

## **Digital Terrain Model LiDAR untuk Perhitungan Volume dan Analisis Kerawanan Banjir di Wilayah Lumpur Sidoarjo**

### *Digital Terrain Model LiDAR for Volume Calculation and Flood Hazard Analysis in Sidoarjo Mudflow Area*

**Salsabila Ananda<sup>1</sup>, Heki Hapsari Handayani<sup>1\*</sup>, dan G. Haryuatmanto<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Departemen Teknik Geomatika, FTSPK-ITS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

<sup>2</sup>PT. Waindo Specterra Indonesia, Jakarta, 12510, Indonesia

\*Korespondensi penulis: hapsari@geodesy.its.ac.id

Diterima: 17082023; Diperbaiki: 29082023; Disetujui: 01092023; Dipublikasi: 08092023

**Abstrak:** Pada 29 Mei 2006, terjadi semburan lumpur panas di Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur yang terus meluas hingga saat ini. Hal ini mengancam keselamatan penduduk di sekitar wilayah tersebut karena potensi lumpur meluap melebihi batas tanggul penahan. Untuk mencegah situasi tersebut, diperlukan analisis volume dan tingkat kerawanan lumpur Sidoarjo. Analisis dilakukan menggunakan data *Digital Terrain Model* (DTM) dari hasil pengolahan data *Light Detection and Ranging* (LiDAR) wilayah lumpur Sidoarjo yang memiliki akurasi *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0,195 m dan tingkat kepercayaan LE90 0,322 m untuk standar BIG, serta akurasi vertikal kelas 20 cm dengan tingkat kepercayaan 95% untuk standar ASPRS. Volume lumpur dihitung berdasarkan jenisnya menggunakan metode prismoidal, didapatkan total volume lumpur di dalam tanggul penahan adalah 29.633.305,17 m<sup>3</sup>, dengan volume Air Berlumpur sebesar 9.987.931,57 m<sup>3</sup>, Lumpur Mulai Mengering sebesar 4.719.359,92 m<sup>3</sup>, Lumpur Kering sebesar 6.993.143,74 m<sup>3</sup>, dan Lumpur Basah sebesar 7.932.869,94m<sup>3</sup>. Dalam analisis kerawanan, dua parameter yang digunakan adalah kemiringan lereng dan tutupan lahan. Berdasarkan parameter kemiringan lereng, wilayah lumpur Sidoarjo memiliki kelas Datar sebesar 7.672.441 m<sup>2</sup> yang memenuhi 59,291% dari luasan total wilayah penelitian. Sedangkan berdasarkan parameter tutupan lahan, wilayah lumpur Sidoarjo dengan kelas Tinggi untuk klasifikasi Lahan Terbangun, Jalan, Jalur Kereta, Sungai, Danau, dan Lumpur memiliki luas 7.648.611 m<sup>2</sup>, serta kelas Sedang untuk klasifikasi Pertanian, Sawah, Tambak, Kebun, Rawa, dan Lahan Kosong memiliki luas 5.320.286 m<sup>2</sup>. Hasil analisis kerawanan menunjukkan adanya dua kelas kerawanan, yaitu kelas Sedang dengan luas 1.371.472 m<sup>2</sup> atau 10,599% dari total luas wilayah penelitian, dan kelas Tinggi dengan luas 11.568.748 m<sup>2</sup> atau 89,401% dari total luas wilayah penelitian. Berdasarkan informasi dari DTM, volume lumpur, dan Peta Kerawanan ini, dapat diprediksi bahwa arah aliran banjir lumpur Sidoarjo kemungkinan besar menuju ke arah timur laut dari tanggul pembatas lumpur, terutama menuju Kecamatan Tanggulangin, Kabupaten Sidoarjo.

*Copyright © 2023 Geoid. All rights reserved.*

**Abstract:** On May 29, 2006, a hot mud eruption occurred in Sidoarjo Regency, East Java, which has been continuously expanding up to the present time. This poses a threat to the safety of residents in the surrounding areas due to the potential overflow of mud beyond the retaining embankment. To prevent such a situation, it is necessary to conduct volume calculation and flood hazard analysis in Sidoarjo mudflow. The analysis is performed using the *Digital Terrain Model* (DTM) data derived from the processing of *Light Detection and Ranging* (LiDAR) data in the Sidoarjo mudflow area. The DTM has a *Root Mean Square Error* (RMSE) accuracy of 0.195 m and a LE90 confidence level of 0.322 m for BIG standard, as well as a vertical accuracy of 20 cm with a 95% confidence level for ASPRS standard. The volume of mud is calculated based on its types using the prismoidal method, resulting in a total volume of 29,633,305.17 m<sup>3</sup> within the retaining embankment. This includes volumes of Mud-Containing Water amounting to 9,987,931.57 m<sup>3</sup>, Starting-to-Dry Mud with 4,719,359.92 m<sup>3</sup>, Dry Mud with 6,993,143.74 m<sup>3</sup>, and Wet Mud with 7,932,869.94 m<sup>3</sup>. In the hazard analysis, two parameters are considered: slope gradient and land cover. Based on the slope gradient parameter, the Sidoarjo mudflow area is classified as Flat with an area of 7,672,441 m<sup>2</sup>, covering 59.291% of the total research area. As for the land cover parameter, the Sidoarjo mudflow area is classified as High for Built-up Land, Roads, Railways, Rivers, Lakes, and Mud, covering an area of 7,648,611 m<sup>2</sup>, and Medium for Agriculture, Paddy Fields, Fishponds, Plantations, Marshes, and Empty Land, with an area of 5,320,286 m<sup>2</sup>. The results of the hazard analysis indicate the existence of two hazard classes: Medium with an area of 1,371,472 m<sup>2</sup>, accounting for 10.599% of the total research area, and High with an area of 11,568,748 m<sup>2</sup>, representing 89.401% of the total research area. Based on the information from the DTM, mud volume, and Hazard Map, it can be predicted that the direction of the Sidoarjo mudflow flood is likely to flow towards the northeast of the mud-retaining embankment, particularly towards Tanggulangin District, Sidoarjo Regency."

---

Kata kunci: Lumpur Sidoarjo, LiDAR, *Digital Terrain Model*, Volume Lumpur, Kerawanan Banjir Lumpur.

---

Cara untuk sitasi: Ananda, S., Handayani, H.H., Haryuatmanto, G. (2023). *Digital Terrain Model* LiDAR untuk Perhitungan Volume dan Analisis Kerawanan Banjir di Wilayah Lumpur Sidoarjo. *Geoid*,19(1), 164 - 179

---

## Pendahuluan

Bencana lumpur Sidoarjo merupakan peristiwa menyemburnya lumpur panas yang mengandung material vulkanis dan disertai gas sejak 29 Mei 2006 di lokasi pengeboran Lapindo Brantas Inc. di Dusun Balongnongo, Desa Renoenongo, Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. Luapan lumpur yang terus menerus ini dapat berbahaya bagi masyarakat yang tinggal di sekitar wilayah luapan tersebut karena adanya bahaya tanggul jebol yang telah terjadi beberapa kali sebelumnya (Akbari & Hariyanto, 2012). Bahaya tanggul jebol ini dapat mengakibatkan banjir lumpur yang dapat memberikan dampak terhadap berbagai aspek, yaitu tidak berhasilnya usaha penghentian semburan, juga mengakibatkan kerusakan infrastruktur yang ada di sekitar lokasi semburan seperti rusaknya bangunan, fasilitas umum, pemukiman, sawah, tambak, dan perkebunan milik warga, serta dapat menghambat jalan arteri hingga jalur kereta api (Setyaningrum, 2022).

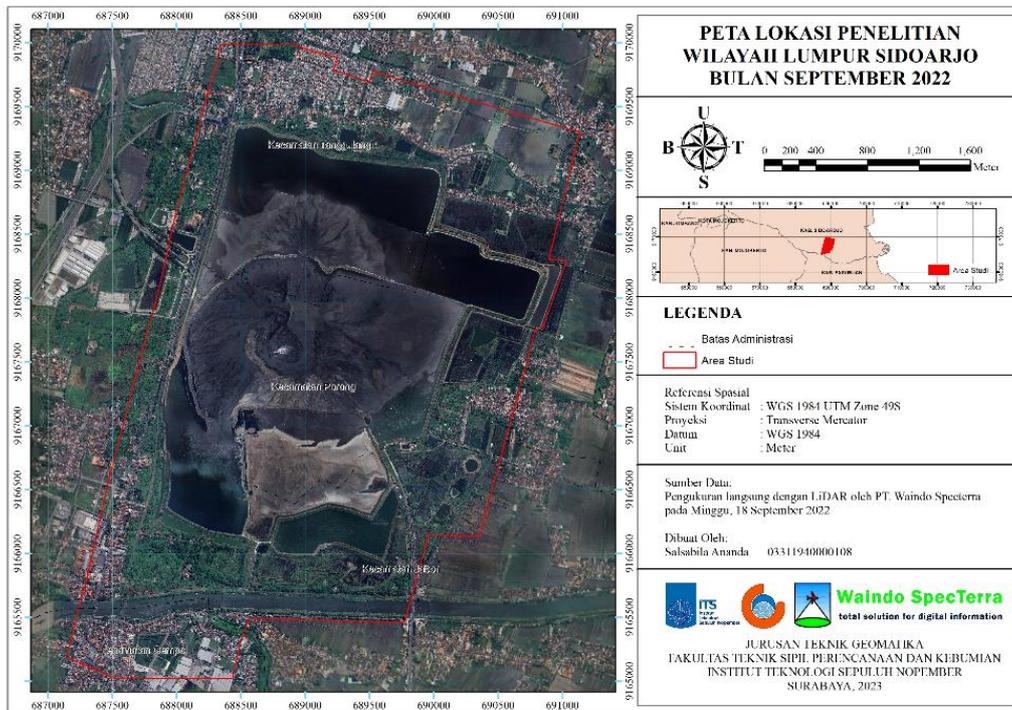
Sebagai upaya pencegahan dan penanggulangan masalah luapan lumpur, masalah sosial, dan masalah infrastruktur di sekitar kawasan area terdampak, Pusat Pengendalian Lumpur Sidoarjo (PPLS) memiliki tanggung jawab untuk memperhatikan risiko lingkungan yang terkecil dari dampak semburan lumpur Sidoarjo (Pusat Pengendalian Lumpur Sidoarjo (PPLS), 2020). Terkait dengan fungsi dari PPLS dalam menangani semburan lumpur ini, salah satu teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*) dapat dimanfaatkan dalam proses pemantauan dan mengevaluasi bencana yang ada, yaitu dengan menggunakan *Light Detection and Ranging* (LiDAR) dimana teknologi ini tidak dimiliki oleh pihak PPLS sehingga dapat menjadi alternatif teknologi yang dapat digunakan.

