
ANALISISPEMODELAN TIGA DIMENSI ELEVASI PERMUKAAN DAN PERUBAHAN VOLUME LUMPUR
MENGGUNAKAN CITRA SATELIT *WORLDVIEW-2* UNTUK MONITORING BENCANA
LUMPUR SIDOARJO

Bagas Tri Widodo, Teguh Hariyanto

Jurusan Teknik Geomatika FTSP-ITS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111

Email : bagasf.14@gmail.com, teguh_hr@geodesy.its.ac.id

Abstrak

Sejak awal terjadinya bencana lumpur Sidoarjo pada 29 Mei 2006 silam, telah terjadi lebih dari 10 kali jebolan tanggul penahan lumpur. Yang terakhir terjadi pada akhir tahun 2014 lalu, mengakibatkan rumah warga yang berada di Desa Gempolsari, Kecamatan Tanggulangin, terendam lumpur. Untuk mencegah hal yang sama terulang kembali, maka perlu dilakukan monitoring untuk mengetahui pola persebaran lumpur dan elevasinya yang berada di dalam tanggul penahan. Dengan menggunakan citra satelit resolusi tinggi *WorldView-2* bulan Agustus 2014 dan Juli 2015, maka tutupan lumpur dapat diklasifikasikan menjadi 4 kelas berbeda, yaitu Air Berlumpur, Lumpur Basah, Lumpur Mulai Mengering, dan Lumpur Kering.

Menurut hasil pengolahan data observasi lapangan menggunakan GPS geodetik metode kinematik, diketahui bahwa volume total lumpur di dalam tanggul utama pada bulan Maret 2014 adalah 44.039.123,365 m³, dan bulan Juli 2015 sebesar 47.646.879,058 m³. Berdasarkan hasil pemodelan 3 dimensi permukaan lumpur, aliran lumpur pada bulan Maret 2014 cenderung mengarah ke utara. Sedangkan pada bulan Juli 2015 aliran lumpur lebih terkonsentrasi di dekat pusat semburan, membuat tanah bagian bawah mengalami sledding dan penurunan. Dengan demikian, permukaan lumpur menjadi terlihat seperti kaldera atau fitur kawah gunung lumpur. Dan sampai dengan bulan Juli 2015, tutupan lumpur didominasi oleh klasifikasi Lumpur Kering.

Kata Kunci : Lumpur Sidoarjo, Elevasi Lumpur, Volume Lumpur, Model 3 Dimensi

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Bencana semburan lumpur Lapindo adalah peristiwa menyemburnya lumpur panas di lokasi pengeboran Lapindo Brantas Inc di Dusun Balongnonggo Desa Renokenongo, Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. Peristiwa yang terjadi sejak 29 Mei 2006 ini menjadi suatu tragedi ketika semburan lumpur panas mulai menggenangi areal persawahan, pemukiman penduduk, dan kawasan industri dan merusak berbagai sarana dan prasarana komunikasi, transportasi, pendidikan, listrik, kesehatan, dan lain-lain.

Sejak awal terjadinya bencana lumpur Sidoarjo, telah terjadi lebih dari 10 kali jebolan tanggul penahan lumpur. Yang terakhir terjadi pada tanggal akhir tahun 2014 lalu, mengakibatkan rumah warga yang berada di Desa Gempolsari, Kecamatan Tanggulangin, terendam lumpur. Sebelumnya, pada tanggal 27 April 2011 telah terjadi jebolan tanggul di sisi utara, tepatnya di

Desa Kedungbendo, Kecamatan Tanggulangin. Tanggul di Desa Kedungbendo jebol sepanjang 200 meter, mengakibatkan kawasan pemukiman yang padat penduduk tersebut sepenuhnya tenggelam.

Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo (BPLS) adalah sebuah lembaga yang dibentuk dalam upaya menanggulangi semburan dan luapan lumpur, masalah sosial dan infrastruktur di sekitar kawasan area terdampak, dengan memperhatikan risiko lingkungan yang terkecil. Terkait dengan fungsi dari Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo dalam menangani semburan lumpur, kemajuan teknologi Penginderaan Jauh dapat dimanfaatkan dalam proses monitoring dan evaluasi bencana yang terkait dengan semburan lumpur.

Penginderaan jauh dapat dimanfaatkan untuk memperkirakan volume semburan lumpur dengan citra satelit. Terlebih, teknologi penginderaan jauh juga dapat dipadukan dengan data observasi langsung di atas permukaan lumpur. Hal ini dilakukan sebagai upaya untuk mengetahui

kecenderungan persebaran arah aliran lumpur. Nantinya, visualisasi model tiga dimensi permukaan lumpur dari tahun ke tahun juga dilakukan untuk menggambarkan perubahan elevasi yang telah terjadi. Visualisasi tersebut dapat bermanfaat bagi pihak BAPEL BPLS, selaku badan yang menangani masalah lumpur Sidoarjo untuk melihat perubahan elevasi permukaan lumpur dari berbagai arah pandang secara dinamis.

Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat membantu pihak BAPEL BPLS (Badan Pelaksana Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo) dalam hal monitoring elevasi permukaan lumpur beserta kecenderungan arah aliran lumpur yang berada di dalam tanggul penahan. Selain itu, pemodelan 3 dimensi permukaan lumpur diharapkan dapat menjadi data pendukung bagi pihak-pihak berwenang untuk melakukan penanganan bencana lumpur yang telah terjadi sejak lebih dari 10 tahun silam.

Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana perubahan volume elevasi semburan lumpur secara temporal, yaitu tahun 2014 dan 2015. Selain itu, perlu dilakukan analisis kecenderungan persebaran arah aliran lumpur yang berada di dalam kawasan area terdampak.

Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Data citra yang digunakan adalah data citra *Worldview-2* pada tahun 2014-2015;
2. Daerah studi meliputi wilayah yang berada di dalam kawasan area terdampak lumpur Sidoarjo;
3. Analisa perhitungan volume semburan dan visualisasi elevasi permukaan lumpur Sidoarjo; dan
4. Analisa kecenderungan persebaran arah aliran lumpur Sidoarjo di dalam tanggul penahan.

Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

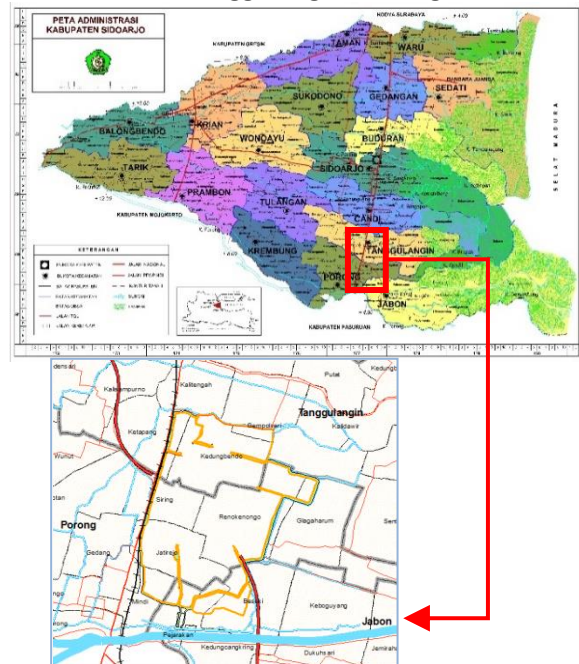
1. Melakukan klasifikasi tutupan lumpur dari data citra *Worldview-2*, dan melakukan perhitungan volume tutupan lumpur yang ada;

2. Melakukan visualisasi perubahan elevasi permukaan lumpur di dalam tanggul penahan; dan
3. Analisa kecenderungan persebaran arah aliran lumpur yang ada di dalam tanggul penahan.

METODOLOGI PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dari tugas akhir ini adalah kawasan yang berada di dalam area terdampak lumpur panas, di Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. Kawasan area terdampak lumpur Sidoarjo ini secara geografis terletak di antara 7°30'40"-7°32'31" LS dan 112°42'28" - 112°43'6" BT. 3 kecamatan terdampak lumpur Sidoarjo ini, antara lain Kecamatan Tanggulangin, Porong, dan Jabon.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Data Dan Peralatan

- Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Citra satelit *Worldview-2* akuisisi bulan Agustus 2014;
2. Citra satelit *Worldview-2* akuisisi bulan Juli 2015;
3. Data koordinat X, Y, dan Z di permukaan lumpur, hasil observasi lapangan menggunakan *GPS* Geodetik (Kinematik).

- Peralatan

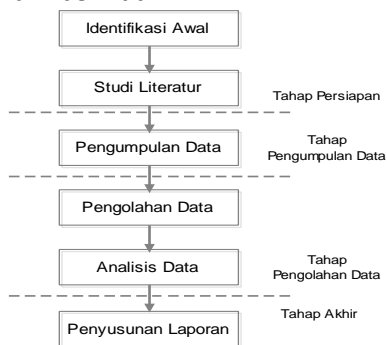
ANALISISPEMODELAN TIGA DIMENSI ELEVASI PERMUKAAN DAN PERUBAHAN VOLUME LUMPUR MENGGUNAKAN CITRA SATELIT *WORLDVIEW-2* UNTUK MONITORING BENCANA LUMPUR SIDOARJO

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Perangkat Keras (*Hardware*)
 - a. *Notebook* untuk pengolahan data citra satelit, perhitungan volume lumpur, visualisasi tiga dimensi elevasi permukaan lumpur, analisa data hasil pengolahan, dan penulisan laporan;
 - b. *GPS* Geodetik dengan merk *Sokkia* tipe *GRX1* untuk melakukan observasi *GPS* metode kinematik guna memperoleh koordinat di permukaan lumpur dan taggul penahan; dan
 - c. *Handphone* untuk dokumentasi observasi lapangan.
2. Perangkat Lunak (*Software*)
 - a. Sistem operasi *Windows 10 Enterprise 64-bit*;
 - b. *ArcGIS 10.3* untuk klasifikasiutupan permukaan lumpur, pembuatan visualisasi tiga dimensi permukaan lumpur, dan layouting peta;
 - c. Perangkat lunak pengolah citra untuk proses mosaicking data citra satelit resolusi tinggi; dan *Microsoft Office 2016* untuk penulisan laporan dan pengolahan data angka tabular perhitungan volumeutupan permukaan lumpur;

