah untuk pekerjaan yang sifatnya *re-works* pada pemotongan dan pengecekan elevasi berulang yaitu sebesar 64 menit. Dari efisiensi waktu sebesar 100 menit untuk pekerjaan sepanjang 25 meter, selanjutnya dihitung estimasi efisiensi yang bisa dihasilkan untuk pekerjaan sepanjang 40 km dengan menggunakan *3D Machine Control*. Dengan asumsi pekerjaan dilakukan sesuai jadwal dan metode kerja awal, diindikasikan efisiensi waktu sebesar 45 hari.

Efisiensi waktu akan berakibat pada efisiensi biaya. Efisiensi biaya yang terdampak langsung akibat jadwal yang maju adalah efisiensi biaya umum lapangan (BUL) atau *overhead*. Estimasi BUL untuk proyek ini adalah Rp.5.000.000.000,00 (lima milyar rupiah)/bulan, sehingga jika efisiensi waktu pelaksanaan 45 hari maka efisiensi biaya yang bisa didapatkan sebesar Rp.7.500.000.000,00. Namun demikian, efisiensi waktu dan biaya tersebut perlu penelitian lebih lanjut dengan melibatkan parameter yang lebih lengkap seperti efisiensi penggunaan bahan bakar, berkurangnya *waste material*, waktu terbuang akibat cuaca, dan parameter – parameter lainnya.

3.7. Rekomendasi Potensi dan Kendala Penggunaan *3D Machine Control* untuk Meningkatkan Efisiensi Pekerjaan Tanah

Berdasarkan potensi dan kendala yang ditemui, terdapat ketergantungan teknologi jika dilakukan penerapan *3D Machine Control* dalam pekerjaan tanah di lapangan, antara lain:

1. Penggunaan LiDAR UAV memerlukan perizinan terbang dari instansi terkait.

2. Penggunaan teknologi LiDAR UAV memerlukan operator yang terampil dan tersertifikasi dalam pengoperasian UAV *Fixed Wing V-TOL* dan tenaga ahli geodetik yang terampil dalam pemrosesan data LiDAR.
3. Untuk pemanfaatan BIM dalam proses desain diperlukan tenaga ahli BIM sebagai BIM *Coordinator*, dan asisten tenaga ahli BIM sebagai BIM *Modeller* yang mempunyai kompetensi terkait dan memiliki sertifikasi sebagai BIM *user*.
4. Penerapan sistem *3D Machine Control* membutuhkan GPS Geodetik sebagai *base station*.
5. Penerapan sistem *3D Machine Control* membutuhkan operator yang terampil dalam mengoperasikan alat berat sesuai *guidance system 3D Machine Control* dalam melakukan pekerjaan tanah.

Pemanfaatan sistem *3D Machine Control* membutuhkan komitmen dan dukungan yang besar dari manajemen serta peran serta seluruh sumber daya manusia yang terlibat, dikarenakan terdapat perubahan budaya dalam bekerja, seperti:

1. Penerapan BIM *workflow* pada proyek membuat budaya kerja yang selama ini menuntut pertemuan tatap muka untuk asistensi dengan *stakeholder* dan permintaan persetujuan menjadi *paper-less*.
2. Penerapan BIM dan *3D Machine Control* membuat seluruh kegiatan di proyek menjadi sangat transparan dan *real-time*.
3. Penerapan teknologi LiDAR UAV, BIM dan *3D Machine Control* membuat sistem kerja proyek menjadi padat modal, bukan lagi padat karya.

4. SIMPULAN

Berikut beberapa kesimpulan yang dihasilkan dari penelitian yang telah dilakukan:

1. Ketelitian data topografi LiDAR UAV di 18 ICP memiliki rerata selisih sebesar 0,140 m, simpangan baku 0,107 m dan akurasi LE90 sebesar 0,176 cm. Akurasi LiDAR UAV Jalan Tol Ruas Pekanbaru – Bangkinang tersebut < 20 cm, sehingga memenuhi toleransi ketelitian peta topografi Kelas 1 skala 1:1000.
2. Efisiensi waktu yang diperoleh untuk penyediaan data topografi pada proyek jalan tol Ruas Pekanbaru – Bangkinang menggunakan LiDAR jika dibandingkan dengan menggunakan topografi *terrestrial* adalah 85,8%, sedangkan efisiensi biaya operasional survei yang diperoleh sebesar 87%.
3. Pada sistem *3D Machine Control*, akurasi pekerjaan tanah yang dihasilkan dipengaruhi oleh (1) faktor reduksi/penambahan kuantitas volume pekerjaan tanah karena konversi data dari *software* yang berbeda, dimana dalam penelitian ini diperoleh 31,70 m³ (0.001 %) untuk *Cut* dan 75.40 m³ (0.002 %) untuk *Fill*, (2) akurasi pengamatan GNSS yang menjadi

guidance alat berat dalam menentukan elevasi desain maupun elevasi eksisting di lapangan, dimana dalam penelitian ini diperoleh ketelitian pada posisi $x = 0,008$ m, $y = 0,035$ m dan $z = 0,009$ m, serta (3) akurasi hasil interpretasi *3D Machine Control* terhadap elevasi rencana yang akan dituju, dimana diperoleh prosentase keberhasilan sampel pada lapisan TSG sebesar 50% dan pada lapisan *base A* sebesar 25%. Namun demikian, fakta bahwa operator *Motor Grader* yang belum memperoleh training yang cukup, dan didukung bahwa pada penelitian ini dapat mengidentifikasi perbedaan elevasi dibawah 1 cm, cukup menyimpulkan bahwa jika operator dapat mengikuti *guidance control box* akan dapat diperoleh elevasi pekerjaan tanah sesuai desain.

4. Penggunaan *3D Machine Control Motor Grader* dan *Vibro Compactor* dengan memanfaatkan sistem penentu posisi RTK-Radio GNSS memungkinkan pengguna dapat menghitung kuantitas volume pekerjaan tanah secara periodik.
5. Penggunaan *3D Machine Control Motor Grader* pada STA 22+900 – STA 22+925 mampu menghasilkan efisiensi waktu sebesar 100 menit atau 47%. Efisiensi diperoleh dari pengurangan pekerjaan *re-works* seperti pemasangan patok dan benang, pemotongan dan pengecekan elevasi hasil pemotongan secara berulang.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z. (2000). Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya. Pradnya Pramita.
- Azar, E. R., & Kamat, V. R. (2017). Earthmoving equipment automation: A review of technical advances and future outlook. *Journal of Information Technology in Construction*, 22 December 2016), 247–265.
- Building Information Modelling, (2019). <http://sibima.pu.go.id/mod/page/view.php?id=3209>.
- Chong, H. Y., Lopez, R., Wang, J., Wang, X., & Zhao, Z. (2016). Comparative Analysis on the Adoption and Use of BIM in Road Infrastructure Projects. *Journal of Management in Engineering*, 32(6), 05016021. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000460](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000460)
- Darby, K. (2015). Preliminary Investigation Quantitative Cost-Benefit Analyses of the Use of Automated Machine Guidance in Construction: An Examination of Current Practice. <http://www.dot.ca.gov/hq/construc/CPDirectives/cpd13-10.pdf>
- Ding, L., Wei, R., & Che, H. (2014). Development of a BIM-based automated construction system. *Procedia Engineering*, 85, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.536>
- Divisi Perencanaan Jalan Tol PT Hutama Karya (Persero). (2020). Exchange Information Requirements Jalan Tol Trans Sumatera. Author.
- Heikkilä, R., Makkonen, T., Niskanen, I., Immonen, M., Hiltunen, M., Kolli, T., & Tyni, P. (2019). Development of an earthmoving machinery autonomous excavator development platform. *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2019, Isarc*, 1005–1010. <https://doi.org/10.22260/isarc2019/0134>

- Hersanto, F. W. (2010). Evaluasi Aplikasi GNSS CORS – RTK NTRIP untuk Pengukuran TDT (Titik Dasar Teknik) Orde 4.
- Makkonen, T., Nevala, K., & Heikkilä, R. (2017). Automation of an Excavator Based on a 3D CAD Model and GPS Measurement. Proceedings of the 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction. <https://doi.org/10.22260/isarc2004/0047>.
- Maleika, W. (2015). The influence of the grid resolution on the accuracy of the digital terrain model used in seabed modeling. Marine
- Modul 6 Permodelan 3D, 4D, 5D, 6D, dan 7D Serta Simulasinya dan Level of Development (LOD), (2018).
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 15 Tahun 2005 tentang Jalan Tol, 1 (2005).
- Position Partners Indonesia. (2020). Cara Lebih Baik Untuk Pekerjaan Tanah. Author
- Rasul, A., Seo, J., & Khajepour, A. (2021). Development of integrative methodologies for effective excavation progress monitoring. Sensors (Switzerland), 21(2), 1–25. <https://doi.org/10.3390/s21020364>
- Sugiyono. (2015). Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D. CV. Alfabeta.
- Tanoli, W. A., Seo, J. W., Sharafat, A., & Lee, S. S. (2018a). 3D Design Modeling Application in Machine Guidance System for Earthwork Operations. KSCE Journal of Civil Engineering, 22(12), 4779–4790. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0309-y>
- Tanoli, W. A., Seo, J. W., Sharafat, A., & Lee, S. S. (2018b). 3D Design Modeling Application in Machine Guidance System for Earthwork Operations. KSCE Journal of Civil Engineering, 22(12), 4779–4790. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0309-y>
- Townes, D. (2013). Automated Machine Guidance with Use of 3D Models– Executive Summary. Fhwa-Hq, 5
- Vahdatikhaki, F., Hammad, A., & Siddiqui, H. (2015). Optimization-based excavator pose estimation using real-time location systems. Automation in Construction, 56, 76–92. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.006>
- Vonderohe, A. P. (2007). Final Report Implementation of GPS Controlled Highway Construction Equipment University of Wisconsin – Madison.
- Wehling, M. (2009). The Use of GPS and Machine Guidance SH 45 SE Turnpike-Austin, TX
- White, D. J., Jahren, C. T., Vennapusa, P., Westort, C., Alhasan, A., Miller, D. K., Turkan, Y., Guo, F., Hannon, J., Dubree, A., & Sulbaran, T. (2018). Use of Automated Machine Guidance within the Transportation Industry. In Use of Automated Machine Guidance within the Transportation Industry. <https://doi.org/10.17226/2508>