LiDAR merupakan teknologi penginderaan jauh sensor aktif yang terdiri dari kombinasi antara pemancar laser serta mekanisme pemindaian yang dapat mengukur jarak ke target dan orientasinya dari sinar laser sehingga menghasilkan data berupa titik dengan koordinat X, Y, dan Z yang disebut dengan *point cloud* (Carter, Shrestha, Tuell, Bloomquist, & Sartori, 2001). Dari data ini nantinya dapat diolah menjadi *Digital Terrain Model* (DTM) yang merupakan deskripsi digital dari permukaan medan dari poin 3D yang mendekati sebagian atau seluruh permukaan *terrain* (Hirt, 2015). Dari DTM dapat diperoleh informasi secara akurat terkait elevasi untuk perhitungan volume tiap jenis tutupan lumpur, dimana klasifikasi jenis tutupan lumpur ini didapatkan dari analisis interpretasi visual data *orthophoto* wilayah lumpur Sidoarjo sehingga didapatkan klasifikasi jenis lumpur, yaitu Air Berlumpur, Lumpur Basah, Lumpur Mulai Meringing, dan Lumpur Kering (Widodo & Hariyanto, 2016) (Taufik, Khomsin, Pratomo, & Widyasari, 2009). Perhitungan volume menggunakan metode prismoidal, metode ini dipilih karena mempertimbangkan kemiringan atau perubahan lereng pada permukaan yang sedang dihitung volumenya sehingga dapat mengatasi perubahan kemiringan pada permukaan yang sedang diukur (Aruga, Sessions, & Akay, 2004).

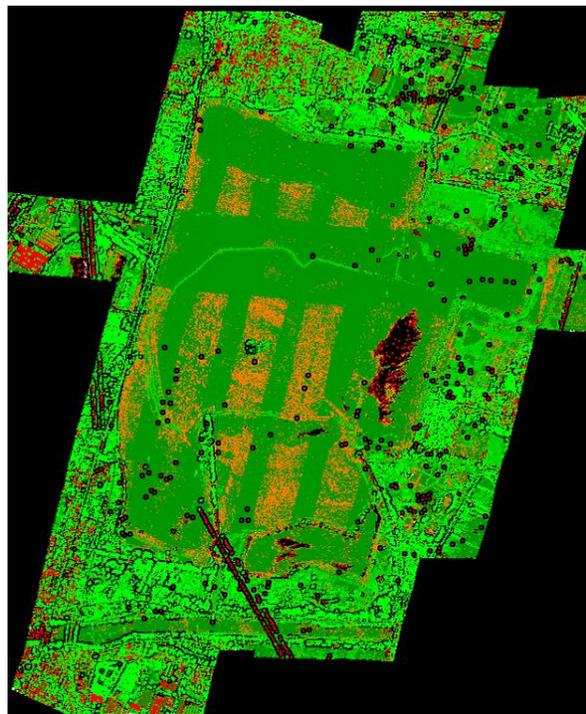
Selain itu, data DTM juga dapat digunakan untuk analisis kerawanan banjir lumpur dengan mengolah informasi elevasi menjadi informasi kemiringan lereng wilayah Lumpur Sidoarjo. Jika data kemiringan lereng ini dikolaborasi dengan data tutupan lahan maka nantinya dapat dihasilkan analisis kerawanan lumpur Sidoarjo beserta perkiraan arah aliran banjir lumpur yang dapat berguna untuk antisipasi jika terjadi luapan saat tanggul penahan lumpur tidak lagi mampu menampung lumpur yang terus menerus keluar (Surjoatmodjo, 2019). Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat membantu pihak PPLS dalam perhitungan volume lumpur yang berada di dalam tanggul penahan. Juga diharapkan dapat diaplikasikan dalam proses penyajian kondisi bencana yang terjadi dalam bentuk peta berbasis Sistem Informasi Geografis, sehingga dapat dijadikan sebagai arahan dalam melakukan analisis penentuan potensi arah aliran banjir lumpur dalam bentuk Peta Kerawanan sehingga dapat mengurangi dampak yang dapat merugikan masyarakat yang tinggal di sekitar wilayah semburan lumpur ini.

## Data dan Metode

Lokasi yang digunakan dalam penelitian ini berada di wilayah semburan lumpur Sidoarjo yang berlokasi di Kecamatan Porong, Kecamatan Jabon, dan Kecamatan Tanggulangin, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. Wilayah ini terletak di dataran rendah pesisir utara Jawa Timur. Wilayah lumpur Sidoarjo sebagian besar merupakan area pertanian dengan ladang-ladang padi yang subur.



Gambar 1. Lokasi penelitian



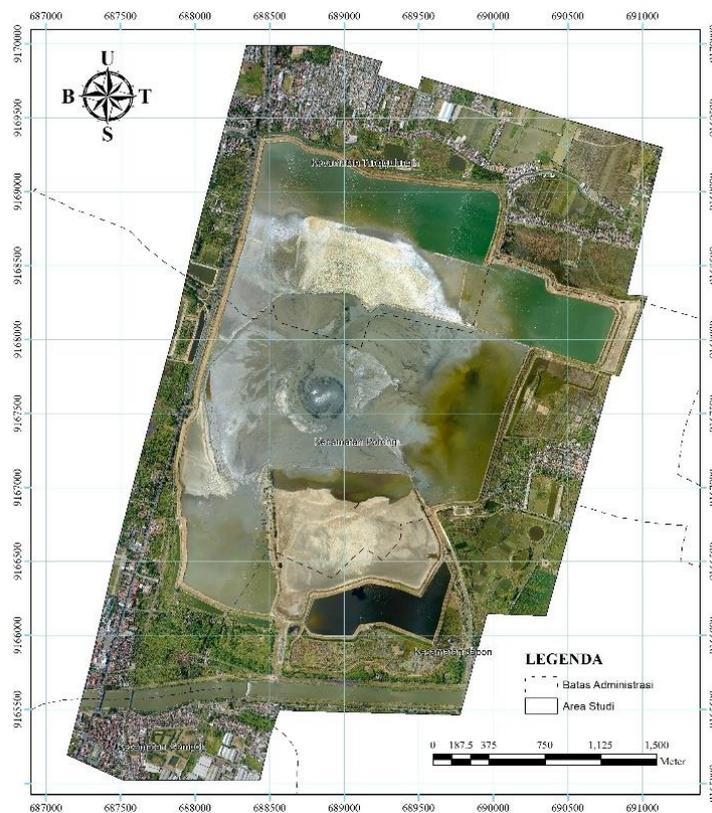
Gambar 2. Data *point cloud* LiDAR wilayah lumpur Sidoarjo

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data *point cloud* LiDAR wilayah lumpur Sidoarjo dan data *orthophoto* wilayah lumpur Sidoarjo yang diambil pada 18 September 2022 oleh PT. Waindo Specterra, data koordinat hasil pengukuran terestris menggunakan GPS wilayah lumpur Sidoarjo yang diambil oleh PPLS pada Bulan September 2022, dan *shapefile* batas administrasi Kabupaten Sidoarjo dengan skala 1:25000 diperoleh dari *website* geospasial Indonesia (Geospasial, 2023). Untuk data LiDAR yang digunakan merupakan *point cloud* yang sudah dilakukan pengolahan *filtering* dan klasifikasi kelas *point cloud* LiDAR sesuai dengan format LAS 1.2. Dua tahapan ini dilakukan menggunakan algoritma *macro* di *software* Terrasolid. Berikut merupakan spesifikasi data LiDAR yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 1. Spesifikasi data LiDAR

| Parameter                              | Spesifikasi                    |
|--|--------------------------------|
| <i>Scanner Frequency</i>               | 48 Hz                          |
| <i>Scanner Half Angel</i>              | 20°                            |
| <i>Above Ground Level</i>              | 725 m                          |
| <i>Flightline</i>                      | 8                              |
| <i>LAS version</i>                     | LAS 1.2                        |
| <i>Position and orientation system</i> | POS AV™ AP50 (OEM)             |
| <i>System PRF</i>                      | 150 kHz                        |
| <i>Flight Speed</i>                    | 50 m/s                         |
| <i>Flight Altitude</i>                 | 731 m                          |
| <i>Multipulse</i>                      | Yes                            |
| <i>Gyro-stabilization</i>              | SOMAG GSM 3000 integration kit |