Diagram Alir

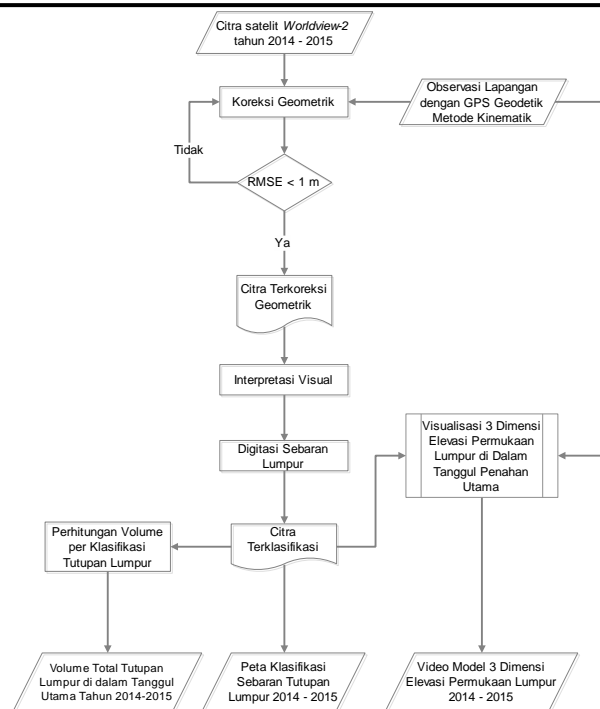
Tahapan yang akan dilaksanakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah seperti pada diagram alir berikut ini:



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Pengolahan Data

Adapun alur dari tahap pengolahan data pada penelitian tugas akhir ini sebagai berikut:



Gambar 3. Diagram Alir Tahap Pengolahan Data

Berikut adalah penjelasan diagram alir tahap pengolahan data:

- a. Pertama, adalah melakukan koreksi geometrik pada citra satelit resolusi tinggi tahun 2014 hingga 2015 untuk mereduksi kesalahan geometrik, dan akan dihasilkan citra terkoreksi geometrik. Koreksi geometrik ini melibatkan data observasi lapangan menggunakan *GPS* Geodetik sebagai acuan. Secara umum, formula untuk menghitung besarnya nilai *RMS Error* dalam bidang dua dimensional adalah sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{(x' - x_{orig})^2 + (y' - y_{orig})^2}{n}}$$

dimana:

(x', y') = Koordinat citra hasil koreksi geometrik

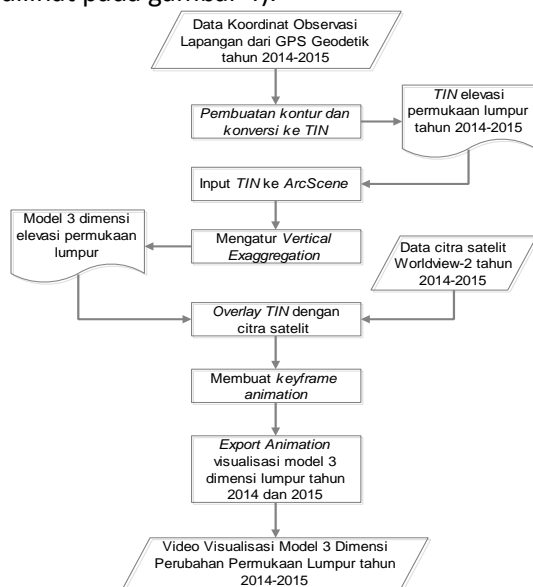
$(x, y)_{orig}$ = Koordinat titik kontrol tanah pada bidang referensi

N = Jumlah GCP

Koreksi geometrik dianggap benar apabila *Root Mean Square (RMS) Error* ≤ 1 piksel.

- b. *Ground Truth* (cek lapangan) untuk mengumpulkan data sekaligus melakukan dokumentasi di lapangan sebagai kontrol terhadap interpretasi visual citra satelit di tahap selanjutnya.

- c. Proses interpretasi citra secara visual, yaitu dengan melihat karakteristik objek berdasarkan aspek keruangan (spasial). Untuk melakukan interpretasi tutupan lumpur dari citra satelit, digunakan beberapa unsur yang terdiri atas warna, bayangan, tekstur, pola, dan asosiasi kenampakan. Kemudian hasil interpretasi visual citra satelit tadi diklasifikasikan menjadi beberapa kelas tutupan lumpur, antara lain: Air Berlumpur, Lumpur Basah, Lumpur Kering, dan Lumpur Mulai Mengering. Hasil klasifikasi tutupan lumpur tersebut kemudian digeneralisasi dengan cara digitasi. Langkah ini diambil agar nantinya proses perhitungan volume tutupan lumpur menjadi lebih singkat.
- d. Selanjutnya dilakukan perhitungan volume semburan lumpur menggunakan data koordinat tiga dimensi hasil observasi lapangan menggunakan GPS Geodetik metode Kinematik. Yang terakhir adalah melakukan pemodelan tiga dimensi elevasi permukaan lumpur, agar diketahui kecenderungan arah aliran dan bentuk permukaan lumpur yang ada (*flowchart* visualisasi tiga dimensi dapat dilihat pada gambar 4).



