

Model 3D Multi-Objek Hasil Ekstraksi Data Lidar

Multi-Object 3D Model from Lidar Data

Wahyu Marta Mutiarasari*, Ni Putu Praja Chyntia, Afradon Aditya Kurniawan, Alamsyah Pangestu, Lailatul Maghfiroh, Pratiwi Vaherera, Alfian Bima Nur Sa'id

Program Sarjana Terapan Teknologi Survei dan Pemetaan Dasar, Departemen Teknologi Kebumian, Sekolah Vokasi-UGM, Sekip Unit 1, Caturtunggal, Depok, Sleman, D.I. Yogyakarta, 55281, Indonesia

*Korespondensi penulis: wahyu.marta.m@ugm.ac.id

Diterima: 10112021; Diperbaiki: 02082022; Disetujui: 15052023; Dipublikasi: 08092023

Abstrak: Pemanfaatan model kota 3D kini semakin beragam di berbagai bidang. Penelitian sebelumnya menerapkan model kota 3D antara lain untuk pemetaan Urban Heat Island, pemodelan kebisingan kota hingga dokumentasi bangunan bersejarah. Untuk memodelkan objek dalam 3D, dikenal bermacam-macam metode pengukuran. Salah satu teknologi yang saat ini dikenal cepat dan hemat biaya dalam akuisisi data 3D adalah LiDAR. Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan data hasil pengukuran dengan LiDAR untuk dibuat model 3D. Akuisisi dengan teknologi LiDAR dilaksanakan di area kampus Sekolah Vokasi UGM. Hasil pengukuran adalah data *point cloud*, yaitu titik-titik yang persebarannya padat dan mengandung nilai x,y,z . Point cloud tersebut diklasifikasi dengan perangkat lunak Microstation v8i TerraSolid v16 dengan metode otomatis dan manual sehingga *point cloud* menunjukkan jenis objek-objek yang ada di area penelitian. Objek yang diklasifikasikan dalam penelitian ini adalah *ground, low vegetation, medium vegetation, high vegetation* dan *building*. Hasil klasifikasi tersebut kemudian dimodelkan menggunakan perangkat lunak yang sama, yaitu Microstation v8i TerraSolid v16. Model 3D untuk bangunan dibuat sebagai LOD 2. Ketelitian data vertikal data LiDAR dihitung berdasarkan nilai RMSE antara titik hasil pengukuran dengan GPS dengan nilai *point cloud*.

Copyright © 2023 Geoid. All rights reserved.

Abstract: The use of 3D city models is now increasingly diverse in various fields. Previous studies have applied 3D city models, among others, for mapping the Urban Heat Island, modeling city noise, and documenting historical buildings. To model objects in 3D, various measurement methods are known. One technology that is currently known to be fast and cost-effective in 3D data acquisition is LiDAR. This study aims to utilize the measurement data using LiDAR to create a 3D model. The acquisition with LiDAR technology was carried out in the UGM Vocational School campus area. The measurement results are point cloud data, namely points that are densely distributed and contain x,y,z values. The point cloud is classified with the Microstation v8i TerraSolid v16 software with automatic and manual methods so that the point cloud shows the types of objects in the research area. Objects classified in this study are *ground, low vegetation, medium vegetation, high vegetation* and *building*. The classification results are then modeled also using Microstation v8i TerraSolid v16 software. The 3D model for the building is made as LOD 2. The vertical accuracy of the LiDAR data is calculated based on the RMSE value between the measured points with GPS and the point cloud value.

Kata kunci: model 3D, LiDAR, *point cloud*

Cara untuk sitasi: Mutiarasari, W.M., Chyntia, N.P.P., Kurniawan, A.A., Pangestu, A., Maghfiroh, L., Vaherera, P., & Sa'id, A.B.N.. (2023). Model 3D Multi-Objek Hasil Ekstraksi Data Lidar. *Geoid*, 19(1), 41 - 48.

Pendahuluan

Model 3D dapat mendeskripsikan objek di permukaan bumi menyerupai kenyataannya. Saat ini, kegunaan model 3D semakin meluas terutama model kota 3D, yang mana paling tidak digunakan pada 29 kasus yang merupakan bagian dari lebih 100 aplikasi (Biljecki et al., 2015). Model kota 3D disebutkan sukses untuk proses bisnis perencanaan kota (Moser et al., 2010). Pemanfaatan lain dari model kota 3D adalah pemetaan Urban Heat Island (Ujang et al., 2018), geo-klustering 3D untuk jaringan sensor nirkabel (Azri et al., 2019), pemodelan kebisingan kota (Kumar et al., 2017) serta dokumentasi bangunan heritage (Gkadolou et al., 2020). Untuk mendapatkan data 3D dapat dilaksanakan berbagai macam survei. Teknologi pengukuran yang saat ini dikenal sebagai LiDAR menawarkan kemampuan yang cepat, berkelanjutan dan hemat biaya (Jamali et al., 2019). Data hasil pengukuran berupa point cloud menawarkan akurasi yang tinggi dengan jumlah data yang padat. Dengan data tersebut bisa didapatkan kualitas model 3D yang baik pula.

Penelitian tentang penggunaan data LiDAR telah banyak dilakukan sebelumnya. Popovic et al. (2017) melaksanakan penelitian yang bertujuan untuk menggunakan data LiDAR dalam merepresentasikan 3D wilayah kota Novi Sad dalam CityGML. Metode ekstraksi untuk informasinya dilakukan dengan metode yang berbeda yang kemudian disimpan dalam format CityGML. Produk akhir dari penelitian ini adalah model 3D dalam CityGML yang dapat menampilkan warna dan tekstur objek untuk memberikan tampilan yang lebih baik. Penelitian yang lain oleh Buyuksalih et al. (2019) mendeskripsikan pembuatan model kota 3D Istanbul, Turki. Model kota 3D dibuat dalam LoD 2 dan LoD 3 berdasarkan data point cloud dan data tambahan lainnya. Penelitian ini bertujuan menyediakan informasi 3D untuk departemen perencanaan kota yang relevan. Peralatan yang digunakan antara lain dari Riegl, TerraSolid, TerraScan, FME Workbench dan Microstation. Hasil penelitian berupa pemodelan 3D dengan akurasi tinggi menggambarkan peran utamanya dalam suatu perkembangan.

Pada tahun 2019, penelitian oleh Jamali et al. menggunakan dua pendekatan otomatis untuk ekstraksi fitur bangunan. Data yang digunakan adalah point cloud dan set data gambar digital. Dua metode yang dibandingkan adalah teknik otomatis object-based dan teknik threshold-based. Hasil penelitian ini menunjukkan ekstraksi fitur bangunan menggunakan teknik otomatis object-based menyajikan hasil yang lebih baik. Murtiyoso et al. (2020) melakukan penelitian dengan membuat alur kerja otomatis untuk ekstraksi atap bangunan dari data point cloud. Data diakuisi menggunakan UAV sehingga diklaim berbiaya murah. Penelitian menunjukkan hasil yang baik pada atap dengan kompleksitas rendah sampai medium. Berdasarkan hal tersebut, dihasilkan LoD 2 untuk model 3D nya.

Pada penelitian ini bermaksud untuk membuat model 3D yang diekstraksi dari data LiDAR. Model 3D didapatkan dengan melakukan ekstraksi multi-objek, yaitu bangunan dan vegetasi dengan menggunakan Microstation. Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah dapat menyediakan informasi spasial dengan akurasi yang baik untuk area kampus Sekolah Vokasi UGM. Hasil penelitian berupa model 3D ini diharapkan dapat mendukung kegiatan dokumentasi multi-objek di area kampus Sekolah Vokasi UGM.