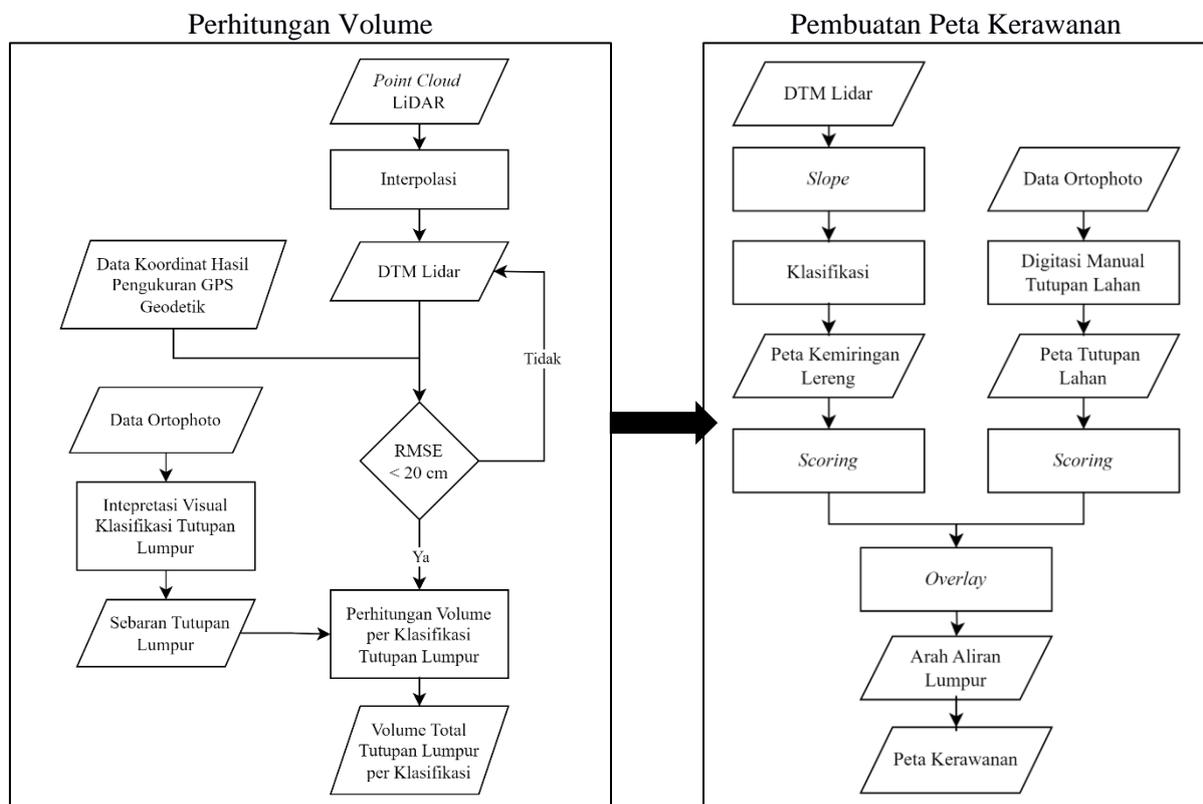
Sementara data *orthophoto* yang digunakan merupakan hasil pengolahan foto udara menggunakan *software* Inpho UASMaster 9.1. Berikut merupakan spesifikasi data *orthophoto* yang digunakan pada penelitian ini.

Gambar 3. Data *orthophoto* wilayah lumpur Sidoarjo

Tabel 2. Spesifikasi *orthophoto* wilayah lumpur Sidoarjo

| Parameter         | Spesifikasi          |
|-------------------|----------------------|
| $\Sigma$ foto     | 289                  |
| Camera sensor     | 11.608 x 8.708 px    |
| Camera pixel size | 4.6 x 4.6 micron     |
| Orthophoto GSD    | 10 cm/px             |
| Ortho pixel size  | 45.641 x 63.806 px   |
| <i>f. length</i>  | 51.690 mm            |
| Camera GSD        | 62.700 mm            |
| Principal point   | -0.0023 mm           |
| Altitude mean     | 754.4 m              |
| Coordinate system | WGS84 UTM Zone 49S   |
| Image capture     | Phase One iXU-RS1000 |

Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan MicroStation CONNECT Edition, Terrasolid, Global Mapper, dan ArcGIS. Sedangkan pada tahapan pengolahan data pada penelitian mencakup semua langkah untuk mendapatkan hasil volume jenis lumpur dan kerawanan banjir lumpur. Berikut merupakan tahapan pengolahan data yang dilakukan pada penelitian ini.



Gambar 4. Diagram alir pengolahan data

Langkah awal adalah melakukan interpolasi *point cloud* LiDAR kelas *Ground* agar didapatkan *Digital Terrain Model* (DTM) wilayah lumpur Sidoarjo. Interpolasi dilakukan menggunakan metode *triangulated irregular network* (TIN) sehingga didapatkan representasi permukaan atau relief dari wilayah lumpur Sidoarjo berdasarkan titik-titik data yang terukur. Selanjutnya dilakukan perhitungan uji akurasi untuk DTM yang dihasilkan menggunakan perhitungan RMSE antara koordinat elevasi yang didapatkan dari pengukuran GPS Geodetik dan koordinat elevasi yang terdapat pada data LiDAR. Jika hasil uji akurasi memenuhi standar yang ditetapkan, lalu dilakukan perhitungan volume tiap jenis lumpur yang didapatkan dari interpretasi visual data *orthophoto* wilayah lumpur Sidoarjo untuk mendapatkan klasifikasi jenis lumpur, yaitu Air Berlumpur,

Lumpur Basah, Lumpur Mulai Mengering, dan Lumpur Kering sesuai dengan *ground truth* pengamatan di lapangan. Perhitungan volume lumpur dilakukan secara otomatis menggunakan *software* MicroStation CONNECT Edition dengan dukungan TerraModeler. Perhitungan volume ini menggunakan metode prismoidal dengan DTM LiDAR sebagai *upper surface* dan elevasi 3 mdpl sebagai *lower surface*, metode ini dipilih karena metode ini mempertimbangkan kemiringan atau perubahan lereng pada permukaan yang sedang dihitung volumenya sehingga dapat mengatasi perubahan kemiringan pada permukaan yang sedang diukur dalam hal ini pada permukaan lumpur yang kompleks (Aruga, Sessions, & Akay, 2004).

Langkah selanjutnya adalah pembuatan Peta Kerawanan, dimana dibutuhkan Peta Kemiringan Lereng dan Peta Tutupan Lahan untuk mendapatkan kerawanan wilayah lumpur Sidoarjo. Peta Kemiringan Lereng didapat dari pengolahan interpolasi elevasi dari data *surface* DTM LiDAR yang sudah diolah sebelumnya menggunakan *software* ArcGIS. Hal pertama yang dilakukan adalah pemotongan wilayah sesuai wilayah studi kasus. Selanjutnya adalah membuat kemiringan lerengnya dengan fungsi *Slope* di *Symbology* yang akan membentuk tampilan baru dengan tampilan berdasarkan kemiringan lereng. Akan tetapi kelas kemiringan lereng tersebut belum sesuai hingga perlu di lakukan klasifikasi dengan menggunakan fungsi *Reclassify* pada *3D Analyst Tools*. Kriteria yang di masukan pada tahap ini akan di sesuaikan dengan nilai *scoring* yang telah ditentukan. Untuk pembuatan Peta Tutupan Lahan di dapat dengan cara digitasi manual tutupan lahan yang diklasifikasikan menjadi beberapa kelas, diantaranya adalah kelas Lahan Terbangun, Jalan, Jalur Kereta, Sungai, Danau, Vegetasi, Sawah, Tambak, Kebun, Rawa, dan Lahan Kosong. Masing-masing tutupan lahan ini akan dilakukan *scoring* sesuai dengan nilai yang ditentukan. Setelah kedua parameter didapatkan, dilakukan *overlay* menggunakan metode *weighted overlay* dimana akan dihitung kombinasi linier dari nilai *pixel* dari tiap lapisan raster yang berbeda. Setiap lapisan raster diberi bobot yang sesuai dengan tingkat kontribusinya terhadap kerawanan, tetapi pada penelitian ini semua parameter dianggap memiliki bobot yang sama sehingga didapatkan Peta Kerawanan yang dapat digunakan untuk analisis prediksi arah aliran lumpur yang didapatkan dari penilaian obyektif berdasarkan parameter yang ditentukan.

## Hasil dan Pembahasan

### 1. Data LiDAR

Data LiDAR yang digunakan pada penelitian ini memiliki total keseluruhan *point* 132.547.905 *points* yang terbagi menjadi beberapa kelas, salah satunya kelas *Ground* yang memiliki 41.733.236,00-*point* dengan densitas *point* sebesar 3,903 *samples/m<sup>2</sup>* dan rata-rata intensitas *point* sebesar 286,0. Seluruh *point* kelas *ground* akan digunakan untuk pembuatan *Digital Terrain Model* (DTM) wilayah lumpur Sidoarjo.