Gambar 4. Tahap visualisasi model tiga dimensi elevasi permukaan lumpur

Berikut adalah uraian diagram alir tahap visualisasi model tiga dimensi elevasi permukaan lumpur:

- e. Langkah pertama adalah mempersiapkan data koordinat X, Y, dan Z observasi permukaan

- lumpur tahun 2014-2015 beserta dengan citra satelit Worldview-2 tahun 2014-2015;
- f. Kemudian data koordinat observasi permukaan lumpur dibentuk kontur dan dikonversikan menjadi bentuk TIN (*triangulated Irregular Network*) di ArcMap.
- g. Data TIN yang sudah dibuat di ArcMap, selanjutnya diinputkan ke dalam ArcScene. Melalui ArcScene inilah proses pemodelan tiga dimensi permukaan lumpur dilakukan. Untuk melakukannya, perlu melakukan pengaturan *Vertical Exaggeration* objek TIN, sehingga menghasilkan bentuk tiga dimensi, dan dapat dilakukan analisis kecenderungan arah sebaran lumpurnya.
- h. Citra satelit yang digunakan dalam klasifikasi dapat di-*overlay*-kan dengan model TIN. Dengan begitu, hasil visualisasi model tiga dimensi permukaan lumpur menjadi lebih mudah dipahami oleh khalayak umum.
- i. Jika sudah melakukan *overlay* dengan citra satelit, dilanjutkan dengan tahap membuat *keyframe animation*. *Keyframe* berguna sebagai jalur/*track* dalam menghasilkan video hasil akhir pemodelan tiga dimensi permukaan lumpur.
- j. Pada tahap akhir dilakukan *Export Animation* atau *rendering* untuk menyimpan video visualisasi pemodelan tiga dimensi ke dalam format file *.AVI. Format *.AVI sama halnya dengan format-format video lain, dan lebih fleksibel untuk diolah menggunakan perangkat lunak video *editing*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Ketelitian RMSE Citra Worldview-2

Citra *Worldview-2* tahun 2014-2015 yang diperoleh dari Kantor Badan Pelaksana Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo sebenarnya sudah layak untuk langsung diolah, karena *Product Level* citra tersebut adalah 2A (level 2), dibuktikan dengan RAW Data pada citra tahun 2014. Artinya citra yang akan digunakan telah terkoreksi radiometrik maupun geometri, sekaligus sudah terorthorektifikasi. Namun penulis tetap mencoba melakukan koreksi geometrik dengan GCP (*Ground Control Point*) yang diperoleh pada observasi lapangan menggunakan alat GPS Geodetik metode Statik, sehingga didapatkan hasil perhitungan RMS *Error* citra

satelit *Worldview-2* sebesar 0.456418 meter. Hasil ini membuktikan bahwa resolusi spasial citra satelit *Worldview-2* cocok dengan spesifikasi yang ada, yakni 0,46 meter.

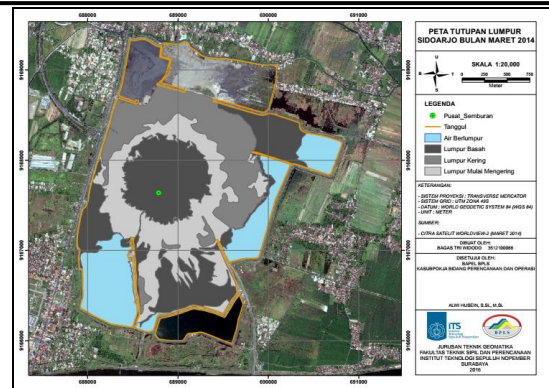
Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_X	Residual_Y	Residual
1	689515.841424	9166282.640240	689517.100000	9166282.290000	0.98059	-0.29228	1.02322
2	688502.224175	9166152.158862	688502.340000	9166151.960000	-0.066422	0	0.066422
3	688024.043524	9166288.217668	688023.700000	9166288.210000	-0.454079	0.141663	0.475664
4	688005.205153	9167621.322459	688005.080000	9167620.490000	-0.054583	-0.69229	0.69428
5	688110.630811	9168095.586196	688110.100000	9168096.870000	-0.40123	0.415819	0.591108
6	688206.287814	9168317.898742	688206.910000	9168317.550000	0.76402	-0.224762	0.796395
7	690273.664571	9167941.413103	690274.030000	9167941.540000	0.225678	0.126829	0.258875
8	689575.901999	9166864.424744	689575.890000	9166864.440000	-0.218515	0	0.218515
9	689869.712344	9166916.761961	689869.740000	9166916.850000	-0.207889	0.12658	0.239369
10	687919.660361	9166785.729640	687919.680000	9166785.690000	-0.012368	0.11261	0.113291
11	687884.549373	9167213.554768	687884.540000	9167213.510000	0.0200661	0.105644	0.108504
12	687918.005731	9167390.677428	687918.010000	9167390.760000	0.053712	0.236667	0.236667
13	690741.465997	9167977.890222	690741.490000	9167977.900000	-0.162214	0	0.162214
14	689488.051433	9166972.211822	689488.040000	9166972.170000	-0.192648	0	0.192648
15	690321.843065	9168417.359443	690321.670000	9168417.340000	-0.25424	0	0.25424

