

**ANALISIS SIMULASI EVAKUASI BENCANA KEBAKARAN
BERBASIS *BUILDING INFORMATION MODEL* (BIM)
(Studi Kasus : Dekanat Baru Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro)
Farhan Ardianzaf Putra^{*)}, Abdi Sukmono, Nurhadi Bashit**

Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudarto, SH, Tembalang, Semarang Telp.(024)76480785, 76480788
Email: farhanardianzaf@gmail.com

ABSTRAK

Strategi evakuasi gedung merupakan salah satu elemen penting dalam keselamatan kebakaran gedung bertingkat. Salah satu strategi yang dapat membantu meminimalisir kerugian akibat bencana kebakaran yaitu pembuatan suatu model simulasi evakuasi bencana kebakaran dalam sebuah gedung. Penelitian ini dilakukan guna mengetahui tingkat kelaikan jalur evakuasi yang ada di gedung Dekanat Baru Fakultas Teknik Universitas Diponegoro dengan berbasis model simulasi. Pemodelan simulasi evakuasi dilakukan dengan memanfaatkan *Building Information Model* (BIM) gedung Dekanat Baru Fakultas Teknik. Pembentukan BIM dilakukan dengan menggunakan metode pengukuran *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). Hasil akuisisi data dengan TLS diperoleh data *point cloud* untuk menghasilkan BIM dengan menggunakan aplikasi Autodesk Revit. BIM yang terbentuk dilakukan proses simulasi evakuasi bencana secara virtual dengan memanfaatkan algoritma *A* search algorithm*. Hasil akhir dari penelitian ini menunjukkan jarak maksimal jalur evakuasi pada gedung ini adalah 21,251 m pada lantai dasar; 17,290 m pada lantai 1; 17,718 m pada lantai 2 dan 17,851 m pada lantai 3. Hasil simulasi evakuasi bencana terbagi menjadi 2 kasus, pada kasus pertama kondisi pintu keluar lantai dasar hingga 3 dalam kondisi tertutup sehingga proses evakuasi membutuhkan waktu 96,3 detik dengan rata-rata proses evakuasi dalam waktu 47,6 detik. Kasus kedua, kondisi akses keluar gedung dalam keadaan terbuka sehingga proses evakuasi membutuhkan waktu 89,8 detik dengan rata-rata proses evakuasi dalam waktu 44 detik. Hasil dari panjang jalur tersebut telah sesuai dengan regulasi yang berlaku, yang mana menurut PERMEN PU no. 26 tahun 2008 jarak tempuh maksimal pada gedung hunian pendidikan adalah 62 m.

Kata kunci: *A* search algorithm*, BIM, Jalur Evakuasi, Simulasi Evakuasi, TLS

ABSTRACT

The building evacuation strategy is one of the important elements in the fire safety of multi-storey buildings. One strategy that can help minimize losses due to fire disasters is the creation of a simulation model of fire disaster evacuation in a building. This research was conducted to determine the level of evacuation route in the New Deanate building of the Faculty of Engineering, Diponegoro University based on simulation model. The simulation modeling of evacuation was carried out by utilizing the Building Information Model (BIM) of the New Deanate building of the Faculty of Engineering. The establishment of BIM is done using Terrestrial Laser Scanner (TLS) measurement method. The result of data acquisition with TLS obtained cloud data point to generate BIM by using Autodesk Revit application. Bim formed is carried out the process of simulating disaster evacuation virtually by utilizing the A search algorithm. The final results of this study showed the maximum distance of evacuation routes in this building is 21,251 m on the ground floor; 17,290 m on the 1st floor; 17,718 m on the 2nd floor and 17,851 m on the 3rd floor. The result of disaster evacuation simulation is divided into 2 cases, in the first case the condition of the ground floor exit is up to 3 in closed condition so that the evacuation process takes 96.3 seconds with an average evacuation process within 47.6 seconds. The second case, the condition of access out of the building is open so that the evacuation process takes 89.8 seconds with an average evacuation process within 44 seconds. The result of the length of the line has been in accordance with the applicable regulations, which according to PERMEN PU no. 26 year 2008 the maximum mileage in educational residential buildings is 62 m.*

Keywords: *A* search algorithm, BIM, Evacuation Route, Evacuation Simulation, TLS.*

^{*)} Penulis Penanggung Jawab

I. Pendahuluan

I.1 Latar Belakang

Manusia semakin banyak hidup di daerah perkotaan dan sebagian besar waktu mereka dihabiskan di dalam gedung. Namun, banyak potensi bencana yang dapat menimpa pada bangunan gedung, salah satunya adalah bencana kebakaran. Evakuasi yang aman mengindikasikan bahwa arsitektural gedung telah optimal, sistem perlindungan kebakaran yang efektif (asap, sistem pemadam api otomatis, alarm kebakaran otomatis, rute pelarian berlabel) dan penerangan yang sesuai. Oleh karena itu untuk meminimalisir kerugian yang mungkin terjadi akibat bencana kebakaran, perlu adanya model simulasi evakuasi bencana kebakaran dalam sebuah gedung.

Ketersediaan alat penunjang keselamatan gedung seperti sensor asap, sistem *sprinkler* dan alat pemadam api ringan (APAR) merupakan fasilitas yang wajib ada pada tiap gedung. Akan tetapi penunjang keselamatan gedung bukan hanya dari fasilitas yang tersedia, namun aspek spasial dan geometri ruang juga ikut memengaruhi. Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia nomor 48 tahun 2016 tentang standar keselamatan dan kesehatan kerja perkantoran, dijelaskan bahwa lebar koridor untuk jalur evakuasi setidaknya lebih dari 1,2 m dengan lebar pintu minimum 0,9 m. Dengan adanya regulasi tersebut perlu dilakukan suatu penelitian untuk menganalisis keselamatan evakuasi saat bencana terjadi. Demikian pula dengan gedung Dekanat Baru Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, yang mana pada tahun 2017 tercatat telah mengalami kerusakan pada bagian lantai empat gedung ini. Dinding kaca yang menempel pada bagian sisi timur lantai empat terlepas dan terjatuh bersama dengan kerangka alumuniumnya.