Tabel 3. Klasifikasi *Point cloud* Data LiDAR

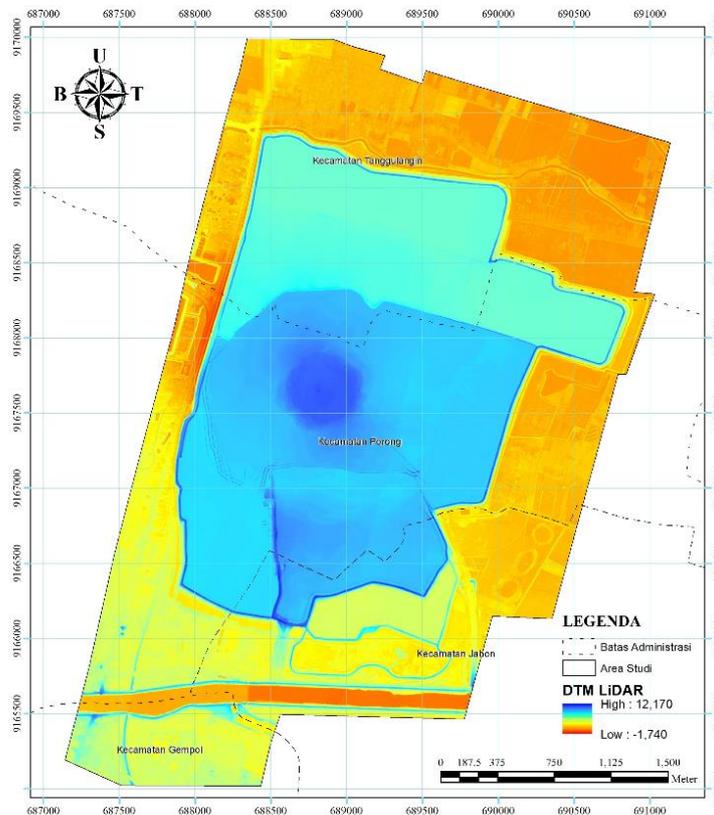
| Class | Description       | Count              | Min z    | Max Z  | Density      | Average Intensity | Median Intensity |
|-------|-------------------|--------------------|----------|--------|--------------|-------------------|------------------|
| 1     | Default           | 180.817            | -993,54  | 38,66  | 0,234        | 308,8             | 263              |
| 2     | Ground            | 41.733.236         | -1,74    | 12,17  | 3,903        | 286,0             | 198              |
| 3     | Low Vegetation    | 32.589.975         | -1,82    | 20,19  | 2,374        | 277,9             | 203              |
| 4     | Medium Vegetation | 10.450.212         | -1,30    | 22,16  | 2,060        | 266,7             | 252              |
| 5     | High Vegetation   | 13.794.174         | -0,34    | 54,88  | 3,746        | 211,3             | 180              |
| 6     | Building          | 5.714.901          | 0,61     | 26,43  | 3,610        | 320,8             | 284              |
| 7     | Low Point         | 17.601             | -598,46  | 931,43 | 0,626        | 283,7             | 78               |
| 8     | Model Key-point   | 31.980             | -265,28  | 237,09 | 0,161        | 27,6              | 4                |
| 8     | Model Key-point   | 31.980             | -265,28  | 237,09 | 0,161        | 27,6              | 4                |
| 9     | Water             | 0                  | -        | -      | -            | -                 | -                |
| 10    | Class 10          | 0                  | -        | -      | -            | -                 | -                |
| 11    | Overlap           | 28.066.989         | -1499,19 | 251,62 | 6,782        | 189,5             | 126              |
| 12    | Wire              | 0                  | -        | -      | -            | -                 | -                |
|       | <b>All Point</b>  | <b>132.547.905</b> | -        | -      | <b>8,679</b> | -                 | -                |



Gambar 5. Data *Point cloud* LiDAR, (a) *Point cloud* seluruh kelas (b) *Point cloud* kelas *Ground*

## 2. Digital Terrain Model

Pembuatan DTM ini berdasarkan metode *triangulated surface model* yang merupakan representasi geometri permukaan tiga dimensi yang terdiri dari segitiga-segitiga yang saling berbagi sisi. DTM yang didapatkan dari hasil klasifikasi kelas *Ground* dari *point cloud* LiDAR ini dilakukan pemotongan agar sesuai dengan area studi pada penelitian ini sehingga didapatkan DTM dengan luas total sebesar 19,863 km<sup>2</sup>. DTM ini memiliki elevasi terendah yaitu -1,740 mdpl yang berada di wilayah barat Lumpur Sidoarjo tepatnya di wilayah Kecamatan Porong dan elevasi tertinggi sebesar 12,170 mdpl yang terletak di pusat semburan Lumpur Sidoarjo.



Gambar 6. *Digital Terrain Model* Wilayah Lumpur Sidoarjo

### 3. Uji Akurasi

Hasil DTM LiDAR ini dilakukan uji akurasi menggunakan data pengukuran GPS Geodetis berdasarkan standar PERKA BIG No.6 tahun 2018 Perubahan Atas Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 Tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar serta ASPRS *Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data Edition*, Version 1 – November, 2014 dengan uji akurasi menggunakan perbandingan elevasi dari 20 titik yang berada pada wilayah tanggul lumpur Sidoarjo hasil dari pengukuran GPS. Jumlah titik uji yang digunakan ini sesuai dengan SNI 8202:2015 tentang Ketelitian peta dasar dimana jumlah titik uji untuk ketelitian vertikal untuk area non-vegetasi yang digunakan untuk luasan wilayah kurang dari 500 km<sup>2</sup> adalah 20 titik. Dikarenakan DTM ini memiliki luasan 19,863 km<sup>2</sup> maka titik uji akurasi yang digunakan sudah sesuai, yaitu 20 titik.

Untuk ketelitian vertikal berdasarkan standar BIG yang didapatkan dari hasil perhitungan pada Tabel didapatkan ketelitian vertikal dengan RMSE<sub>Z</sub> sebesar 0,195 meter dengan nilai ketelitian LE90 sebesar 0,322 meter. Dari hasil perhitungan ini maka DTM LiDAR ini memenuhi ketelitian vertikal kelas 1 untuk skala peta 1:2.500 yang disyaratkan BIG.

Akurasi vertikal untuk standar ASPRS diuji berdasarkan hasil RMSE<sub>Z</sub> pada area non vegetasi. Dari hasil perhitungan pada Tabel 4.6 didapatkan hasil akurasi absolut pada RMSE<sub>Z</sub> sebesar 19,516 cm, maka DTM LiDAR ini termasuk pada akurasi vertikal kelas 20 cm dengan 38,525 cm sebagai tingkat kepercayaan 95 persen menggunakan RMSE<sub>Z</sub> x 1,9600. Dari hasil densitas *point clouds* sebelumnya yang didapatkan sebesar 3,903 *samples/m*<sup>2</sup> juga termasuk ke dalam kelas akurasi vertikal 20 cm dimana *Nominal Pulse Density* (NPD) yang didapatkan adalah minimum sebesar 0,5 *samples/m*<sup>2</sup>.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Uji Akurasi

| No                               | Nama Point    | Easting    | Northing    | Z GPS (m) | Z LiDAR (m) | dZ2    |
|----------------------------------|---------------|------------|-------------|-----------|-------------|--------|
| 1                                | VK-19         | 688368,377 | 9165717,699 | 4,105     | 4,172       | 0,005  |
| 2                                | Gempol Sari   | 690074,241 | 9168799,454 | 1,665     | 1,687       | 0,000  |
| 3                                | Makam Reno    | 690300,234 | 9167327,675 | 1,919     | 1,700       | 0,048  |
| 4                                | Kali Tenga    | 689471,961 | 9169321,734 | 1,295     | 1,218       | 0,006  |
| 5                                | Demak         | 688426,309 | 9169400,364 | 2,993     | 2,691       | 0,091  |
| 6                                | Poloh Gunting | 691078,336 | 9168583,108 | 1,148     | 1,121       | 0,001  |
| 7                                | ITB Besuki    | 689807,248 | 9166309,217 | 3,637     | 3,316       | 0,103  |
| 8                                | P.73          | 688461,766 | 9169327,963 | 9,742     | 9,534       | 0,043  |
| 9                                | P.75          | 690019,480 | 9168997,513 | 9,357     | 9,339       | 0,000  |
| 10                               | P.22          | 687884,474 | 9167203,737 | 10,288    | 10,009      | 0,078  |
| 11                               | P.41          | 689513,815 | 9166280,741 | 10,8      | 10,825      | 0,001  |
| 12                               | P.84          | 690030,624 | 9167350,385 | 10,857    | 10,756      | 0,010  |
| 13                               | P.25          | 688466,435 | 9166983,292 | 9,569     | 9,325       | 0,060  |
| 14                               | P.42          | 689581,862 | 9166865,658 | 9,732     | 9,489       | 0,059  |
| 15                               | P.74          | 689410,068 | 9169077,628 | 9,562     | 9,315       | 0,061  |
| 16                               | P.83          | 690269,184 | 9167937,814 | 10,623    | 10,651      | 0,001  |
| 17                               | P.71          | 688318,415 | 9168628,227 | 9,95      | 9,651       | 0,090  |
| 18                               | P.67          | 689942,337 | 9168501,321 | 10,178    | 10,058      | 0,014  |
| 19                               | Tol Putul     | 688100,544 | 9168186,845 | -0,11     | -0,248      | 0,019  |
| 20                               | CP-2          | 689741,896 | 9166558,360 | 2,935     | 2,666       | 0,072  |
| Σdz2                             |               |            |             |           |             | 0,762  |
| RMSE vertikal (m)                |               |            |             |           |             | 0,195  |
| Keteletian Vertikal (LE90) (m)   |               |            |             |           |             | 0,322  |
| Non-Vegetated RMSE vertikal (cm) |               |            |             |           |             | 19,516 |
| NVA at 95% Confidence Level (cm) |               |            |             |           |             | 38,252 |