Gambar 5. RMS Error

Analisis Interpretasi Citra dan Klasifikasi Lumpur

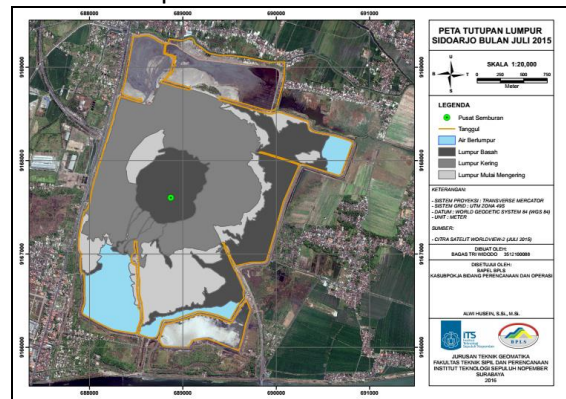
Intepretasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah intepretasi secara visual, dimana pengenalan objek dilakukan dengan proses perunutan dari penafsir berdasarkan ciri obyek yang terekam. Dalam melakukan intepretasi citra, penulis melakukan penafsiran objek tutupan lumpur di citra secara visual sekaligus dengan mencocokkan dokumentasi observasi lapangan (*ground truth*). Dari hasil observasi lapangan pada bulan Juli 2015 dan interpretasi citra satelit, setidaknya terdapat 4 tutupan lumpur yang berada di dalam tanggul penahan, yaitu Air Berlumpur, Lumpur Basah, Lumpur Kering, dan Lumpur Mulai Mengering.

Hasil interpretasi tersebut kemudian dijadikan patokan untuk membuat training sampling area, yang kemudian diproses dengan metode klasifikasi *Maximum Likelihood*. Asumsi metode klasifikasi ini ialah bahwa objek homogen selalu menampilkan histogram yang terdistribusi normal (Loppies, 2010). Artinya metode ini mengklasifikasikan objek-objek lain di dalam citra berdasarkan ciri-ciri kemiripan dari piksel-piksel yang dijadikan *training sampling area*. Berikut ini adalah hasil klasifikasi tutupan lumpur:



Gambar 6. Klasifikasi tutupan lumpur bulan Agustus 2014

Dari gambar 6 dan 7, Air Berlumpur berwarna biru muda, Lumpur Basah berwarna abu-abu kehitaman, Lumpur Mulai Mengering berwarna abu-abu, dan Lumpur Kering berwarna abu-abu tua. Sedangkan titik berwarna hijau adalah pusat semburan lumpur.

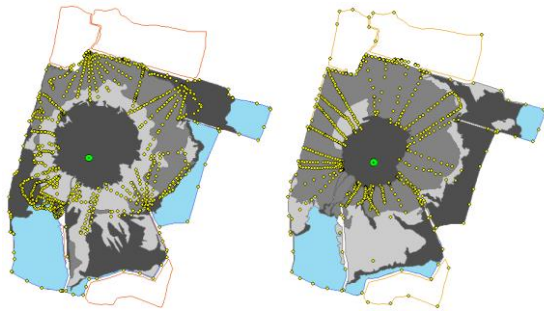


Gambar 7. Klasifikasi tutupan lumpur bulan Juli 2015

Jika diperhatikan pada gambar 6 dan 7, lumpur basah cenderung mengarah ke bagian timur tanggul penahan lumpur. Kemudian lumpur di timur tanggul dan di sekeliling lumpur basah sudah mulai mengering, ditandai dengan meluasnya tutupan Lumpur Kering pada bulan juli 2015. Tutupan Lumpur Mulai Mengering pada bagian selatan pun meluas, yang sebelumnya dominan tutupan Lumpur Basah.

Perhitungan Volume Tutupan Lumpur

Untuk melakukan perhitungan volume tutupan lumpur, dibutuhkan data luasan tutupan lumpur yang sudah dibuat dan dijabarkan pada poin sebelumnya, dan data elevasi dari hasil observasi lapangan. Data elevasi tutupan lumpur didapatkan menggunakan alat GPS Geodetik dengan metode Kinematik.