Data dan Metode

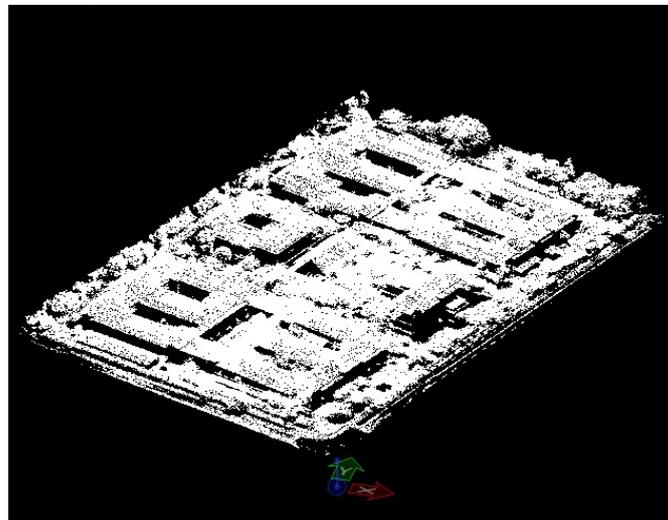
Data penelitian pertama yang digunakan adalah data *point cloud* hasil pengukuran dengan teknologi *airborne* LiDAR. *Point cloud* adalah data titik-titik x, y, z yang sangat padat terhadap suatu objek yang diobservasi. Sebelum diolah, data point clouds telah melalui proses pengolahan awal, yang bertujuan menghilangkan *noise* pada data hasil pengukuran. Hasil akuisisi LiDAR berdasarkan jalur terbang wahana, dalam penelitian ini digunakan drone, mencakup area yang cukup luas. Karena fokus penelitian pada area kampus Sekolah Vokasi UGM, maka dilakukan pemotongan data sesuai lokasi penelitian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Data *point cloud* tersebut tersimpan dalam file format LAS yang memiliki sistem koordinat referensi UTM/Universal Transverse Mercator. *Point cloud* hasil pengukuran disajikan dalam satu warna, yaitu putih

(seperti pada Gambar 2). Hal ini menunjukkan bahwa *point cloud* masih belum terklasifikasi dan belum dapat memberikan informasi jenis objek yang ada di area kampus Sekolah Vokasi UGM.



Gambar 1. Lokasi penelitian di area kampus Sekolah Vokasi UGM



Gambar 2. *Point cloud* hasil pengukuran LiDAR di area kampus Sekolah Vokasi UGM

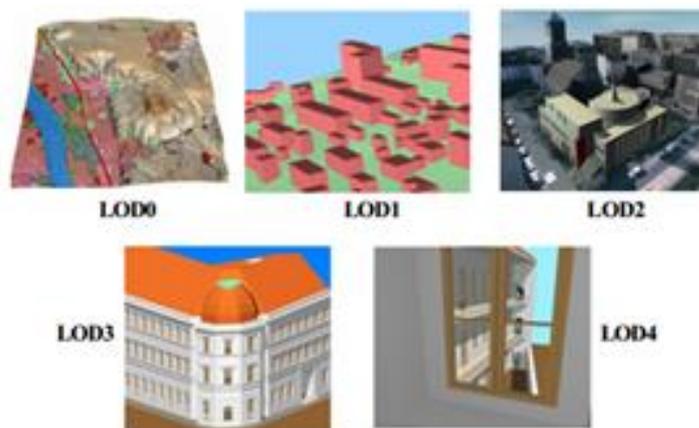
Data kedua yang digunakan adalah Titik Kontrol Tanah (TKT) atau Ground Control Point (GCP) sebanyak 6 titik. TKT didapatkan dari hasil pengukuran survei terestris dengan menggunakan teknologi GPS. Titik-titik ini didesain tersebar merata di area penelitian yang digunakan untuk melakukan uji ketelitian vertikal. LiDAR atau Light Detection and Ranging merupakan metode yang digunakan untuk mengumpulkan data dalam kerapatan yang tinggi (*dense data*) dan memiliki nilai elevasi yang akurat. LiDAR menggunakan sensor aktif, yang artinya memiliki sumber energi internal, gunanya selain merekam energi pantulan juga memancarkan laser pulsa. Berdasarkan platform atau wahana yang digunakan, pengukuran LiDAR dapat dikenal sebagai *airborne* LiDAR, *ground-based* LiDAR dan *satellite* LiDAR.

Prinsip yang digunakan dalam teknologi LiDAR adalah waktu tempuh energi menentukan jarak objek yang diobservasi. Oleh karena itu, waktu yang diperlukan laser pulsa untuk mengenai objek dan kemudian kembali lagi ke sensor direkam dan diukur. Sistem *airborne* LiDAR memungkinkan sensor untuk menangkap sampai lima nilai pantulan laser pulsa yang mengenai objek. Sistem ini disebut dengan Multiple Return System. Dengan sistem seperti ini dikatakan dapat meningkatkan jumlah data sekitar 30%. LiDAR dilengkapi dengan GPS Receiver untuk melacak posisi dan tinggi wahana sehingga dapat diketahui posisi pantulan laser dari permukaan bumi serta Inertial Measurement Unit (IMU) yang digunakan untuk melacak arah dan kemiringan wahana (*roll*, *pitch* dan *yaw*). Data hasil pengukuran dengan LiDAR berupa *point cloud*, yaitu sekumpulan

data yang berjumlah besar yang terdiri atas data 3D (koordinat x, y dan z). Format yang umum digunakan untuk penyimpanan data point cloud disebut LAS (LiDAR Aerial Survey).

Model 3 dimensi merupakan kumpulan geometri yang terdiri dari titik-titik X, Y, Z pada ruang 3 dimensi. Ada beberapa cara untuk mendapatkan model 3 dimensi, yaitu otomatis (misal dengan teknik scanning), manual (dengan menggambar model 3 dimensi dengan tangan melalui mouse), dan prosedural. Secara manual model 3 dimensi bisa didapatkan dengan pemodelan geometri. Pemodelan geometri merupakan pemodelan yang terkait dengan penggunaan dan pemanfaatan tools untuk membuat, mempresentasikan, dan memanipulasi bentuk geometri (Marsh, 2002). Ada beberapa skema pemodelan geometri, antara lain model wireframe, model surface, Constructive Solid Geometry (CSG), dan Boundary Representation (BREP). Untuk mendapatkan hasil model 3D yang solid digunakan model CSG dalam penelitian ini. CSG merupakan teknik pemodelan yang menerapkan prinsip pemodelan solid atau volume-based model. Model solid atau volumetrik merupakan model 3 dimensi yang mendefinisikan batas dan isi model 3 dimensi secara utuh dengan koordinat 3 dimensi, yang artinya tidak ada ruang hampa di tengahnya. CSG merupakan teknik pemodelan 3 dimensi yang memiliki 3 prinsip utama, yaitu disusun dari kumpulan bentuk primitif 3 dimensi, dimungkinkan melakukan transformasi (perbesaran/perkecilan, rotasi, dan translasi), dan dapat diterapkan 3 operasi himpunan (*union*, *intersection*, dan *subtract / difference*).

LODs diperlukan untuk mencerminkan pengumpulan data independen proses dengan persyaratan aplikasi yang berbeda (perbedaan visualnya dapat dilihat pada Gambar 3). Tingkat yang kasar LOD0 pada dasarnya adalah dua setengah dimensi Digital Terrain Model di mana sebuah udara gambar atau peta dapat terbungkus. Bangunan dapat diwakili dalam LOD0 oleh jejak atau atap tepi poligon. LOD1 adalah model blok terkenal yang terdiri dari bangunan prisma dengan struktur atap datar. Sebaliknya, Bangunan di LOD2 telah dibedakan struktur atap dan permukaan batas tematis dibedakan. LOD3 menunjukkan model arsitektur dengan dinding rinci dan struktur atap yang berpotensi termasuk pintu dan jendela. LOD4 melengkapi model LOD3 dengan menambahkan struktur interior untuk bangunan. Misalnya, bangunan di LOD4 adalah terdiri dari kamar, pintu interior, tangga, dan furnitur. Dalam semua informasi LODs penampilan seperti high resolution tekstur dapat dipetakan ke struktur.



Gambar 3. Lima Level of Detail (LOD) yang didefinisikan oleh CityGML
Sumber. OGC, 2012



Gambar 4. Alur penelitian

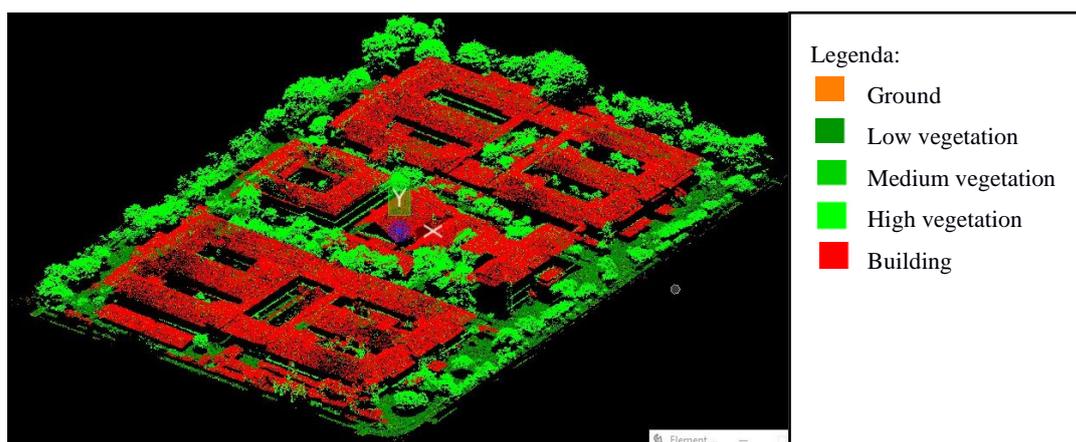
Pengolahan data *point cloud* dilakukan dengan perangkat lunak Microstation v8i TerraSolid v16, dimulai dari klasifikasi hingga pemodelan 3 dimensinya. Selain itu, data hasil pengukuran LiDAR ini diuji untuk mendapatkan besar ketelitiannya. Ilustrasi proses pengolahan data secara garis besar ditampilkan pada Gambar 4. Klasifikasi otomatis dilakukan dengan mendefinisikan parameter tinggi objek. Dalam klasifikasi otomatis, parameter tinggi yang didefinisikan selanjutnya diproses dengan menggunakan algoritma pada perangkat lunak secara bertahap. Proses pertama dikenal sebagai *filtering*, proses ini bertujuan untuk memisahkan data objek *ground* dengan *non-ground*. Setelah itu, data *point cloud* yang *non-ground* diklasifikasi menjadi beberapa objek, antara lain *low vegetation*, *medium vegetation*, *high vegetation* dan *buildings*. Pada penelitian ini, proses klasifikasi manual juga dilakukan untuk menyempurnakan hasil klasifikasi otomatis. Klasifikasi manual dilakukan dengan melakukan editing klas pada *point cloud*. Artinya, pada proses ini dilakukan penggantian klas titik-titik yang dianggap tidak benar hasil klasifikasinya.

Pengolahan titik data LiDAR dilanjutkan dengan proses vektorisasi, yaitu proses untuk mendapatkan bentuk objek hasil klasifikasi dengan menggunakan garis/*line*. Pada awalnya, batas-batas objek *buildings*/bangunan dibuat secara otomatis dengan mendefinisikan parameter objek *buildings*. Selanjutnya, dilakukan editing manual terhadap batas agar batas objek *buildings* menjadi lebih rapi. Berdasarkan batas tersebut, kemudian dibuat model 3D dari objek *buildings*. Untuk menentukan kualitas data LiDAR, dilakukan uji ketelitian vertikal terhadap data *point cloud*. Ketelitian ini ditentukan dengan menghitung RMSE yang didapatkan dengan menghitung selisih nilai elevasi antara *point cloud* dengan titik uji hasil pengukuran secara terestris. Dalam penelitian ini, terdapat 6 titik uji yang diambil dengan pengukuran GPS RTK di area kampus SV UGM.

Analisis dalam penelitian ini meliputi analisis hasil klasifikasi, analisis terhadap hasil pemodelan 3D serta analisis hasil uji ketelitian. Analisis pada hasil klasifikasi dan hasil pemodelan 3D dilakukan secara visual, yaitu menganalisis secara kualitatif kenampakan hasil terhadap keadaan objek yang sesungguhnya di lapangan. Sementara itu, analisis uji ketelitian pada data *point cloud* dilakukan secara kuantitatif, yaitu menganalisis nilai hitungan merupakan ketelitian yang baik atau buruk.

Hasil dan Pembahasan

1. Klasifikasi Data Point Cloud



Gambar 5. Visualisasi Hasil Klasifikasi Data *Point Cloud*

Objek yang diklasifikasikan dalam penelitian ini adalah *ground*, *low vegetation*, *medium vegetation*, *high vegetation* dan *buildings*. Pada proses klasifikasi otomatis terdapat kekurangan, yaitu hasil klasifikasi tidak sempurna, terutama pada pengelompokan objek *high vegetation* dan *buildings*. Dalam klasifikasi otomatis, objek *buildings* didefinisikan parameter minimum area adalah 16 m² untuk mendapatkan model 3D dengan tingkat detail LoD2. Hasil klasifikasi otomatis yang tidak sempurna ditandai dengan adanya sebagian hasil pada

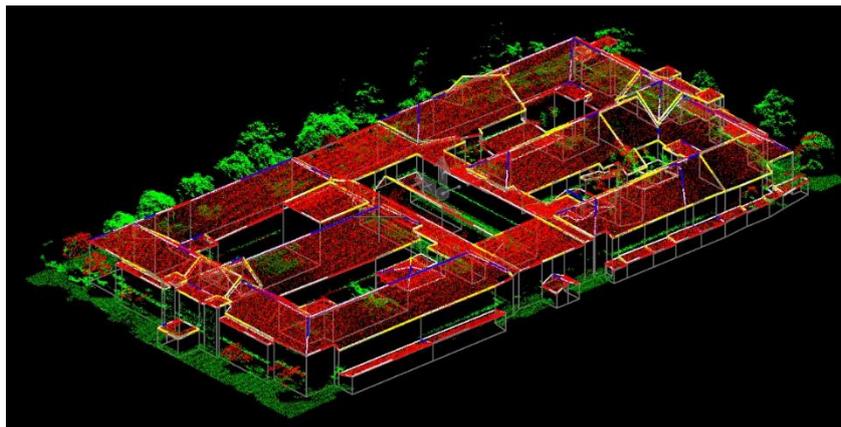
klas objek *buildings* yang sesungguhnya merupakan objek *high vegetation*. Oleh karena itu, klasifikasi manual dilaksanakan sehingga titik-titik yang bukan menrepresentasikan objek *buildings* diganti klasnya menjadi *high vegetation*.

Gabungan klasifikasi otomatis dan manual yang dilaksanakan memberikan hasil yang lebih baik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Pada gambar tersebut, klas *ground* berwarna coklat, klas *vegetation (low, medium dan high)* berwarna hijau dan klas *buildings* berwarna merah. Dalam hal ini, didapatkan hasil klasifikasi yang benar untuk objek *buildings* dan *high vegetation*. Artinya, seluruh bagian objek *high vegetation* tidak ada yang masuk ke dalam klas *buildings*, begitu juga sebaliknya.

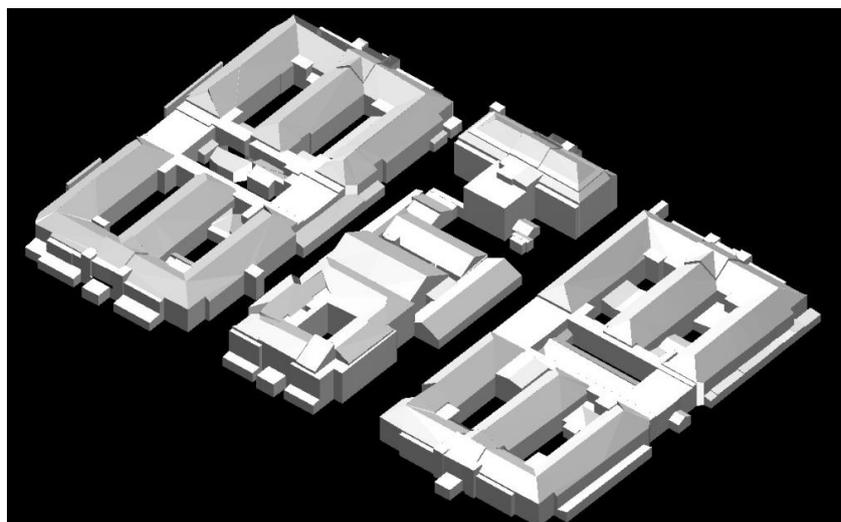
2. Model 3D

Ekstraksi objek *buildings* atau bangunan dengan penentuan batas bangunan menjadi dasar untuk membuat model 3D. Hasil dari proses yang dikenal sebagai vektorisasi ini ditunjukkan pada Gambar 6. Pada gambar tersebut, batas bangunan berupa garis vektor terbentuk.

Model 3D meliputi seluruh bangunan yang ada di area kampus SV UGM (Gambar 7). Hasil pemodelan merupakan model 3D LoD2, yaitu model 3D yang merupakan bentuk blok bangunan yang memiliki atap. Model 3D dengan tingkat kedetilan tersebut sesuai dengan parameter yang diisikan saat klasifikasi sehingga dapat terbentuk atap bangunan. Atap bangunan memiliki detail yang tinggi, hal ini ditunjukkan dengan kualitas bentuk atap model bangunan yang sesuai dengan bentuk atap bangunan yang sesungguhnya.



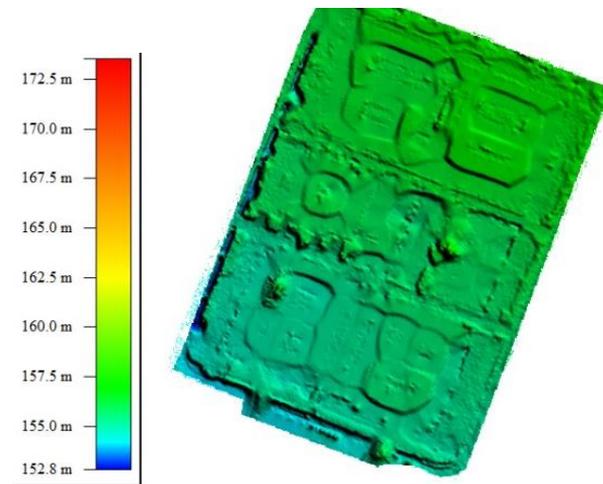
Gambar 6. Hasil Vektorisasi untuk Ekstraksi Objek Bangunan



Gambar 7. Hasil Pemodelan Berupa Model 3D LoD2 SV UGM

3. Ketelitian Vertikal Data *Point Cloud*

Ketelitian data *point cloud* ditinjau dari posisi vertikal atau elevasinya. Posisi vertikal yang ditunjukkan pada data *point cloud* dibandingkan dengan posisi vertikal dari 6 titik uji hasil pengukuran dengan GPS yang tersebar merata di area penelitian. *Point cloud* yang digunakan dalam uji ketelitian ini adalah klas *ground* yang kemudian diolah menjadi Digital Terrain Model atau DTM. Hasil DTM ditunjukkan pada Gambar 8 berikut.



Gambar 8. Digital Terrain Model SV UGM

Tabel 1. Hasil Uji Ketelitian Vertikal Data *Point Cloud*

<i>Titik</i>	<i>X (m)</i>	<i>Y (m)</i>	<i>Elevasi GPS (m)</i>	<i>Elevasi DTM (m)</i>	<i>Selisih Tinggi (DZ)</i>	$(DZ)^2$
GCP 1	431,070.72	9,140,591.72	156.098	156.481	-0.383	0.146689
GCP 2	431,024.14	9,140,673.59	156.799	156.949	-0.15	0.0225
GCP 3	430,925.64	9,140,656.79	156.115	156.293	-0.178	0.031684
GCP 4	431,026.97	9,140,484.19	155.089	155.493	-0.404	0.163216
GCP 5	430,868.57	9,140,512.75	154.755	154.816	-0.061	0.003721
GCP 6	430,923.52	9,140,460.50	155.209	155.109	0.1	0.01
					Jumlah	0.37781
					Rata-rata	0.062968
					RMSE	0.079
					Akurasi LE90	0.13015

Hasil perhitungan ditunjukkan dengan nilai RMSE dan disajikan pada Tabel 1. Tabel 1 menunjukkan bahwa akurasi atau ketelitian vertikal data *point cloud* yang merupakan selisih antara elevasi GPS dan DTM berkisar antara 6,1 cm sampai 40,4 cm. RMSE dari hitungan selisih vertikal titik yang diuji adalah 7,9 cm. LE90 atau Linear Error 90% didapatkan sebesar 0.13015. Berdasarkan Peraturan Kepala BIG No 15 Tahun 2014, LE90 sebesar 0.13015 masuk dalam ketelitian vertikal kelas 1.

Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, yang pertama, pengolahan data *point cloud* pada tahap klasifikasi menghasilkan lima klas yaitu *ground*, *low vegetation*, *medium vegetation*, *high vegetation* dan *buildings*. Kesalahan dapat terjadi pada tahap klasifikasi sehingga perlu pengetahuan yang baik terhadap keadaan sesungguhnya di lapangan. Selain itu, kombinasi metode klasifikasi otomatis dan manual baik digunakan untuk menyempurnakan hasil klasifikasi. Kesimpulan selanjutnya, pemodelan multi-objek dilakukan terhadap objek *ground* dan *buildings*, yang hasilnya berupa Digital Terrain Model dan model

bangunan LoD2. Hasil pemodelan 3D merupakan bangunan dengan tipe LoD2 yang sesuai dengan pendefinisian parameter saat klasifikasi. Bangunan yang ada di area kampus SV UGM dapat dimodelkan seluruhnya dengan detil atap yang tinggi. Kesimpulan terakhir, berdasarkan uji ketelitian vertikal, hasil perhitungan RMSE sebesar 7.9 cm menunjukkan data *point cloud* memiliki ketelitian yang tinggi untuk pemodelan ini dan berdasar Peraturan Kepala BIG No 15 Tahun 2014 masuk ke dalam kelas 1.

Ucapan Terimakasih

Dukungan dan bantuan dari berbagai pihak turut berperan dalam penyelesaian penelitian ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak Sekolah Vokasi UGM atas izin survei lapangan dengan memperhatikan protokol kesehatan di tengah pandemi. Kepada mitra penelitian PT Geo Survey Persada Indonesia penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan tenaga dan alat selama survei lapangan. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada pihak pengelola, dosen, pegawai serta mahasiswa Prodi D4 Teknologi Survei dan Pemetaan Dasar yang mendukung pelaksanaan penelitian.

Daftar Pustaka

- Azri, S., Ujang, U., & Abdul Rahman, A. (2019). 3D geo-clustering for wireless sensor network in smart city. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4/W12), 11–16. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-11-2019>
- 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. <https://doi.org/10.3390/ijgi4042842>
- Buyuksalih, G., Baskaraca, P., Bayburt, S., Buyuksalih, I., & Abdul Rahman, A. (2019). 3D city modelling of Istanbul based on LiDAR data and panoramic images – Issues and challenges. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4/W12), 51–60. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-51-2019>
- Gkadolou, E., Prastacos, P., & Loupas, T. (2020). Documentation of cultural heritage monuments with CityGML: an application for ancient theatres. *AGILE: GIScience Series*, 1, 1–16. <https://doi.org/10.5194/agile-giss-1-4-2020>
- Gröger, G., Kolbe, T. H., Nagel, C., & Häfele, K.-H. (2012). OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Version 2.0.0. *OGC Document No. 12-019*, 344. https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=47842
- Jamali, A., Kumar, P., & Abdul Rahman, A. (2019). AUTOMATED EXTRACTION of BUILDINGS from AERIAL LIDAR POINT CLOUDS and DIGITAL IMAGING DATASETS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4/W16), 303–308. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-303-2019>
- Kumar, K., Ledoux, H., Commandeur, T. J. F., & Stoter, J. E. (2017). MODELLING URBAN NOISE in CITYGML ADE: CASE of the NETHERLANDS. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(4W5), 73–81. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W5-73-2017>
- Moser, J., Albrecht, F., & Kosar, B. (2010). Beyond visualisation - 3D GIS analyses for virtual city models. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 38(4 PART W15), 143–146.
- Murtiyoso, A., Veriandi, M., Suwardhi, D., Soeksmantono, B., & Harto, A. B. (2020). Automatic Workflow for Roof Extraction and Generation of 3D CityGML Models from Low-Cost UAV Image-Derived Point Clouds. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12), 743. <https://doi.org/10.3390/ijgi9120743>
- Popovic, D., Govedarica, M., Jovanovic, D., Radulovic, A., & Simeunovic, V. (2017). 3D Visualization of Urban Area Using Lidar Technology and CityGML. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 95(4). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/4/042006>
- Ujang, U., Azri, S., Zahir, M., Abdul Rahman, A., & Choon, T. L. (2018). Urban heat island micro-mapping via 3D city model. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4/W10), 201–207. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W10-201-2018>



This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).