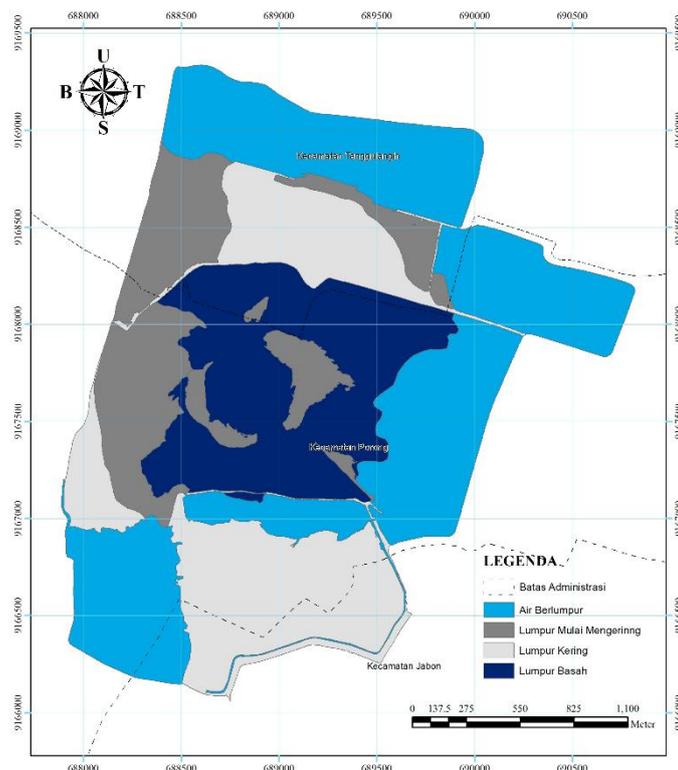
Perbedaan elevasi antara pengukuran menggunakan GPS dan LiDAR ini dapat dipengaruhi oleh pengukuran LiDAR yang tidak menggunakan *Ground Control Point* (GCP), sehingga koreksi koordinat x, y, dan z yang

ada pada LiDAR hanya mengacu pada koordinat yang didapatkan saat pengukuran berlangsung, yaitu berasal dari perhitungan antara GPS *Ground* yang memberikan titik kontrol yang diketahui di darat, GPS pada pesawat yang memberikan informasi posisi dan orientasi pesawat, dan IMU pada pesawat yang memberikan data mengenai pergerakan pesawat. Ketiga parameter ini digunakan bersama-sama untuk memastikan akurasi dan konsistensi pengukuran LiDAR, serta untuk menghubungkan data yang dihasilkan oleh LiDAR dengan sistem koordinat yang sudah ditetapkan.

#### 4. Interpretasi Jenis Lumpur

Interpretasi dilakukan secara visual, di mana objek-objek dalam *orthophoto* diidentifikasi berdasarkan ciri-ciri yang terlihat. Interpretasi adalah penilaian secara kualitatif yaitu sifat data yang dapat dilihat secara visual atau bersifat semantik, obyek apa yang ada di permukaan bumi yang diamati/dilihat, apakah obyek tersebut mengalami perubahan dan mengapa terjadi perubahan tersebut.

Tabel 5. Hasil Observasi Lapangan Jenis Lumpur



Gambar 7. Hasil Klasifikasi Tutupan Lumpur

Proses interpretasi pada penelitian ini mencakup pengenalan berbagai jenis lumpur yang terdapat dalam *orthophoto*, dengan menghubungkannya dengan dokumentasi observasi lapangan (*ground truth*). Hasil dari observasi lapangan dan interpretasi *orthophoto* menunjukkan adanya empat jenis tutupan lumpur yang berada

di dalam tanggul penahan, yakni Air Berlumpur, Lumpur Basah, Lumpur Kering, dan Lumpur Mulai Meringing. Hasil interpretasi visual dimana terdapat 4 jenis tutupan lumpur yang berada di dalam tanggul penahan, yaitu Air Berlumpur, Lumpur Basah, Lumpur Kering, dan Lumpur Mulai Meringing ini selanjutnya dijadikan acuan untuk digitisasi manual klasifikasi jenis lumpur yang telah ditafsirkan sebelumnya sehingga menghasilkan tutupan lumpur sesuai jenis lumpur.

## 5. Perhitungan Volume Lumpur

Perhitungan volume permukaan lumpur dilakukan menggunakan *software* Terrasolid dimana hasil klasifikasi jenis permukaan lumpur yang telah didapatkan digunakan sebagai batas area perhitungan volume. Pada perhitungan volume ini menggunakan metode prismoidal dimana digunakan dua permukaan sebagai acuan perhitungan volume, metode ini dipilih karena metode ini mempertimbangkan kemiringan atau perubahan lereng pada permukaan yang sedang dihitung volumenya sehingga dapat mengatasi perubahan kemiringan pada permukaan yang sedang diukur dalam hal ini pada permukaan lumpur yang kompleks. DTM LiDAR yang telah didapatkan digunakan sebagai *upper surface* dan permukaan dengan elevasi 3 mdpl digunakan sebagai *lower surface*. Setelah dilakukan perhitungan volume sesuai dengan jenis tutupan lumpur, maka akan didapatkan jumlah volume lumpur pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Volume Tutupan Lumpur Sidoarjo

| Jenis Lumpur           | Luas (m <sup>2</sup> ) | Volume (m <sup>3</sup> ) | Persentase |
|------------------------|------------------------|--------------------------|------------|
| Air Berlumpur          | 2.224.002,89           | 9.987.931,57             | 33,705%    |
| Lumpur Mulai Meringing | 943.902,49             | 4.719.359,92             | 23,599%    |
| Lumpur Kering          | 1.338.610,01           | 6.993.143,74             | 26,770%    |
| Lumpur Basah           | 1.305.188,09           | 7.932.869,94             | 15,926%    |
| Total                  | 5.811.703,48           | 29.633.305,17            | 100%       |

Dari hasil perhitungan volume yang telah dilakukan, didapatkan total volume lumpur Sidoarjo pada 18 September 2022 adalah sebesar 29.633.305,17 m<sup>3</sup>. Volume terbesar terdapat pada klasifikasi Air Berlumpur sebesar 9.987.931,57 m<sup>3</sup> atau 33,705% dari total volume lumpur, dilanjutkan oleh jenis Lumpur Basah yang memiliki volume sebesar 7.932.869,94 m<sup>3</sup> atau 23,599% dari total volume lumpur, lalu Lumpur Kering dengan volume sebesar 6.993.143,74 m<sup>3</sup> atau 26,770% dari total volume lumpur, dan volume paling sedikit dimiliki oleh Lumpur Mulai Meringing sebesar 4.719.359,92 m<sup>3</sup> atau 15,926% dari total volume lumpur. Klasifikasi Air Berlumpur yang memiliki nilai luasan dan volume paling besar ini sebagian besar berada pada bagian utara hingga timur dari tanggul pembatas lumpur yang berada di Kecamatan Tanggulangin.