Gambar 8. Dari kiri, data titik pengukuran elevasi bulan Maret 2014 dan Juli 2015

Data sampel elevasi yang telah diambil pada permukaan lumpur, selanjutnya dihitung untuk mendapatkan nilai elevasi keseluruhan di dalam tanggul utama. Semakin banyak dan merata sampel yang diambil, maka perhitungan volume yang dilakukan menjadi lebih akurat. Setelah data koordinat beserta elevasi di-overlay-kan dengan hasil klasifikasi tutupan lumpur, maka dapat dihitung volume lumpur keseluruhan berdasarkan klasifikasi tersebut.

Tabel 1. Volume tutupan lumpur bulan Maret 2014

MARET 2014			
KLASIFIKASI	ELEVASI RATA-RATA (M)	LUAS (M ²)	VOLUME (M ³)
AIR BERLUMPUR	7,4411	945.826,49	7.037.950,25
LUMPUR KERING	10,8074	979.711,04	10.588.084,74
LUMPUR BASAH	9,1354	1.679.201,49	15.340.213,82
LUMPUR MULAI MENGERING	9,2465	1.197.524,23	11.072.874,55
TOTAL			44.039.123,365

TABEL 2.VOLUME TUTUPAN LUMPUR BULAN JULI 2015

JULI 2015			
KLASIFIKASI	ELEVASI RATA-RATA (M)	LUAS (M ²)	VOLUME (M ³)
AIR BERLUMPUR	7,8291	588.234,59	4.605.361,51
LUMPUR KERING	11,5692	1.939.155,96	22.434.478,24
LUMPUR BASAH	9,2989	1.290.761,32	12.002.633,96
LUMPUR MULAI MENGERING	8,8199	975.563,15	8.604.405,35
TOTAL			47.646.879,058

Dalam selang waktu 17 bulan atau 1 tahun 5 bulan, terdapat selisih volume sebesar 3.607.755,693 m³ antara bulan Maret 2014 dengan Bulan Juli 2015. Volume pada tabel 2 dan selisihnya tersebut sebenarnya bisa menjadi lebih besar jika pihak Badan Pelaksana Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo tidak melakukan pemindahan/pembuangan lumpur melalui jalur pipa ke sungai porong. Volume tutupan lumpur

pada bulan maret 2014 didominasi oleh tutupan lumpur basah (15.340.213,82 m³). Ini mungkin terjadi disebabkan karena pada bulan tersebut telah mulai memasuki musim penghujan.

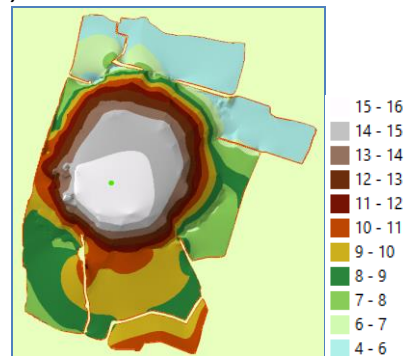


Gambar 9. Grafik volume per klasifikasi tutupan lumpur bulan Maret 2014 dan Juli 2015

Berbeda dengan bulan Maret 2014, pada bulan Juli 2015 justru tutupan Lumpur Kering lebih mendominasi (22.434.478,24 m³). Karena pada saat penulis melakukan kegiatan *ground truth* / observasi lapangan, memang sudah memasuki musim kemarau, yang membuat kandungan air di dalam lumpur menjadi lebih sedikit.

Visualisasi Pemodelan Tiga Dimensi Permukaan Lumpur

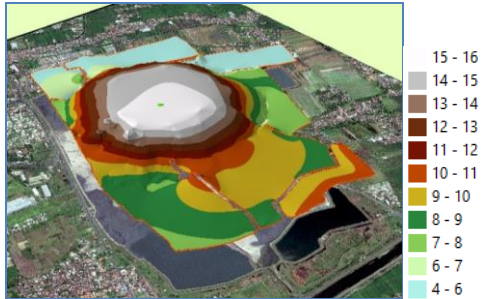
Pemodelan tiga dimensi ini dilakukan menggunakan fasilitas *ArcScene*, yang masih dalam satu konstelasi perangkat lunak *ArcGIS*. Tujuan melakukan pemodelan tiga dimensi adalah untuk mengetahui bentuk permukaan tutupan lumpur yang muncul sejak tanggal 29 Mei 2006 tersebut. Data yang digunakan pada pemodelan ini adalah data elevasi yang sudah dijadikan satu dalam struktur data *TIN (triangulated Irregular Network)*.



Gambar 10. TIN Elevasi permukaan lumpur bulan Maret 2014

Struktur data *TIN* ini mengandung nilai elevasi permukaan lumpur, yang kemudian akan dimodelkan menjadi bentuk tiga dimensi. Pada gambar 10, elevasi terendah adalah 4,38 meter yang dominan berada di sebelah utara tanggul.