Analisis keselamatan evakuasi dapat dilakukan dengan biaya minimum dan aman, yaitu dengan menggunakan perangkat komputasi canggih untuk menganalisis kebakaran berbasis *Building Information Modelling* (BIM) (Semič, 2016). Teknologi ini memungkinkan tahap pembangunan dapat dilakukan lebih cepat, akurat, efektif dan efisien sesuai kebutuhan, mulai dari perencanaan, desain, konstruksi, hingga operasionalnya. Pembentukan dan pembuatan BIM dilakukan dengan mengaplikasikan metode Fotogrametri Rentang Dekat (FRD) dengan menggunakan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). BIM yang telah terbentuk selanjutnya dilakukan analisis jalur evakuasi menggunakan algoritma *A* search algorithm*. Algoritma ini banyak digunakan dalam permainan *video game*, dikarenakan algoritma ini bersifat "*heuristic*", sehingga dapat menemukan solusi terbaik untuk suatu masalah. Algoritma ini bekerja dengan cara memprioritaskan jalur yang tampak mengarah lebih dekat ke tujuan (Elswijk, 2011).

Berdasarkan uraian tersebut penulis, melakukan penelitian untuk menganalisis simulasi evakuasi bencana kebakaran pada gedung Dekanat Baru Fakultas Teknik dengan beberapa modifikasi serta

keterbaruan. Salah satu modifikasi dan keterbaruan dalam penelitian ini yaitu pada proses pembuatan BIM, parameter dalam penyusunnya diperoleh dari data *point cloud* TLS. Diharapkan penelitian ini berhasil membuat model simulasi evakuasi bencana kebakaran yang relevan dan mudah diimplementasikan apabila kedepannya terjadi bencana kebakaran.

I.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pada latar belakang yang telah dijabarkan di atas, adapun perumusan masalah adalah:

1. Bagaimana hasil pembuatan *Building Information Model* untuk keperluan simulasi dengan memanfaatkan *Terrestrial Laser Scanner*?
2. Bagaimana simulasi evakuasi bencana kebakaran dengan berbasis *Building Information Model*?
3. Bagaimana tingkat kelaikan jalur evakuasi di gedung Dekanat Baru Fakultas Teknik?

I.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui bagaimana simulasi evakuasi apabila terjadi bencana kebakaran pada gedung Dekanat Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.
2. Mengetahui tingkat kelaikan jalur evakuasi yang ada di gedung Dekanat Baru Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Manfaat Akademis
Secara akademis, penelitian ini diharapkan dapat membantu menambah wawasan dalam mengembangkan dan memberikan inovasi terhadap ilmu pengetahuan.
2. Manfaat Praktis
Secara praktis, penelitian ini diharapkan dapat diaplikasikan serta menjadi bahan pertimbangan apabila di kemudian hari terjadi bencana kebakaran di gedung Dekanat Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.

I.4 Batasan Penelitian

Penelitian ini memiliki batasan supaya tidak terlalu jauh dari kajian masalah yang telah dipaparkan. Berikut batasan masalah pada penelitian ini:

1. Analisis simulasi evakuasi bencana kebakaran hanya dilakukan pada bagian dalam gedung Dekanat Baru Fakultas Teknik UNDIP.
2. Pengambilan data interior (lantai, dinding, pintu dan jendela) gedung Dekanat Baru Fakultas Teknik menggunakan alat *Terrestrial Laser Scanner* Leica BLK360.
3. Proses simulasi evakuasi hanya memperhitungkan faktor keselamatan penghuni, tanpa memperhitungkan faktor

perambatan api, intensitas panas api dan kekuatan sprinkler air.

4. Proses simulasi evakuasi bencana tidak menggunakan alat bantu seperti lift dan eskalator.
5. Titik sumber kebakaran gedung tidak ikut diperhitungkan.

II. Tinjauan Pustaka

II.1 Gambaran Umum Daerah Penelitian

Pada penelitian ini, peneliti mengambil subjek penelitian pada gedung Dekanat Baru Fakultas Teknik UNDIP Semarang. Secara geografis gedung ini terletak pada koordinat lintang 7°3'5,326" LS dan bujur 110°26'24,373" BT.

Gedung dekanat baru fakultas teknik UNDIP mulai dibangun pada tahun 2009 dan selesai pada tahun 2016. Gedung ini menggantikan gedung dekanat lama yang beralih fungsi menjadi ruang kelas, kantor administrasi dan kantor Kepala Departemen. Pada penelitian ini, Peneliti akan membatasi ruang lingkup penelitian hanya berfokus pada pengukuran lantai dasar hingga lantai 4 karena keterbatasan alat yang ada.

II.2 Terrestrial Laser Scanner (TLS)

Terrestrial Laser Scanning (TLS) adalah sebuah metode pengukuran dengan memanfaatkan cahaya laser untuk mengukur titik-titik dengan suatu pola teratur secara langsung dalam ruang tiga dimensi dari yang ada pada permukaan objek dari sebuah tempat di permukaan bumi. Hasil yang diperoleh dari pengukuran TLS ini adalah titik awan atau *point clouds*. *Point clouds* tersebut adalah kumpulan dari titik-titik dalam jumlah banyak yang dapat digunakan sebagai bahan referensi pembuatan model tiga dimensi (Quintero dkk,2008). TLS yang digunakan pada penelitian ini adalah Leica BLK 360 seperti yang terlihat pada Gambar 1.

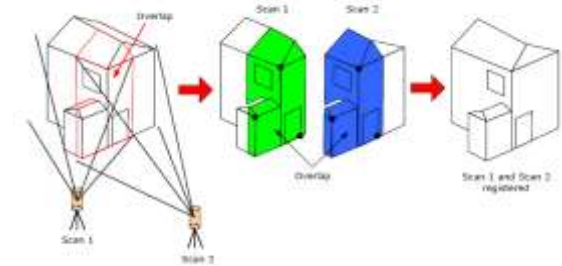


Gambar 1 TLS Leica BLK360

II.2.1 Metode Registrasi Point Cloud Menggunakan Surface Matching

Pendekatan ini mengasumsikan pencocokan bersama area permukaan yang tumpang tindih dari *point cloud* dari padah hanya mencocokkan target umum atau fitur titik alami. Karena area yang tumpang tindih biasanya berisi ribuan poin, redundansi yang terlibat dapat menghasilkan solusi yang lebih baik daripada hanya menggunakan titik pengikat terpisah (Barber dan Mills, 2001). Algoritma pencocokan permukaan umumnya didasarkan pada metode *Iterative Closest Point* (ICP), yang menurutnya *point cloud* referensi dimodelkan dengan permukaan dan kemudian registrasi dilakukan dengan meminimalkan jumlah jarak antara

titik-titik dari *point cloud* lainnya dan permukaan. Prinsip pendaftaran dengan pencocokan permukaan ditunjukkan pada Gambar 2.

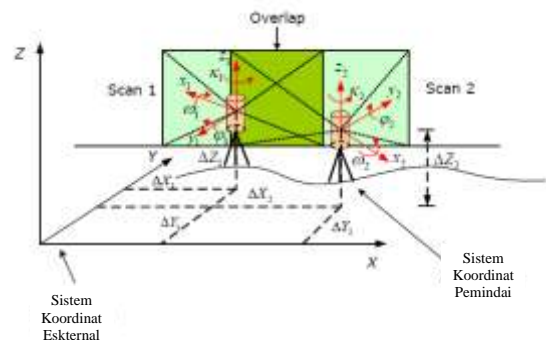


Gambar 2 Surface matching (Reshetyuk, 2009)

II.3 Georeferensi

Georeferensi penting untuk integrasi data TLS dan produk turunan darinya misal model 3D, dengan data geospasial lainnya. Georeferensi adalah prosedur transformasi *point cloud* dari sistem koordinat pemindai ke sistem koordinat eksternal, lokal atau nasional. Pendekatan yang berlaku untuk georeferensi di TLS dalam beberapa tahun terakhir ini disebut georeferensi tidak langsung (*Indirect Georeference*) dan georeferensi langsung (*Direct Georeference*). Dalam georeferensi tidak langsung, pindaian yang diambil dari beberapa lokasi pertama kali digabungkan (terdaftar) menjadi satu *point cloud* dari seluruh objek atau situs. Setelah itu, *point cloud* “terregistrasi” diubah menjadi sistem koordinat eksternal dengan menggunakan koordinat minimal 3 titik kontrol yang terdistribusi dengan baik, yang direalisasikan dengan menggunakan target khusus yang ditempatkan pada atau di sekitar objek yang dipindai. Sedangkan pada georeferensi langsung, alat pemindai sudah terintegrasi dengan GPS, sehingga data *point cloud* sudah memiliki sistem koordinat (Reshetyuk, 2009).

Pada penelitian ini, metode georeferensi yang digunakan adalah metode *Indirect Georeference*. Dalam metode ini paling sering digunakan target dengan koordinat yang diketahui di sistem eksternal, untuk mengubah *point cloud* ke sistem ini. Hubungan antara dua sistem dijelaskan, seperti dalam kasus dengan dua sistem koordinat pemindai, oleh 6 parameter transformasi seperti yang tertampakkkan di Gambar 3.



Gambar 3 Hubungan antara sistem koordinat pemindai dengan sistem koordinat eksternal (Reshetyuk, 2009)

II.4 Building Information Model (BIM)

Menurut Institusi Standar Ingris (ISO 19650) BIM merupakan penggunaan representasi digital bersama dari objek yang dibangun (termasuk bangunan, jembatan, jalan, proses pabrik, dan lain-lain.) untuk memfasilitasi proses desain, konstruksi dan operasi untuk membentuk dasar keputusan yang andal. Objek BIM adalah representasi digital dari produk dan peralatan yang dapat ditempatkan oleh pelanggan anda ke dalam model informasi bangunan mereka. Pada dasarnya, BIM memudahkan semua pemangku kepentingan dalam siklus hidup bangunan untuk berbagi informasi tentang bangunan. Hal ini memungkinkan semua orang mulai dari arsitek hingga surveyor hingga insinyur bangunan hingga pemilik gedung untuk menggunakan model 3D bersama yang sama. Ini membantu semua orang mendapatkan akses ke informasi yang tepat pada waktu yang tepat sepanjang proses merancang dan membangun gedung.

II.5 Parameter Kelaikan dan Kemanan Jalur Evakuasi

Ketika merencanakan atau membuat jalur evakuasi bencana, terdapat beberapa parameter yang menentukan kelaikan dan kemanan jalur menurut Peraturan Menteri Pekerjaan Umum nomor 26 tahun 2008 tentang Persyaratan Teknis Sistem Proteksi Kebakaran pada Bangunan Gedung dan Lingkungan. Parameter kelaikan dan keamanan jalur evakuasi antara lain:

1. Lebar sarana jalan keluar harus diukur pada titik komponen yang paling sempit, dengan penonjolan (offset) pada sarana jalan keluar tidak lebih dari 144 mm pada setiap sisi, dan diperbolehkan apabila ketinggian kurang dari 965 mm dari lantai,
2. Lebar sarana jalur keluar harus lebih besar dari 915 mm,
3. Lebar akses eksit dari partisi atau alat yang dapat dipindahkan tidak boleh kurang dari 915 mm dengan panjang maksimal 15 m serta kapasitas maksimum 6 orang,
4. Panjang jalur evakuasi untuk hunian pendidikan maksimal adalah 62 m, dimulai dari titik terjauh subjek hunian hingga lantai atau permukaan jalan, Jumlah minimum sarana jalan ke luar dari setiap balkon, mezanin, lantai atau bagiannya harus dua,
5. Tidak boleh ada perlengkapan, alat-alat, furnitur, dekorasi, atau benda lain yang ditempatkan menghalangi eksit, akses ke eksit, akses dari eksit atau visibilitas.
6. Cermin tidak boleh dipasang pada pintu eksit. Cermin tidak boleh ditempatkan di dalam atau disebelah setiap eksit dengan cara sedemikian sehingga membingungkan arah eksit.

II.6 Pathfinder

Pathfinder adalah aplikasi simulator evakuasi yang dikembangkan oleh Thunderhead Engineering. Tidak seperti model berbasis aliran atau berbasis sel, Pathfinder menggunakan teknik dari penelitian ilmu komputer saat ini untuk memodelkan pergerakan

individu, membangun teknologi yang digunakan dalam industri permainan dan grafik komputer. Pathfinder menyediakan alat yang diperlukan untuk membuat keputusan yang meyakinkan mengenai tata letak bangunan dan desain sistem proteksi kebakaran (Ding Y. dkk, 2013).

Pathfinder menggunakan algoritma A^* Search Algorithm untuk membuat titik arah yang membentuk jalur. Russel dan Norvig (dalam (Elswijk, 2011)) menjelaskan bahwa A^* Search Algorithm merupakan bentuk terbaik untuk metode pencarian jalur. Algoritma ini pertama-tama mencoba untuk memperluas *node* yang paling dekat dengan tujuan pertama. Fungsi heuristik digunakan untuk membuat perkiraan dari seberapa dekat sebuah *node* dengan tujuan itu sebelum *node* diperluas. A^* juga melacak biaya jalan untuk mencapai *node*. Bukan hanya memperluas *node* yang paling dekat dengan tujuan, A^* mencoba untuk memperluas *node* yang jumlah perkiraan jarak ke tujuan dan biaya untuk mencapai simpul yang terkecil.

II.7 Autodesk Revit

Setelah AutoCAD sukses besar dalam bidang arsitektur, Revit dirancang sebagai alat yang dapat melakukan pekerjaan yang dilakukan AutoCAD tetapi sebagai gantinya menggunakan bahasa pemrograman untuk mencapai modifikasi langsung pada properti objek. Revit adalah platform yang sepenuhnya terpisah dari AutoCAD, dengan basis kode dan struktur file yang berbeda. Revit adalah produk yang terintegrasi yang saat ini mencakup Revit Architecture, Revit Structure, dan Revit MEP. Perangkat ini mencakup: antarmuka gbXML untuk simulasi energi dan analisis beban; antarmuka langsung ke analisis struktural dan kemampuan untuk mengimpor model dari Sketchup, alat desain konseptual, dan sistem lain yang mengeksport file DXF (Eastman C. dkk, 2008).

II.8 Uji Ketelitian Model

Uji ketelitian pada hasil TLS dan BIM dilakukan karena terjadi distorsi geometrik antara point cloud dengan objek dilapangan. Distorsi geometrik adalah ketidaksempurnaan geometri titik yang terdapat pada point clouds saat proses registrasi maupun proses georeferensi hal ini menyebabkan ukuran, posisi dan bangunan menjadi tidak sesuai dengan kondisi sebenarnya (Priambodo, 2016). Besarnya nilai kesalahan tersebut ditunjukkan dengan nilai RMSE (*root mean square error*). RMSE adalah suatu nilai perbedaan antara nilai sebenarnya dengan nilai hasil ukuran (Ghilani dan Wolf, 2017). Nilai RMS tersebut diperoleh dari Persamaan II.1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (R-R_1)^2}{n}} \dots\dots\dots (II.1)$$

Keterangan :

- RMS : *Root Mean Square Error*
- R : Nilai yang dianggap benar
- R1 : Nilai hasil ukuran validasi
- n : Banyak ukuran yang digunakan

III. Metodologi Penelitian

III.1 Data – Data Penelitian

Berikut adalah data – data yang digunakan dalam penelitian ini :

1. Koordinat GCP dari pengukuran lapangan menggunakan *Total Station*.
2. *Point cloud* bagian eksterior dan interior gedung hasil akuisisi menggunakan wahana TLS Leica BLK360.
3. Data *As Built Drawaing* yang diperoleh dari pihak pengelola gedung.
4. Data jumlah penghuni gedung yang diperoleh dari hasil survei lapangan dan wawancara.
5. Data Validasi Jarak dari pengukuran lapangan menggunakan *Roll meter*.

III.2 Alat – Alat Penelitian

Berikut adalah alat – alat yang digunakan dalam penelitian ini :

1. Laptop.
2. *Workstation* HP.
3. *Total Station* Topcon GTS-1000.
4. *Terrestrial Laser Scanner* Leica BLK360.
5. Perangkat lunak Autodesk ReCap 2020.
6. Perangkat lunak Autodesk Revit 2020.
7. Perangkat lunak Pathfinder 2019.
8. Perangkat lunak Microsoft Office 2019

III.3 Diagram Alir Penelitian

Berikut adalah diagram alir penelitian yang dilakukan pada penelitian ini.



Gambar 4 Diagram alir penelitian

III.4 Tahap Penelitian

1. Tahap Persiapan

Pada tahap persiapan terdiri dari studi literatur berkaitan survei lapangan dan persiapan alat.

a. Studi Literatur, tahap ini dilakukan untuk mencari dan membantu peneliti dalam memahami konsep dasar yang terkait dalam penelitian ini, serta mempelajari penelitian terdahulu yang berkaitan dengan materi penelitian ini.

b. Survei Lapangan, bertujuan untuk mengetahui kondisi objek dan lingkungan sekitar area penelitian.

c. Persiapan Alat, bertujuan untuk menguji kualitas, kelengkapan serta kondisi alat. Alat yang digunakan dalam penelitian ini TLS BLK360, dimana alat ini sudah terkalibrasi, sehingga kita hanya perlu mengecek kondisi dan keadaan alat.

2. Tahap Akuisisi Data

Tahap akuisisi terdiri dari pengukuran *Total Station* (TS) dan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). Pengukuran TS dilakukan untuk mendapatkan data koordinat poligon serta titik detail pada gedung. Jenis poligon pada pengukuran ini adalah poligon tertutup. Koordinat hasil pengukuran digunakan sebagai *Ground Check Point* (GCP), *Independent Check Point* (ICP) dan validasi hasil pengukuran. Pada penelitian ini, metode georeferensi yang dilakukan adalah Georeferensi Tidak Langsung. Akuisisi data TLS dilakukan menggunakan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) merk BLK360. Pengukuran TLS bertujuan untuk mendapatkan data *point cloud* bagian bawah gedung dan interior gedung.

3. Tahap Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan dengan menginput data hasil pengukuran TLS dan model atap hasil dari *as built drawing* bangunan. Data TLS diolah dengan menggunakan aplikasi Autodesk ReCap yang digabungkan dengan metode registrasi *cloud to cloud*. Registrasi ini dilakukan untuk menggabungkan data *point cloud* dari beberapa *station* akuisi data agar menjadi satu data. Tahap selanjutnya adalah *filtering*, yaitu menghapus atau menghilangkan data *point cloud* yang merupakan data *noise*. Proses selanjutnya adalah *classification point cloud*, tahap ini bertujuan mengelompokkan data *point cloud* berdasarkan kelasnya misalnya *point cloud floor, wall, door* dan lan sebagainya. Proses berikutnya merupakan pembentukan model 3D *Buildng Information Model*. Dan tahap terakhir adalah pembuatan jalur evakuasi bencana dengan menggunakan algoritma *A* Search Algorithm*. Hasil pembuatan jalur evakuasi akan dilakukan analisis simulasi evakuasi bencana dan juga analisis kelaikan jalur evakuasi bencana.

4. Tahap Analisis

Analisis dari pembuatan jalur evakuasi dilakukan dari segi visualisasi dan segi geometris. Analisis dari segi visual, peneliti menilai secara kualitatif apakah jalur yang terbentuk sudah baik serta tidak ada jalur yang saling bertabrakan. Analisis

dari segi geometri, jalur evakuasi yang terbentuk dicari nilai dimensi panjangnya. Kemudian dari nilai dimensi panjang tersebut dilakukan analisis kesesuaian dengan regulasi jalur evakuasi yang berlaku.

IV. Hasil dan Pembahasan

IV.1 Hasil dan Analisis Perhitungan Poligon

Kerangka kontrol atau poligon pada penelitian ini terdiri dari 8 titik patok dan 1 titik *Bench Mark*, berikut merupakan hasil dari pengukuran kerangka kontrol:

Tabel 1 Daftar koordinat kerangka kontrol

No. Titik	Koordinat (m)		Elevasi (m)
	X	Y	
GD 15	438021,85	9220655,65	203,723
1	438014,09	9220644,66	206,779
2	438033,41	9220626,30	207,132
No. Titik	Koordinat (m)		Elevasi (m)
	X	Y	
3	438041,43	9220604,67	208,977
4	438023,56	9220602,94	206,006
5	437995,27	9220596,86	207,63
6	437970,55	9220604,34	206,536
7	437974,58	9220637,33	206,246
8	437976,91	9220673,02	201,622

Mengacu kepada SNI 19-6742-2002, mengenai ketentuan spesifikasi pengolahan jaring titik kontrol orde-4, harus memenuhi beberapa persyaratan :

1. Kesalahan penutup sudut harus lebih kecil dari $10''\sqrt{n}$, dimana n adalah jumlah titik poligon. Pada penelitian ini terdapat 9 buah titik poligon, sehingga kesalahan penutup sudut harus lebih kecil dari 30''.
2. Kesalahan penutup linier jarak harus lebih kecil dari 1:6.000.

Sehingga kerangka kontrol yang diukur dengan:

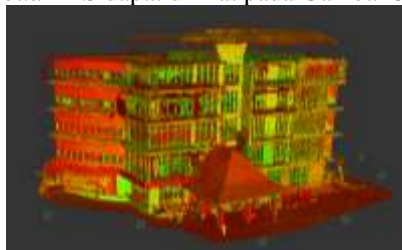
1. Kesalahan penutup sudut = 1''
2. Kesalahan penutup linier jarak = 1: 940.678,820

Telah memenuhi syarat kerangka kontrol orde-4

IV.2 Hasil dan Analisis Pengolahan TLS

IV.2.1 Hasil dan Analisis Registrasi Point Cloud

Hasil penggabungan atau registrasi dari data *point cloud* TLS dapat dilihat pada Gambar 5

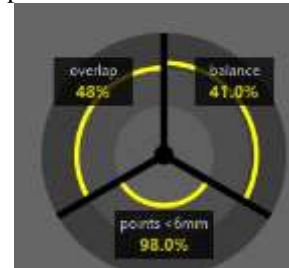


Gambar 5 Hasil registrasi *point cloud*

Pada Gambar 5 menunjukkan hasil penggabungan atau registrasi *point cloud* dari 260 titik pemindaian. Tampilan *point cloud* menggunakan mode *intensity* yang didapatkan dari nilai intensitas laser pada tiap objek. Pada bagian yang berwarna merah mengindikasikan bahwa nilai intensitas atau

nilai sinyal kembali dari laser cukup rendah. Pada bagian yang berwarna hijau mengindikasikan bahwa nilai intensitas laser cukup tinggi.

Secara keseluruhan, hasil registrasi *point cloud* pada penelitian ini terbilang cukup baik seperti yang dapat kita lihat pada Gambar 6



Gambar 6 Report registrasi TLS

Hasil tersebut dapat dikatakan baik, karena tiap parameter telah memenuhi toleransi, yaitu:

- a) *Overlap* = 48% (toleransi >30%)
- b) *Balance* = 41% (toleransi >20%)
- c) *Points (<6mm)* = 98% (toleransi >90%)

IV.2.2 Hasil dan Analisis Georeferensi Point Cloud

Titik ikat atau GCP pada penelitian ini terdiri dari 5 buah titik yang tersebar di seluruh bagian gedung. Alat yang digunakan dalam pengukuran GCP adalah *Total Station reflectorless*, dengan cara membidik langsung ke objek gedung yang akan dijadikan objek GCP misalnya pojok atap, pilar maupun dinding.

Gambar 7 Report hasil georeferensi TLS

Dapat dilihat pada hasil *Root Mean Square* (RMS) tiap titik memiliki nilai RMS dibawah 2 cm, dengan nilai tertinggi 1,747 cm, nilai terendah adalah 0,296 cm dan rata-rata nilai RMS adalah 1,043 cm. Berdasarkan spesifikasi alat leica BLK 360 memiliki *point accuracy* sekitar 10 mm. Sedangkan pada penelitian ini nilai RMS berada pada rentang 2,96 mm hingga 17,47 mm. Sehingga nilai RMS pada penelitian ini dapat terbilang cukup karena memiliki selisih sekitar 7 mm dengan spesifikasi alat yang disebutkan.

Pada penelitian ini nilai *Alignment Confidence* memiliki berkisar dari 4 cm hingga 7 cm, dengan nilai tertinggi adalah 7,310 cm dan nilai terendah adalah 4,164 cm serta nilai rata-rata *Alignment Confidence* adalah 56.34 cm. Pada penelitian Cox R. A (2015), dijelaskan bahwa batas nilai *Alignment confidence* pada proses georeferensi data TLS 0,6 m. Sehingga nilai *Alignment Confidence* pada penelitian ini terbilang cukup baik.

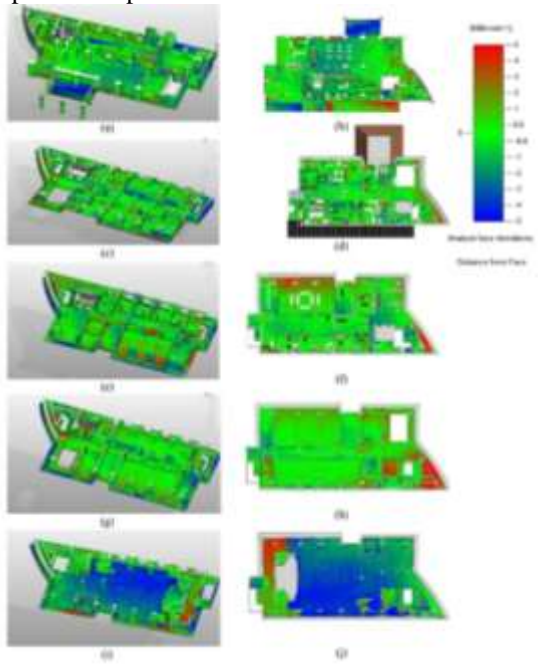
IV.3 Hasil dan Analisis Pembuatan BIM

Pada penelitian ini, pembuatan *Building Information Model* (BIM) dilakukan dengan cara melakukan digitasi *on screen* pada hasil *point cloud*. Proses ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Autodesk Revit, berikut merupakan hasil dari pembuatan BIM gedung Dekanat Baru Fakultas Teknik UNDIP



Gambar 8 Hasil pembuatan BIM

Proses pembuatan BIM dibentuk dari kumpulan *point cloud* yang kemudian didigitasi menjadi objek gedung. Oleh karena itu penting untuk mengevaluasi deviasi dari BIM berdasarkan *point cloud*. Evaluasi deviasi BIM ke *point cloud* dilakukan secara bertahap pada tiap lantai. Hasil evaluasi deviasi ditampilkan dalam bentuk peta gradien serta diagram, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9 Hasil deviasi BIM ke *point cloud*

Pada hasil evaluasi deviasi, rata-rata didominasi oleh hasil yang berwarna hijau. Hal ini mengindikasikan bahwa deviasi jarak antara *point cloud* dengan data BIM berkisar antar 0 hingga 2 mm. Area yang berwarna merah mengindikasikan bahwa deviasi jarak antara *point cloud* dengan BIM berada di kisaran +5 mm, hal tersebut dikarenakan pada area yang berwarna merah terdapat obstacle diatasnya, seperti meja, tumpukan kardus figura dan juga kursi. Sedangkan untuk area yang berwarna biru mengindikasikan bahwa permukaan BIM berada di atas permukaan *point cloud* pada kisaran angka 2 hingga 5 mm, sehingga area yang berwarna biru memiliki nilai negatif.

Jika dibandingkan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Bonduel, M. dkk (2017). Hasil deviasi pada penelitian ini terbilang cukup baik, karena pada penelitian Bonduela dkk hasil deviasi yang diperoleh berkisar antara 0 mm untuk nilai terendah dan 25 mm untuk nilai tertingginya. Sedangkan pada penelitian ini deviasi berkisar antara 2 mm hingga 5 mm, yang mana nilai tersebut lebih baik dari penelitian sebelumnya

IV.4 Hasil dan Analisis Jalur Evakuasi Bencana

Hasil pembuatan jalur evakuasi dapat langsung di tampilkan ke dalam *project* Revit apabila aplikasi Dynamo telah terintegrasi dengan Revit. Pembuatan jalur evakuasi hanya dilakukan pada bagian gedung lantai dasar-3. Pada bagian gedung lantai 4, jalur evakuasi tidak dibentuk dikarenakan pada bagian tersebut merupakan *hall* terbuka dengan jumlah ruangan yang sedikit.



Gambar 10 Jalur evakuasi pada lantai dasar

Hasil dari jalur evakuasi pada lantai dasar dapat kita lihat pada Gambar 10. Pada jalur evakuasi ini, jalur terpanjang adalah 21,251 m dan jalur terpendek adalah 1,5217m serta rata-rata panjang jalur adalah 14,105m.



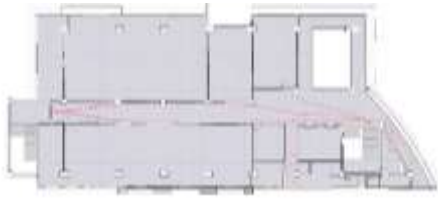
Gambar 11 Jalur evakuasi pada lantai satu

Hasil dari jalur evakuasi pada lantai satu dapat kita lihat pada Gambar 11. Pada jalur evakuasi ini, jalur terpanjang adalah 17,290 m, jalur terpendek adalah 3,009m serta rata-rata panjang jalur adalah 9,514 m.



Gambar 12 Jalur evakuasi pada lantai dua

Hasil dari jalur evakuasi pada lantai dua dapat kita lihat pada Gambar 12. Pada jalur evakuasi ini, jalur terpanjang adalah 17,718 m, jalur terpendek adalah 2,761m serta rata-rata panjang jalur adalah 10,480 m.



Gambar 13 Jalur evakuasi pada lantai tiga

Hasil dari jalur evakuasi pada lantai tiga dapat kita lihat pada Gambar 13. Pada jalur evakuasi ini, jalur terpanjang adalah 17,851 m, jalur terpendek adalah 2,816 m serta rata-rata panjang jalur adalah 11,911 m.

IV.5 Hasil dan Analisis Simulasi Evakuasi Bencana

Pada penelitian ini, pembuatan simulasi evakuasi bencana kebakaran berbasis BIM yang dibuat berdasarkan data *point cloud*, sehingga BIM telah merepresentasikan keadaan gedung yang sebenarnya. Proses pembuatan simulasi dilakukan dengan perangkat lunak Pathfinder.

IV.5.1 Hasil dan Analisis Simulasi Kasus Pertama

Pada kasus simulasi ini, peneliti berusaha membuat keadaan saat simulasi semirip mungkin dengan keadaan lapangan. Dimana berdasarkan observasi lapangan peneliti menemukan hasil bahwa pintu keluar lantai dasar hingga 3 selalu dalam keadaan tertutup. Hasil ini dapat kita lihat pada Gambar 14 yang merupakan grafik durasi lamanya proses evakuasi.



Gambar 14 Grafik durasi evakuasi pada kasus pertama

Pada kasus pertama ini, durasi evakuasi berlangsung selama 130,6 detik hingga penghuni gedung paling akhir meninggalkan gedung. Rata-rata penghuni gedung dapat melakukan proses evakuasi dalam rentang waktu 60,7 detik. Jarak terpanjang yang ditempuh oleh penghuni untuk melakukan evakuasi adalah 95,1 m dan jarak terpendek adalah 3,9 m serta jarak rata-rata yang ditempuh oleh masing-masing penghuni untuk mencapai akses keluar adalah 56,0 m.

IV.5.2 Hasil dan Analisis Simulasi Kasus Kedua

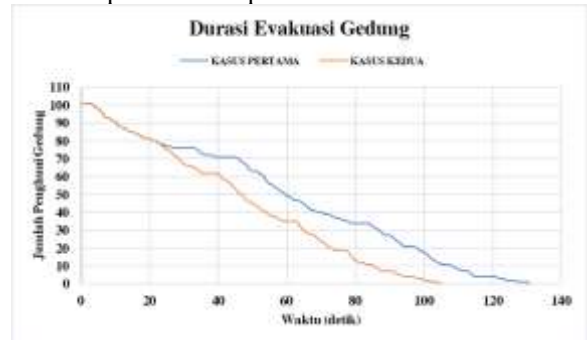
Pada simulasi ini, diasumsikan kondisi jalur evakuasi gedung dalam keadaan ideal, dimana pintu akses keluar di lantai dasar hingga lantai 3 dalam keadaan terbuka. Hasil ini dapat kita lihat pada Gambar 15 yang merupakan grafik durasi lamanya proses evakuasi.



Gambar 15 Grafik durasi evakuasi pada kasus kedua

Grafik tersebut merepresentasikan jumlah penghuni yang tersisa dalam gedung pada waktu tertentu. Proses evakuasi berlangsung selama 104,8 detik hingga penghuni terakhir meninggalkan gedung. Rata-rata penghuni gedung dapat meninggalkan gedung dalam waktu 47,2 detik. Jarak tempuh penghuni gedung terpanjang adalah 64,4 m dan jarak terpendek adalah 3,9 m serta rata-rata jarak tempuh tiap penghuni adalah 37,2 m

Hasil dari kedua kasus akan dibandingkan untuk mengetahui jauh tingkat perbedaan yang terjadi. Perbedaan durasi antara kasus pertama dengan kasus kedua dapat kita lihat pada Gambar 16.



Gambar 16 Grafik perbedaan durasi evakuasi pada kasus pertama dan kedua

Dapat terlihat pada awal proses evakuasi, kedua kasus simulasi memiliki durasi yang relatif sama. Akan tetapi sejak detik ke 25 hingga akhir simulasi durasi kedua kasus tersebut memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Untuk perbedaan tersebut dapat kita lihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2 Data perbedaan kasus pertama dengan kedua

	Kasus Pertama	Kasus Kedua	Perbedaan
Durasi Evakuasi	130,6 s	104,8 s	25,8 s
Rata-Rata Durasi	60,7 s	47,2 s	13,5 s
Jarak Tempuh Maksimal	95,1 m	64,4 m	30,7 m
Jarak Tempuh Minimal	3,9 m	3,9 m	0 m
Rata-Rata Jarak Tempuh	56 m	37,2 m	18,8 m

IV.6 Hasil dan Analisis Uji Ketelitian

Uji ketelitian dilakukan untuk mengetahui tingkat ketelitian dari point cloud serta model BIM yang dibuat. Metode uji ketelitian dilakukan dengan

membandingkan dimensi jarak pada lapangan, *point cloud* dan juga BIM. Pengukuran dimensi jarak pada lapangan menggunakan alat *roll meter*.

Pada penelitian Ariza-López, F. J. dkk (2019) juga telah menjelaskan klasifikasi kualitas data ukuran apabila dilakukan perbandingan panjang desain dinding interior dengan panjang sebenarnya. Berikut merupakan kelas pengklasifikasiannya:

- a) Baik, jika panjang model berbeda kurang dari $\pm 2\%$ dari panjang sebenarnya.
- b) Dapat diterima, jika panjang model berbeda kurang dari $\pm 5\%$ tetapi lebih dari $\pm 2\%$ dari yang panjang sebenarnya.
- c) Tidak dapat diterima, jika panjang model berbeda lebih dari $\pm 5\%$ dari panjang yang sebenarnya.

Hasil perhitungan uji kualitas data BIM dapat dilihat pada Tabel 3

Tabel 3 Hasil uji kualitas geometri pada data BIM

ID	ROLL METER (m)	BIM (m)	Selisih ROLL METER - BIM (m)	Kualitas
#001	1,45	1,472	-0,022	Baik
#003	2,115	2,126	-0,011	Baik
#008	2,37	2,376	-0,006	Baik
#005	0,94	0,934	0,006	Baik
#012	0,64	0,645	-0,005	Baik
#014	1,42	1,415	0,005	Baik
#021	1,344	1,344	0	Baik
#023	2,435	2,43	0,005	Baik
#025	2,2	2,202	-0,002	Baik
#034	1,83	1,814	0,016	Baik
#035	1,46	1,46	0	Baik
#036	1,44	1,45	-0,01	Baik
#038	1,48	1,483	-0,003	Baik
#046	1,33	1,328	0,002	Baik
#057	1,805	1,811	-0,006	Baik
#059	1,4	1,406	-0,006	Baik
#062	2,16	2,147	0,013	Baik
#064	2,37	2,358	0,012	Baik
#067	1,34	1,33	0,01	Baik
#069	1,88	1,877	0,003	Baik
#070	1,4	1,368	0,032	Dapat Diterima
#071	0,84	0,84	0	Baik
#072	0,545	0,578	-0,033	Baik

#074	0,55	0,58	-0,03	Baik
#075	1,8	1,784	0,016	Baik

Dari data tersebut tabel tersebut maka dapat dihitung nilai:

- 1. Rata-rata selisih jarak Roll = 0,008 m meter denga TLS
- 2. Selisih terbesar jarak Roll = 0,025 m meter denga TLS
- 3. Nilai RMSE selisih jarak Roll = 0,012 m meter denga TLS
- 4. Rata-rata selisih jarak Roll = 0,010 m meter denga BIM
- 5. Selisih terbesar jarak Roll = 0,032 m meter denga BIM
- 6. Nilai RMSE selisih jarak Roll = 0,014 m meter denga BIM

Rata-rata hasil dari pengukuran ini memiliki kualitas baik. Dan jika dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh Alvatora Partogi Hutagalung (2017) hasil ketelitian pada uji penelitian ini lebih baik, yaitu :

- a) RMSE pada penelitian Alvatora Partogi Hutagalung = berkisar di 0,0173 m dan 0,0213 m
- b) RMSE pada penelitian ini = berkisar di 0,0116 m dan 0,0139 m

Dapat dilihat bahwa nilai RMSE pada penelitian ini lebih kecil ketimbang penelitian dahulu. Hal ini dapat mengindikasikan hasil yang diperoleh pada penelitian ini memiliki kualitas yang cukup lebih baik.

V. Kesimpulan dan Saran

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- 1. Hasil evaluasi deviasi BIM ke *point cloud* rata-rata didominasi oleh hasil yang berwarna hijau. Hal ini mengindikasikan bahwa deviasi jarak antara *point cloud* dengan data BIM berkisar antar 0 hingga 2 mm. Area berwarna merah mengindikasikan bahwa deviasi jarak antara *point cloud* dengan BIM berada di kisaran +5 mm, dikarenakan terdapat *obstacle* di atasnya, seperti meja. Area yang berwarna biru mengindikasikan bahwa permukaan BIM berada di atas permukaan *point cloud* pada kisaran angka 2 hingga 5 mm, sehingga area yang berwarna biru memiliki nilai negatif. Jika mengacu ke standar spesifikasi dari USBID (U.S. Institute of Building Documentation, 2016), penelitian ini memiliki tingkat akurasi atau LOA 40 hingga 50 (*Level of Accuracy*). Tingkat akurasi tersebut mengindikasikan bahwa hasil deviasi pada penelitian ini memiliki tingkat akurasi *medium-high*.
- 2. Simulasi evakuasi bencana dilakukan dengan menggunakan algoritma *A*Search Algorithm* dengan memanfaatkan data BIM sebagai basis model gedung. Simulasi evakuasi terbagi menjadi 2 kasus, yaitu:

- a. Kasus pertama, yaitu keadaan pintu keluar lantai dasar hingga 3 dalam kondisi tertutup. Dalam kasus ini, proses evakuasi membutuhkan waktu 130,6 detik untuk mengevakuasi 101 orang dari gedung. Rata-rata penghuni gedung melakukan evakuasi dalam waktu 60,7 detik. Jarak terpanjang yang ditempuh oleh salah seorang penghuni untuk melakukan evakuasi adalah 95,1 m dan jarak terpendek adalah 3,9 m. Rata-rata penghuni gedung menempuh jarak 56,0 m untuk mencapai akses keluar.
 - b. Kasus kedua, yaitu keadaan ideal dimana seluruh akses keluar gedung dalam kondisi terbuka. Dalam kasus ini, proses evakuasi membutuhkan waktu 104,8 detik untuk mengevakuasi 101 orang dari gedung. Rata-rata penghuni gedung melakukan evakuasi dalam waktu 47,2 detik. Jarak terpanjang yang ditempuh oleh salah seorang penghuni untuk melakukan evakuasi adalah 64,4 m dan jarak terpendek adalah 3,9 m. Rata-rata penghuni gedung menempuh jarak 37,2 m untuk mencapai akses keluar.
3. Secara visual hasil pembuatan jalur evakuasi sudah cukup baik, dimana tidak ada jalur yang menabrak dinding atau *obstacle*. Jarak maksimal jalur evakuasi pada gedung ini adalah 21,251 m pada lantai dasar; 17,290 m pada lantai 1; 17,718 m pada lantai 2 dan 17,851m pada lantai 3. Panjang jalur tersebut telah sesuai dengan regulasi yang berlaku, yang mana menurut PERMEN PU no. 26 tahun 2008 jarak tempuh maksimal pada gedung hunian pendidikan adalah 62 m. Akan tetapi pada gedung Dekanat Baru Fakultas Teknik UNDIP, terdapat 2 area yang tidak memenuhi standar minimum lebar akses keluar, toleransi lebar akses keluar adalah 0,915 m. Sedangkan pada hunian gedung ini terdapat lebar koridor sebesar 0,718 m pada lantai dasar serta lebar pintu 0,732 m pada lantai 2.

V.2 Saran

Penyusunan penelitian ini tidak terlepas dari adanya keterbatasan dan kendala, berikut beberapa saran yang dapat diperhatikan untuk peneliti selanjutnya dalam penyusunan penelitian yang serupa, yaitu:

1. Saat melakukan pengukuran, untuk objek yang bersifat reflektif seperti kaca dan cermin lebih baik ditutup terlebih dahulu.
2. Georeferensi menggunakan fitur alami pada gedung cenderung menghasilkan hasil yang kurang baik, sehingga akan lebih baik apabila saat melakukan pengukuran TLS objek di lapangan diberi tanda target seperti stiker dan sebagainya.
3. Dalam pengolahan data *point cloud* sebaiknya dilakukan *filtering* pada objek-objek yang

kurang begitu penting seperti manusia dan objek lainnya.

4. Dalam pembuatan *Building Information Model* menggunakan acuan data *point cloud*. Akan lebih mudah jika data *point cloud* di reduksi (*gridding*) terlebih dahulu. Selain itu untuk mempermudah pemodelan dapat menggunakan aplikasi tambahan pada Revit yaitu Undet.
5. Untuk penelitian kedepannya dapat dipertimbangkan kasus simulasi kebakaran multi source, dimana terdapat beberapa kebakaran pada beberapa titik-titik tertentu.

Daftar Pustaka

- Ariza-López F. J., Rodríguez-Avi J., Reinoso-Gordo J. F. dan Ariza-López, Í. A., (2019). Quality Control of “As Built” BIM Datasets using the ISO 19157 Framework and a Multiple Hypothesis Testing Method based on Proportions.
- Barber D. dan Mills J., (2001). Laser Scanning And Photogrammetry: 21st Century Metrology. *Department of Geomatics, University of Newcastle upon Tyne*.
- Bonduela M., Bassiera M., Vergauwena M., Pauwelsb P. dan Kleina R., (2017). Scan-To-Bim Output Validation: Towards A Standardized Geometric Quality Assessment Of Building Information Models Based On Point Clouds. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W8*.
- Cox R. A., (2015). Real-world comparisons between target-based and targetless point-cloud registration in FARO Scene, *Trimble RealWorks and Autodesk Recap*. University of Southern Queensland.
- Ding Y., Yang L. dan Rao P., (2013). Investigating the merging behavior at the floor-stair interface of high rise building based on computer simulations. *Procedia Engineering 62 (2013)*. 463 – 469.
- Eastman C., Teicholz P., Sacks R. dan Liston K., (2008). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Elswijk L. V., (2011). Hierarchical Path-finding Theta *: Combining Hierarchical A * with Theta *. Bachelor Thesis Radboud University, 1-9.
- Ghilani C. D. dan Wolf P. R., (2017). *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis*. Penerbit John Wiley dan Sons, Inc.
- Pemerintah Indonesia, (2008). Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 26 Tahun 2008 Tentang Persyaratan Teknis Sistem Proteksi

- Kebakaran Pada Bangunan Gedung Dan Lingkungan. PERMEN PU No.26/PRT/M/2008, 5.
- Quintero M. S., Genechten B. V. dan García J. L., (2008). Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning: Training material based on practical applications. Leonardo da Vinci Programme of the European Union.
- Reshetyuk Y., (2009). Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial. Doctoral thesis in Infrastructure, Geodesy, Royal Institute of Technology.
- Semič D., (2016). Analiza požarne varnosti Kristalne palače na podlagi optimiziranega modela BIM. Magistrsko delo = Fire safety analysis of the. heis Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.