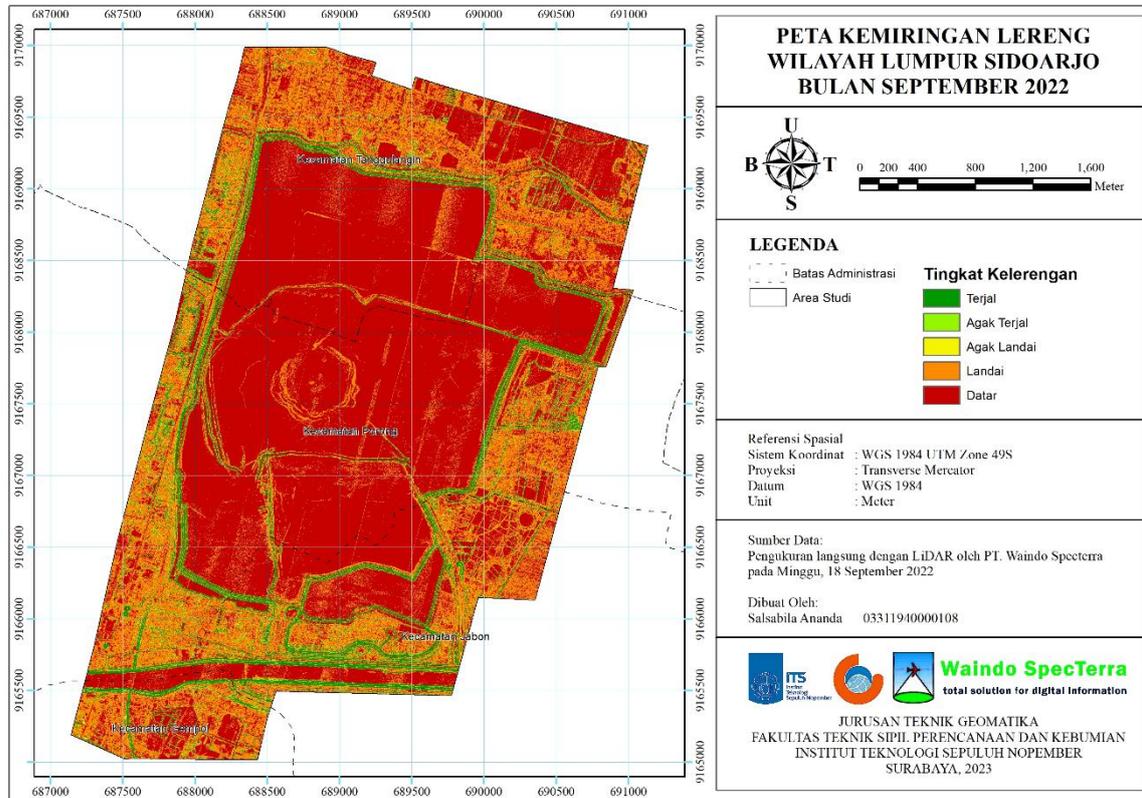
## 6. Pembuatan Peta Kemiringan Lereng

Informasi kemiringan lereng didapatkan dari DTM LiDAR wilayah lumpur Sidoarjo yang dilakukan pengolahan menggunakan fungsi *Slope*. Dari hasil pengolahan tersebut akan menampilkan raster dengan nilai kelerengan tertentu. Nilai kelerengan ini selanjutnya dilakukan klasifikasi agar sesuai dengan kriteria dengan menggunakan fungsi *Reclassify* pada *3D Analyst Tools* sehingga sesuai dengan nilai *scoring* yang telah ditentukan.

Berdasarkan Tabel 7 didapatkan bahwa hampir seluruh wilayah di sekitar luapan lumpur Sidoarjo didominasi oleh kelerengan 0% - 2% dengan kelas Datar seluas 7672.441 m<sup>2</sup> yang memenuhi 59,291% dari seluruh area studi. Untuk kelerengan 2% - 7% dengan kelas Landai memiliki luasan 3.840.152 m<sup>2</sup> yang memenuhi 29,676% dari area studi pada penelitian ini. Selain itu, kelerengan 7% - 13% dengan kelas Agak Landai memiliki luasan 314.824 m<sup>2</sup> atau 2,433% dari area studi pada penelitian ini. Pada kelerengan 13% - 20% dengan kelas Agak Terjal memiliki luasan 165.311 m<sup>2</sup> atau 1,277 % dari area studi pada penelitian ini. Dan untuk kelerengan >20% dengan kelas Terjal memiliki luasan 947.685 m<sup>2</sup> atau 7,323 % dari area studi pada penelitian ini.

Pada penelitian ini, kelas datar memiliki nilai skor yang paling tinggi lalu dilanjutkan oleh kelas landai yang juga memiliki skor yang cukup tinggi. Hal ini dikarenakan pada daerah datar dan landai aliran lumpur dapat

mengendap dan menggenang di daerah tersebut. Endapan lumpur ini dapat merusak lingkungan yang dilaluinya. Sedangkan pada kelas agak landai, agak terjal, dan terjal potensi lumpur mengendap tidak sebesar kelas datar dan landai. Meskipun begitu, pada rentang kelas ini juga memiliki bahaya jika aliran lumpur sangat cepat dengan volume yang besar sehingga berpotensi merusak lingkungan dan pemukiman manusia yang dilaluinya.



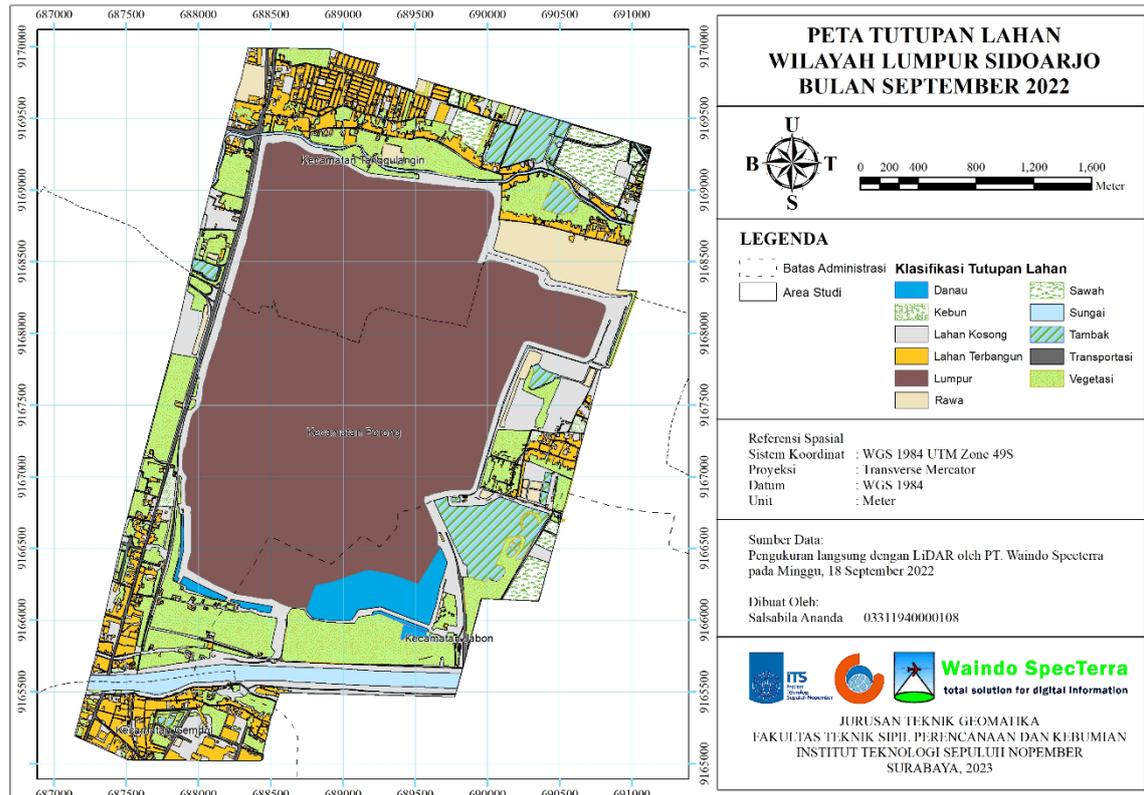
Gambar 8. Hasil Peta Kemiringan Lereng

Tabel 7. Hasil *scoring* Peta Kemiringan Lereng

| Kelerengan | Keterangan  | Skor | Luas (m <sup>2</sup> ) | Persentase Luasan |
|------------|-------------|------|------------------------|-------------------|
| 0% - 2%    | Datar       | 5    | 7.672.441              | 59,291%           |
| 2% - 7%    | Landai      | 4    | 3.840.152              | 29,676%           |
| 7% - 13%   | Agak Landai | 3    | 314.824                | 2,433%            |
| 13% - 20%  | Agak Terjal | 2    | 165.311                | 1,277%            |
| >20%       | Terjal      | 1    | 947.685                | 7,323%            |

## 7. Pembuatan Peta Tutupan Lahan

Informasi tutupan lahan didapatkan dari klasifikasi menggunakan digitisasi manual dari data *orthophoto* wilayah Lumpur Sidoarjo dan dibagi menjadi 12 kelas yaitu, Lahan Terbangun, Jalan, Jalur Kereta, Sungai, Danau, Lumpur, Pertanian, Sawah, Tambak, Kebun, Rawa, dan Lahan Kosong. Klasifikasi ini berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Surjoatmodjo pada 2019. Tutupan lahan yang telah dilakukan pemberian nilai skor selanjutnya dilakukan pengolahan menggunakan fungsi *From Polygon to Raster* agar digitisasi yang sebelumnya merupakan data vektor diubah menjadi data raster dengan ketelitian 0.1 m. Hasil raster ini selanjutnya dilakukan klasifikasi dengan menggunakan fungsi *Reclassify* pada *3D Analyst Tools* sehingga sesuai dengan nilai *scoring* yang telah ditentukan.



Gambar 9. Hasil Peta Tutupan Lahan

Tabel 8. Hasil *scoring* Peta Tutupan Lahan

| Parameter   | Luas (m <sup>2</sup> ) | Persentase |
|---|------------------------|------------|
| Lahan Terbangun, Jalan, Jalur Kereta, Sungai, Danau, Lumpur | 7.648.611              | 58,977%    |
| Pertanian, Sawah, Tambak, Kebun, Rawa, Lahan Kosong         | 5.320.286              | 41,023%    |

Pada hasil perhitungan luasan tiap skor pada tutupan lahan, dapat disimpulkan bahwa skor tertinggi yang dimiliki oleh kelas Lahan Terbangun, Jalan, Jalur Kereta, Sungai, Danau, dan Lumpur memiliki luasan paling banyak yaitu sebesar 7.648.611 m<sup>2</sup> sedangkan untuk luasan paling kecil dimiliki oleh kelas Pertanian, Sawah, Tambak, Kebun, Rawa, dan Lahan Kosong sebesar 5.320.286 m<sup>2</sup>.

Informasi tutupan lahan ini memberikan pemahaman tentang sejauh mana jenis tutupan lahan dapat berkontribusi terhadap risiko dan kerawanan terhadap banjir lumpur Sidoarjo. Pada tutupan lahan dengan skor tertinggi yaitu skor 5 memiliki persentase 58,977% dari keseluruhan wilayah penelitian. Dengan persentase yang besar, kelas ini memiliki potensi risiko dan kerawanan yang tinggi, karena untuk lahan terbangun, jalan, dan jalur kereta cenderung memiliki permukaan yang tidak dapat menyerap air dengan baik, sehingga air lumpur dapat menggenangi daerah ini dengan cepat. Sedangkan untuk tutupan lahan dengan skor 4 memiliki persentase 41,023% dari keseluruhan tutupan lahan. Kelas ini memiliki potensi yang cukup besar juga, karena pada permukaan kelas pertanian, sawah, dan kebun cenderung rendah dan rentan terhadap genangan air lumpur. Untuk kelas tambak, luapan lumpur dapat menyebabkan kerusakan pada sistem tambak dan mengancam keberlanjutan budidaya perikanan. Sementara untuk kelas lahan kosong cenderung memiliki permukaan yang tidak stabil dan rentan terhadap erosi dan genangan air lumpur.

### 8. Pembuatan Peta Kerawanan

Peta kerawanan didapatkan dengan melakukan perhitungan *scoring* dengan atribut yang telah di *overlay* untuk semua parameter mulai dari skor kelerengan dan tutupan lahan. Perhitungan dilakukan tanpa ada pembobotan karena belum adanya acuan yang pasti mengenai pembobotan untuk bencana Lumpur Sidoarjo sehingga tiap

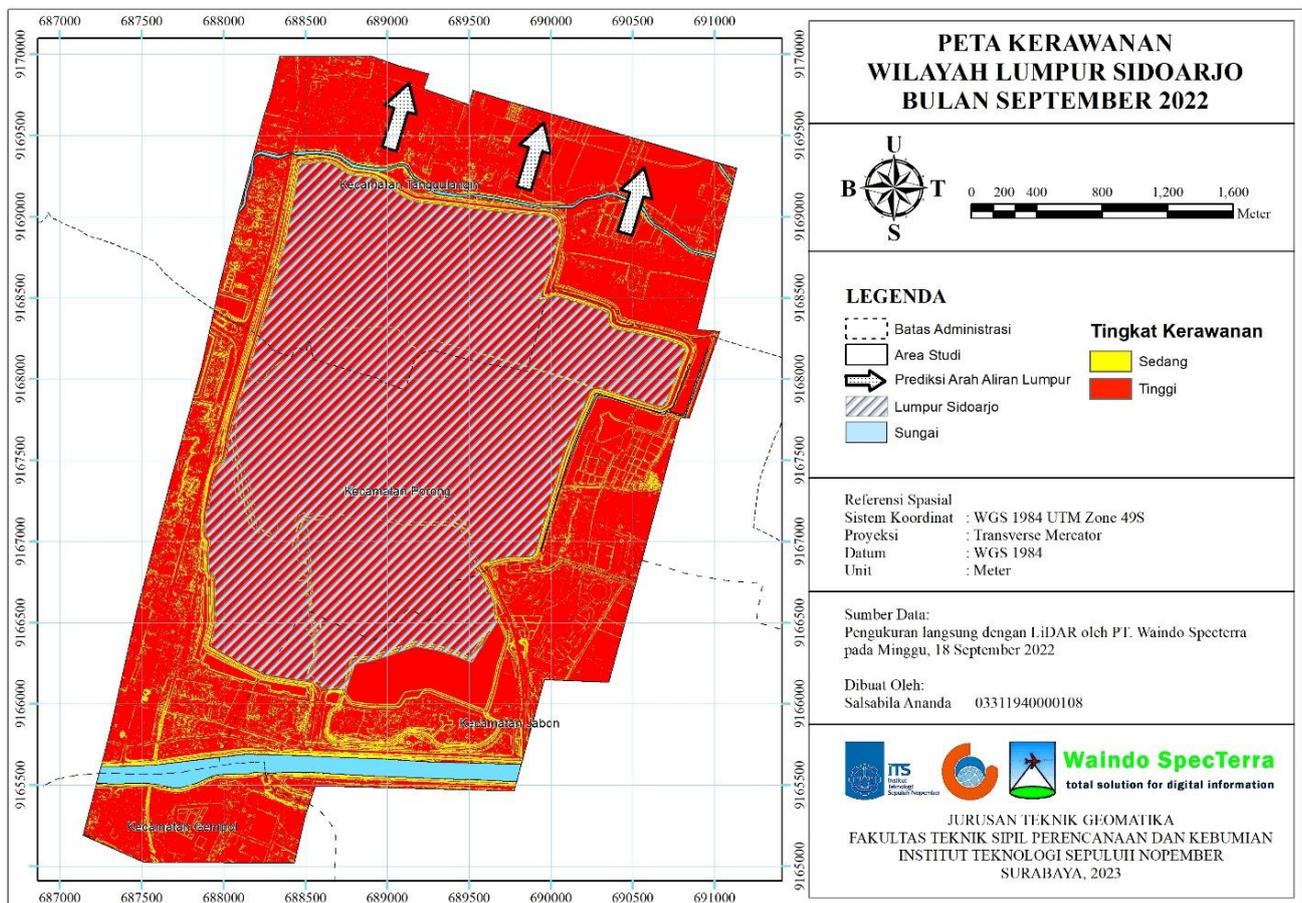
parameter dianggap sama atau untuk Peta Kemiringan Lereng berbobot 50% dan Peta Tutupan Lahan berbobot 50%. Dari perhitungan ini akan didapatkan Kerawanan dengan tiga kelas, yaitu Rendah, Sedang, dan Tinggi. Pemilihan kelas ini didasarkan oleh Pembuatan Peta Kerawanan yang dikeluarkan oleh BNPB. Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan didapatkan rentang skor keseluruhan parameter yang telah dihitung sebesar 2,50 – 5,00 sehingga untuk kelas interval kerawanan dikelaskan dengan perhitungan interval yang sama.

$$\text{Kelas Interval Kerawanan} = \frac{5,00 - 2,50}{2} = 1,25$$

Sehingga klasifikasi kelas kerawanan dan skornya dengan nilai interval kerawanan 0.833 adalah sebagai berikut:

Tabel 9. Hasil Peta Kerawanan

| Rentang Skor | Tingkat Kerawanan | Skor | Luas (m <sup>2</sup> ) | Persentase Luasan |
|--------------|-------------------|------|------------------------|-------------------|
| 2,50 – 3,75  | Sedang            | 2    | 1.371.472              | 10,599%           |
| 3,75 – 5,00  | Tinggi            | 3    | 11.568.748             | 89,401%           |



Gambar 10. Hasil Peta Kerawanan wilayah lumpur Sidoarjo

Dari hasil *scoring* dan *overlay* yang telah dilakukan, didapatkan luas wilayah dan persentase daerah berdasarkan tingkat kerawanan. Untuk tingkat kerawanan sedang memiliki luas 1.371.472 m<sup>2</sup> atau 10,599% dari total luas wilayah penelitian sedangkan tingkat kerawanan tinggi memiliki luas 11.568.748 m<sup>2</sup> atau 89,401% dari total luas wilayah penelitian.

Berdasarkan hasil kerawanan banjir lumpur Sidoarjo, terdapat 89,401% dari luas wilayah total dalam penelitian ini masuk ke dalam tingkat kerawanan tinggi. Hasil ini menunjukkan terdapat potensi genangan air

lumpur yang parah di wilayah ini jika terjadi bencana tanggul jebol maupun luapan lumpur melebihi batas tanggul penahan lumpur, dengan kemungkinan risiko tinggi terhadap keselamatan penduduk dan kerusakan infrastruktur yang signifikan. Untuk wilayah yang termasuk ke dalam kerawanan tinggi ini, perlu adanya perhatian lebih agar wilayah ini selalu siap untuk mencegah dan menanggulangi kemungkinan adanya banjir lumpur Sidoarjo.

Dari tingkat kerawanan dan elevasi wilayah lumpur Sidoarjo pada Gambar 4.21, dapat dianalisis prediksi arah aliran banjir lumpur. Umumnya aliran banjir akan meluap dari tempat tinggi ke tempat rendah, Dari informasi Peta Kerawanan dan *Digital Terrain Model* wilayah lumpur Sidoarjo, dapat diprediksi bahwa aliran lumpur akan meluap ke arah timur laut dari tanggul penahan lumpur yaitu mengarah ke Kecamatan Tanggulangin.

## Kesimpulan

Pembuatan *Digital Terrain Model* (DTM) wilayah lumpur Sidoarjo menggunakan data LiDAR menghasilkan data elevasi yang berasal dari 41.733.236,00 *point kelas ground*. DTM ini memiliki elevasi terendah yaitu -1,740 mdpl yang berada di wilayah barat Lumpur Sidoarjo tepatnya di wilayah Kecamatan Porong dan elevasi tertinggi sebesar 12,170 mdpl yang terletak di pusat semburan Lumpur Sidoarjo. Dari hasil DTM didapatkan permukaan tanah wilayah Lumpur Sidoarjo dan sekitarnya menurun dari wilayah Kecamatan Gempol dan Kecamatan Jabon ke arah timur laut dari tanggul penahan tepatnya ke wilayah Kecamatan Tanggulangin dan sebagian Kecamatan Porong. Hal ini dapat mengakibatkan wilayah Kecamatan Tanggulangin memiliki risiko yang lebih besar terkena dampak banjir lumpur Sidoarjo.

Volume total lumpur Sidoarjo pada 18 September 2022 yang didapatkan adalah 29.633.305,17 m<sup>3</sup>. Volume terbesar terdapat pada klasifikasi Air Berlumpur 9.987.931,57 m<sup>3</sup> atau 33,705% dari total volume lumpur, dilanjutkan oleh jenis Lumpur Basah yang memiliki volume 7.932.869,94 m<sup>3</sup> atau 23,599% dari total volume lumpur, lalu Lumpur Kering dengan volume 6.993.143,74 m<sup>3</sup> atau 26,770% dari total volume lumpur, dan volume paling sedikit dimiliki oleh Lumpur Mulai Meringing 4.719.359,92 m<sup>3</sup> atau 15,926% dari total volume lumpur. Klasifikasi Air Berlumpur yang memiliki nilai luasan dan volume paling besar ini sebagian besar berada pada bagian utara hingga timur dari tanggul pembatas lumpur yang berada di Kecamatan Tanggulangin.

Hasil analisis kerawanan banjir lumpur Sidoarjo didapatkan tingkat kerawanan sedang memiliki luas 1.371.472 m<sup>2</sup> atau 10,599% dari total luas wilayah penelitian, dan tingkat kerawanan tinggi memiliki luas 11.568.748 m<sup>2</sup> atau 89,401% dari total luas wilayah penelitian. Dari informasi tingkat kerawanan dan elevasi yang didapatkan dapat diprediksi bahwa aliran lumpur akan meluap ke arah timur laut dari tanggul penahan lumpur tepatnya mengarah ke Kecamatan Tanggulangin. Hasil Peta Kerawanan ini menunjukkan terdapat potensi genangan air lumpur yang parah di area studi penelitian ini jika terjadi bencana tanggul jebol maupun luapan lumpur melebihi batas tanggul penahan lumpur. Untuk wilayah yang termasuk ke dalam kerawanan ini, perlu adanya perhatian lebih agar wilayah ini selalu siap untuk mencegah dan menanggulangi kemungkinan adanya banjir lumpur Sidoarjo.

## Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada kepada Laboratorium Geoinformatika Departemen Teknik Geomatika ITS yang telah membantu dalam memberikan fasilitas penunjang untuk pemrosesan dan pengolahan data pada penelitian ini. Juga kepada PT. Waindo SpecTerra Indonesia dan Pusat Pengendalian Lumpur Sidoarjo (PPLS) – PUPR yang telah memberikan dukungan dalam pemberian data yang digunakan pada penelitian ini. Serta kepada seluruh pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.

## Daftar Pustaka

- Akbari, A. M., & Hariyanto, T. (2012). *Perhitungan volume semburan dan sebaran lumpur Sidoarjo dengan citra ikonos multi temporal 2011*. Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Teknik Geomatika, Surabaya.
- Arbeck. (2015). *The difference between digital surface model (DSM) and digital terrain models (DTM) when talking about digital elevation models (DEM)*. Dipetik Januari 16, 2023, dari Wikimedia Commons: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The\\_difference\\_between\\_Digital\\_Surface\\_Model\\_\(DSM\)\\_and\\_Digital\\_Terrain\\_Models\\_\(DTM\)\\_when\\_talking\\_about\\_Digital\\_Elevation\\_models\\_\(DEM\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_difference_between_Digital_Surface_Model_(DSM)_and_Digital_Terrain_Models_(DTM)_when_talking_about_Digital_Elevation_models_(DEM).svg)
- Aruga, K., Sessions, J., & Akay, A. E. (2004). Application of an airborne laser scanner to forest road design with accurate earthwork volumes. *Journal of Forest Research*, 10(2), 113-123. doi: 10.1007/s10310-004-0116-9
- ASPRS. (2008). *LAS Specification Version 1.2*.
- Brabb, E. E. (1984). Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. *Fourth International Symposium on Landslides*, 1, hal. 307-324. Toronto.
- Carter, W., Shrestha, R., Tuell, G., Bloomquist, D., & Sartori, M. (2001). Airborne laser swath mapping shines new light on earth's topography. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82, 549-555. doi:<https://doi.org/10.1029/01EO00321>
- Firdaus, Z. M. (2020). *Pemodelan kota tiga dimensi menggunakan data LiDAR dan foto udara dengan metode semi otomatis (Studi kasus: Area Pakuwon Trade Center, Kota Surabaya)*. Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Teknik Geomatika, Surabaya. Diambil kembali dari <http://repository.its.ac.id/id/eprint/77870>
- Geospasial. (2023, November 2023). *Indonesia Geospasial*. Diambil kembali dari <https://www.indonesia-geospasial.com/>
- Ghilani, C. D., & Wolf, P. R. (2012). *Elementary surveying: An introduction to geomatics* (13th Edition ed.). Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Guth, P. L. (2018). *What should a bare earth digital terrain model (DTM) portray?* United States Naval Academy, Department of Oceanograph. Annapolis: PeerJ Preprints. doi:10.7287/peerj.preprints.27053v1
- Hirt, C. (2015). Digital terrain models. Dalam M. G. Sideris (Penyunt.), *Encyclopedia of Geodesy*. Springer Cham. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0\\_31-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0_31-1)
- Khalil, R. (2018). *Surveying: Volume calculation*. King Abdul Aziz University, Department of Landscape Architecture, Jeddah.
- Kilian, J., Haala, N., & Englich, M. (1996). Capture and evaluation of airborne laser data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31(3), 383-338.
- Kobler, A., Pfeifer, N., Ogrinc, P., Todorovski, L., Oštir, K., & Džeroski, S. (2007). Repetitive interpolation: A robust algorithm for DTM generation from Aerial Laser Scanner Data in forested terrain. *Remote Sensing of Environment*, 108(1), 9-23. doi:10.1016/j.rse.2006.10.013
- Liu, X. (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 32(1), 31-49. doi:<https://doi.org/10.1177/0309133308089496>
- Petrie, G., & Toth, C. K. (2008). Introduction to laser ranging, profiling, and scanning. Dalam J. Shan, & C. K. Toth, *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing, Second Edition*. Boca Raton: CRC Press. doi:10.1201/9781420051438.ch1
- Pfeifer, N., Höfle, B., Briese, C., Rutzinger, M., & Haring, A. (2008). Analysis of the backscattered energy in terrestrial laser scanning data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(B5), 1045-1052.
- Pusat Pengendalian Lumpur Sidoarjo (PPLS). (2020). *Pengendalian lumpur Sidoarjo*. Surabaya: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Direktorat Jenderal Sumber Daya Air.
- Puspita, B. D., & Sudaryatno. (2013). *Estimasi sedimen lahar dingin di sebagian Kali Gendol Gunung Merapi menggunakan FUFK dan LiDAR*. Universitas Gadjah Mada, Fakultas Geografi, Sleman.
- Schenk, T. (2005). *Introduction to photogrammetry*. The Ohio State University, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, Columbus.
- Setyaningrum, P. (2022, Januari 26). *Lumpur Lapindo: Penyebab, dampak, ganti rugi, hingga temuan "harta karun" logam tanah jarang*. Kompas.com. Dipetik Desember 27, 2022, dari Kompas.com: <https://surabaya.kompas.com/read/2022/01/26/205822478/lumpur-lapindo-penyebab-dampak-ganti-rugi-hingga-temuan-harta-karun-logam?>
- Sukojo, B. M. (2012). *Penginderaan jauh (dasar teori dan terapan)*. Surabaya.
- Surjoatmodjo, M. I. (2019). *Analisis potensi pergerakan arah aliran banjir lumpur untuk menunjang kegiatan mitigasi bencana (Studi kasus: Lumpur Sidoarjo Kecamatan Porong dan Tanggulangin)*. Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Teknik Geomatika, Surabaya.

- Taufik, M., Khomsin, K., Pratomo, D. G., & Widyasari, M. (2009). Digital elevation model (DEM) aster untuk menghitung volume lumpur Lapindo. *Geoid*, 4 (2), 166-170. doi:<http://dx.doi.org/10.12962/j24423998.v4i2.7316>
- Wahyono, E. B., & Suhattanto, M. A. (2019). *Survey Satelit Pertanahan*. Yogyakarta: Sekolah Tinggi Pertanahan Nasional.
- Widodo, B. T., & Hariyanto, T. (2016). *Visualisasi perubahan volume dan elevasi permukaan lumpur dengan citra satelit resolusi tinggi temporal untuk monitoring lumpur Sidoarjo*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Teknik Geomatika, Surabaya. doi:[10.12962/j23373539.v5i2.17385](https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.17385)
- Yuwono. (2005). *Pendidikan dan pelatihan (diklat) teknis pengukuran dan pemetaan kota: BAB XV. Volume*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Teknik Geomatika, Surabaya.
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., & Yan, G. (2016). An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. (P. D. Shan, & P. D. Hyypä, Penyunt.) *Remote Sensing*, 8(6), 501. doi:[10.3390/rs8060501](https://doi.org/10.3390/rs8060501)



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