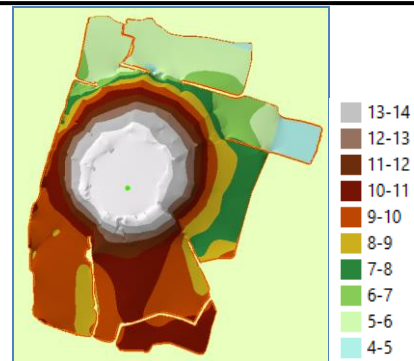
Tanggul sebelah utara tersebut jebol pada pertengahan tahun 2011 lalu. Dan elevasi tertingginya adalah 16,22 meter yang berada di dekat pusat semburan lumpur.



Gambar 11. Model tiga dimensi permukaan lumpur bulan Maret 2014

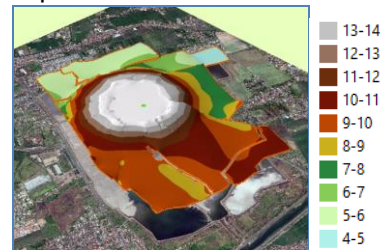
Berdasarkan pemodelan elevasi permukaan lumpur pada gambar 11, elevasi permukaan lumpur bagian utara yang berdekatan dengan pusat semburan lebih rendah daripada di sebelah selatan, sehingga hal ini akan mempengaruhi arah aliran lumpur yang cenderung mengarah ke utara. Hal ini terjadi, mungkin dikarenakan oleh kondisi topografi tanah di sebelah selatan memang lebih tinggi, mengingat terdapat Gunung Penanggungan di sebelah selatan Kabupaten Sidoarjo. Atau memang hal ini terjadi dikarenakan faktor dari dalam permukaan lumpur yang sangat dinamis, sehingga membuat elevasi lumpur di sebelah selatan yang berdekatan dengan pusat semburan menjadi lebih tinggi.

Jika beralih pada gambar 12, dapat terlihat bahwa daerah di sekeliling pusat semburan tidak lagi seperti pada gambar 10. Permukaan pada bulan Juli 2015 yang didominasi dengan tutupan lumpur kering membuat aliran lumpur basah lebih terkonsentrasi di dekat pusat semburan. Di sisi lain, ketinggian lumpur di sebelah barat, barat daya, dan selatan tanggul menjadi lebih tinggi. Jika sudah demikian, sedikit banyak ini dapat menyulitkan pihak BPLS dalam melakukan kegiatan *maintenance* pipa untuk mengalirkan lumpur basah ke kali porong yang berada di sebelah selatan tanggul penahan. Karena saat terjadi kendala pada jalur pipa tersebut, posisi pipa berada di bawah permukaan lumpur yang lebih tinggi.



Gambar 12. TIN Elevasi permukaan lumpur bulan Juli 2015

Elevasi maksimum pada permukaan lumpur bulan Juli 2015 adalah sebesar 14,67 meter (di dekat pusat semburan). 1,55 meter lebih rendah dari elevasi maksimum pada bulan Maret 2014. Seperti pada paragraf sebelumnya, hal ini terjadi dikarenakan volume lumpur basah yang terkonsentrasi di dekat pusat semburan sudah terlalu masif, sehingga struktur tanah di bawahnya tidak lagi dapat menahan beban, menyebabkan penurunan permukaan tersebut.



Gambar 13. Model tiga dimensi permukaan lumpur bulan Juli 2015

Sedangkan jika dilihat dari sisi samping, bentuk permukaan lumpur di dekat pusat semburan terlihat seperti kaldera atau fitur kawah gunung lumpur. Sekali lagi, ini terjadi karena faktor musim kemarau yang membuat lumpur mengering dan keras, membuat konsentrasi lumpur basah dominan berada di dekat pusat semburan. Akibatnya, tanah yang menopang di bagian bawah tidak kuat lagi untuk menahan, sehingga mengalami *sledding*, dan terbentuklah fitur kaldera seperti yang ditunjukkan pada gambar 13.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Adapun beberapa hal yang bisa disimpulkan dari penelitian ini adalah :

1. Tutupan lumpur terbagi menjadi 4 klasifikasi, antara lain adalah Air Berlumpur, Lumpur

Basah, Lumpur Mulai Mengering, dan Lumpur Kering. Lumpur Basah cenderung mengarah ke bagian timur dari tanggul penahan lumpur. Tutupan Lumpur Mulai Mengering pada bagian selatan pun meluas, yang sebelumnya dominan tutupan Lumpur Basah.

2. Volume total tutupan lumpur bulan Maret 2014 dan Juli 2015 adalah 44.039.123,365 m³ dan 47.646.879,058 m³. Terdapat selisih sebesar 3.607.755,693 m³.
3. Elevasi tertinggi permukaan lumpur pada bulan Maret 2014 adalah 16,22 m, sedangkan elevasi terendahnya sebesar 4,38 m. Dan pada bulan Juli 2015, elevasi tertingginya sebesar 14,67 m, elevasi terendah 4,16 m.
4. Dari hasil pemodelan tiga dimensi bulan Maret 2014, didapati arah aliran lumpur cenderung ke arah utara. Pada bulan Juli 2015, lumpur basah terkonsentrasi di dekat pusat semburan, dikarenakan faktor musim kemarau yang membuat lumpur di dalam tanggul mengering dan keras. Hal ini mengakibatkan tanah di bawahnya tidak kuat menahan, dan mengalami *sledding*.

Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, data citra satelit resolusi tinggi juga dapat dikolaborasi dengan data pengukuran GPS untuk mencari volume permukaan, dalam hal ini permukaan lumpur Sidoarjo. Namun langkah baiknya jika hasil perhitungan volume ini dapat di-compare dengan data volume hasil pengukuran langsung di lapangan, yang umumnya menggunakan alat Total Station. Sehingga dapat diketahui perbandingan, selisih, dan kedekatan hasil perhitungan keduanya.

Selain itu, hasil perhitungan volume dan pemodelan tiga dimensi permukaan lumpur pada penelitian ini akan lebih akurat jika dilakukan setiap bulan pada 1 tahunnya. Ini akan dapat membantu pihak BAPEL BPLS dalam melakukan langkah-langkah antisipasi jika volume lumpur telah melebihi batas ketinggian tanggul, mengingat kondisi di dalam tanggul juga sangat dipengaruhi oleh faktor musim dan cuaca.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis B.T.W. sangat berterima kasih kepada Badan Pelaksana Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo yang telah bersedia memberikan dukungan berupa penyediaan data sehingga terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z., 1995. *Penentuan Posisi Dengan GPS dan Aplikasinya*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Abidin, H. Z. et al., 2009. Deformasi Koseismik dan Pascaseismik Gempa Yogyakarta 2006 dari Hasil Survei GPS. *Jurnal Geologi Indonesia*, Vol. 4 No. 4, Desember. pp. 275-284.
- Akbari, A. M. & Hariyanto, T., 2012. *PERHITUNGAN VOLUME SEMBURAN DAN SEBARAN LUMPUR SIDOARJO DENGAN CITRA*. Surabaya: Teknik Geomatika ITS.
- Ariani, R., 2009. *Klasifikasi Citra*. [Online] Tersedia: <http://rahmiariani.blogspot.co.id/2009/04/klasifikasi-citra.html>
- Ayuindra, M., 2013. *Analisa Tutupan Lahan menggunakan Klasifikasi Supervised dan Unsupervised*, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Bafdal, Nurpilihan, Amaru, K. & Boy, M., 2011. *Buku Ajar Sistem Geografis*. Bandung: Jurusan Teknik Manajemen Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjajaran.
- Evan, 2014. *Tanggul Lapindo, dari Jebol ke Jebol*. [Online] Tersedia: <http://nasional.tempo.co/read/news/2014/09/11/058606020/tanggul-lapindo-dari-jebol-ke-jebol>
- Firdaus, O. M., 2010. *Analisis Implementasi Global Positioning System (GPS) pada Moda Transportasi di PT.X*. Yogyakarta, UGM Yogyakarta.
- Furqon, A., 2007. *Analisis Kerapatan Vegetasi Menggunakan Forest Canopy Density (FCD) dan Radar Backscattering JERS-1 SAR*, Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Kreveld, M. v., 1997. *Algorithms for Triangulated Terrains*, s.l.: Dept. of Computer Science, Utrecht University, The Netherlands.
- LO, C. P. & YEUNG, A. K. W., 2002. *Concepts and Techniques of Geographic Information Systems*, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Loppies, R., 2010. *ANALISIS PENUTUPAN/PENGGUNAAN LAHAN MENGGUNAKAN KLASIFIKASI KEMIRIPAN MAKSIMUM (MAXIMUM LIKELIHOOD CLASSIFICATION) DI PULAU SAPARUA DAN MOLANA, KECAMATAN SAPARUA*, Ambon: Fakultas Pertanian, Universitas Pattimura.
- Mauludi, R. Y., 2013. *Visualisasi Informasi Berbasis Web Untuk Reporting Pada Website E-Rekrutmen PT. Pelabuhan Indonesia III (Perseo)*, Surabaya: STIKOM Surabaya.
- Muntohar, A. S., 2010. *MIKRO-ZONASI POTENSI LIKUIFAKSI DAN PENURUNAN TANAH AKIBAT GEMPA BUMI*, Yogyakarta: Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA.
- Murai, S., 1999. *Textbook on Remote Sensing and GIS*. Tokyo: the National Space Development Agency of Japan (NASDA) at Asian Institute of Technology.
- Rianelly, P. S., 2011. *Analisa Perubahan Tata Guna Lahan Wilayah Surabaya Barat Menggunakan Citra Satelit Quickbird Tahun 2003 Dan 2009*, Surabaya: Program Studi Teknik Geomatika ITS.
- Soemantri, L., 2009. *TEKNOLOGI PENGINDERAAN JAUH (REMOTE SENSING)*, Bandung: Jurusan Pendidikan Geografi UPI.
- Templi, 1991. *DTM and Differential Modelling*. Oxford, England, OEEPE publication, pp. 193-200.
- Yuwono, 2004. *PENDIDIKAN DAN PELATIHAN (DIKLAT) TEKNIS PENGUKURAN DAN PEMETAAN KOTA*. Surabaya: INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER.