

# Analisis Penyebab Kelongsoran Dan Alternatif Perkuatan Tanah Timbunan Ruas Jalan Tol Batang-Semarang STA 383+100-STA 383+900

Ryan Gihlang Ramadhan, Suwarno, dan Noor Endah Mochtar

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

*e-mail* : gihlangrama@gmail.com, suwarno@ce.its.ac.id dan noormochtar@gmail.com

**Abstrak**—Jalan Tol Batang-Semarang merupakan salah satu rangkaian dari Jalan Tol Trans Jawa yang menghubungkan Kabupaten Batang, Kabupaten Kendal, dan Kabupaten Semarang. Pada proses pelaksanaan Jalan Tol BSTR seksi 2 terdapat beberapa kendala, salah satunya yaitu terdapat suatu kondisi tanah dasar pada STA 383+100 sampai STA 383+900 yang terletak di area persawahan dengan rata-rata kedalaman tanah lunak sampai 15,0 meter, sementara tinggi tanah timbunan yang direncanakan adalah 4,72 sampai 8,27 meter. Pada lokasi tersebut, desain awal yang digunakan oleh perencana untuk perbaikan tanah dasar hanya dilakukan replacement setebal 1,50 meter. Ditengah proses pelaksanaan terjadi kelongsoran saat tahap timbunan tinggi 3,50 meter. Hasil analisis dari penyebab kelongsoran yaitu stabilitas timbunan yang direncanakan belum cukup aman terhadap kelongsoran mengingat nilai *safety factor* setelah di cek ulang ternyata masih kurang dari 1,0. Besar pemampatan yang sudah terjadi saat longsor (selama 6 bulan) pada tiap zona bervariasi yaitu 4 cm hingga 6 cm. Perubahan parameter tanah dasar yang diakibatkan oleh pemampatan terlalu kecil sehingga perubahan parameter tanah dapat diabaikan atau dianggap tidak berubah. Metode perbaikan tanah dasar yang digunakan untuk menghilangkan pemampatan dan meningkatkan daya dukung tanah adalah metode *preloading* sistem *surcharge* serta untuk mempercepat waktu proses pemampatan dilakukan dengan memasang PVD dengan pola pemasangan segiempat dan jarak antar PVD 1,0 meter. Ada 3 alternatif perkuatan yang ditawarkan untuk menjaga stabilitas tanah timbunan terhadap kelongsoran yaitu Cerucuk, *Encapsulated Stone Column* (ESC) dan *Counterweight*. Hasil dari perhitungan alternatif perkuatan menggunakan cerucuk memerlukan biaya Rp. 112,6 milyar dengan waktu pelaksanaan 73 hari, perkuatan menggunakan *Encapsulated Stone Column* memerlukan biaya Rp. 22,1 milyar dengan waktu 198 hari dan perkuatan menggunakan *Counterweight* memerlukan biaya Rp. 51,1 milyar dengan waktu 87 hari. Dari hasil analisis perbandingan alternatif perkuatan yang dipakai adalah menggunakan cerucuk.

**Kata Kunci**—Cerucuk, Kelongsoran, PVD, Waktu dan Biaya

## I. PENDAHULUAN

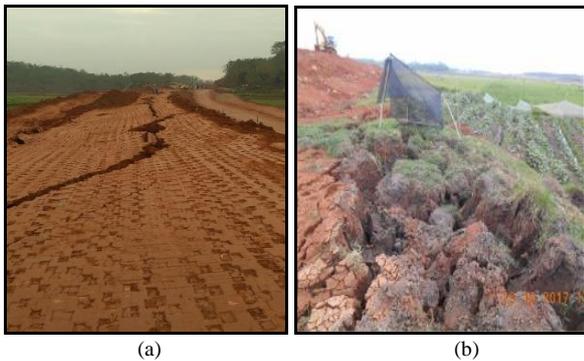
PEMBANGUNAN infrastruktur di wilayah Indonesia dari tahun ke tahun mengalami perkembangan yang cukup pesat, salah satunya yaitu dengan adanya program pemerintah saat ini yang fokus dengan pembangunan jalan tol. Menurut Badan Pengatur Jalan Tol (BPJT) jalan tol dibangun dengan tujuan untuk meningkatkan mobilitas dan pelayanan distribusi barang dan jasa guna menunjang pertumbuhan ekonomi. Seiring dengan upaya tersebut

pemerintah mempercepat pembangunan jalan tol di Pulau Jawa. Salah satu segmen jalan tol yang sedang dilaksanakan adalah Ruas Jalan Tol Batang-Semarang.

Pembangunan Ruas Jalan Tol Batang-Semarang atau yang sering disebut BSTR (Batang-Semarang Toll Road) merupakan jalan tol yang akan menghubungkan tiga Kabupaten yaitu Kabupaten Batang, Kabupaten Kendal, dan Kabupaten Semarang. Dalam proses pembangunannya, jalan tol ini dibagi menjadi 5 seksi yang memiliki total panjang 74,20 Km.

Jalan Tol Batang-Semarang Seksi 1 dan Seksi 2 ditargetkan dapat selesai dan beroperasi pada bulan Agustus 2018. Dalam proses pelaksanaannya terdapat beberapa kendala, salah satunya terdapat suatu kondisi tanah dasar pada STA 383+100 sampai STA 383+900 yang terletak di area persawahan dengan rata-rata kedalaman tanah lunak sampai 15 meter, sementara tinggi tanah timbunan yang direncanakan adalah 4 sampai 8 meter. Pada lokasi tersebut, desain awal yang digunakan oleh perencana untuk perbaikan tanah dasar hanya dilakukan *replace* tanah dasar dengan tanah merah setebal 1,50 meter.

Ditengah proses pelaksanaan pekerjaan timbunan, pada saat tahap timbunan sudah mencapai tinggi 3,50 telah terjadi kelongsoran pada badan jalan tol, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Dilihat dari permasalahan dilapangan dengan kondisi tanah dasar yang memiliki tanah lunak cukup dalam dan di atasnya akan dibangun timbunan yang relatif tinggi maka masalah yang akan muncul yaitu kelongsoran yang diakibatkan oleh daya dukung tanah yang rendah dan penurunan tanah yang besar. Oleh sebab itu, dalam kasus ini perlu penanganan yang cukup serius dengan melakukan perbaikan tanah dasar untuk meningkatkan daya dukung tanah dasar dan perkuatan stabilitas timbunan. Hanya saja, dikarenakan keterbatasan sisa waktu kontrak dan lokasi tersebut harus digunakan sebagai Jalan Tol fungsional 2018, maka PT. Waskita Karya (Persero) Tbk selaku kontraktor pelaksana melakukan perubahan desain dengan seizin PT. Jasa Marga sebagai pemilik proyek dan telah disetujui semua pihak. Desain yang awalnya direncanakan tanah timbunan diubah menjadi *slab on pile*, dikarenakan menurut kontraktor pelaksana desain tersebut adalah desain paling efektif untuk digunakan. Konstruksi *slab on pile* memiliki panjang 650 meter yang terdiri dari banyak bentang sehingga dibutuhkan banyak tiang, hal ini akan membutuhkan biaya konstruksi yang sangat mahal.



Gambar 1. Kelongsoran yang terjadi (a) retakan pada badan jalan, (b) sawah warga terangkat 1 meter [1]

Berdasarkan uraian tersebut diatas perencanaan ini dicoba untuk mempertahankan desain awal yang berupa tanah timbunan dengan melakukan perbaikan tanah dasar menggunakan metode Pre-loading sistem *surcharge* dan mempercepat waktu proses pemampatan dengan menggunakan PVD serta memperkuat stabilitas tanah timbunan dengan metode Cerucuk, *Encapsulated Stone Column* (ESC) dan *Counterweight*. Sehingga desain konstruksi timbunan yang direncanakan stabil, aman terhadap kelongsoran, dan sudah tidak terjadi pemampatan yang dapat mengakibatkan kerusakan pada perkerasan Jalan Tol Batang-Semarang.

Perlu diketahui juga sisa waktu kontrak yang tersedia 9 bulan dihitung setelah terjadi kelongsoran yaitu bulan November 2017 sampai akhir kontrak proyek selesai Agustus 2018. Dengan demikian, perencanaan perkuatan yang dilakukan harus dapat dilaksanakan dalam sisa waktu tersebut.

## II. URAIAN PENULISAN

### A. Identifikasi Masalah

Proses identifikasi masalah dapat dilakukan dengan mengambil permasalahan berdasar uraian pendahuluan yang telah dijelaskan.

### B. Tahap Pengumpulan Data

Pada proses ini dilakukan pengumpulan data-data yang berhubungan dengan proses analisis yang diperlukan. Data yang digunakan dalam analisis ini merupakan data sekunder yang didapat dari PT. Waskita Karya (Persero) Tbk selaku kontraktor pelaksana Proyek Jalan Tol Batang-Semarang Seksi 2 yaitu berupa *layout* lokasi jalan tol, lokasi titik kelongsoran, gambar potongan memanjang dan melintang timbunan yang mengalami kelongsoran, dan hasil pengujian tanah dasar di lapangan pada saat sebelum dan setelah longsor. Selain itu, penulis juga mengumpulkan data spesifikasi bahan material yang akan digunakan seperti ; PVD, *geotextile*, *spun pile* yang rencana digunakan sebagai material cerucuk, dan tanah timbunan.

### C. Studi Pustaka

Studi pustaka yang dimaksud yaitu berupa pengumpulan materi-materi yang akan digunakan sebagai referensi yang diperlukan dalam analisis ini. Referensi yang ada bisa didapatkan dari berbagai macam sumber, dimulai dari bahan ajar mata kuliah, buku-buku yang berhubungan dengan perencanaan, jurnal, ataupun dari internet.

### D. Analisis Data Tanah Dasar Sebelum dan Setelah Longsor

Data tanah yang digunakan adalah data hasil penyelidikan tanah pada proyek pembangunan Jalan Tol Ruas Batang-Semarang seksi 2 STA 383+100 sampai STA 383+900. Data tanah yang diperoleh hanya berupa data hasil pengujian langsung dilapangan yaitu uji sondir dan uji *standard penetration test* (SPT) yang diambil pada kondisi sebelum dan setelah longsor. Pengujian tersebut hanya menghasilkan sebagian parameter tanah saja, sehingga untuk memperoleh parameter tanah lainnya penulis melakukan korelasi parameter tanah dari data sondir dan SPT yang tersedia.

#### 1) Data Tanah Sebelum Longsor

Pada kondisi perencanaan awal (sebelum dilakukan konstruksi/sebelum terjadinya longsor) telah dilakukan lima titik pengujian sondir di area ruas tinjauan penulisan ini yang berada pada STA 383+100, STA 383+300, STA 383+500, STA 383+700 dan STA 383+900. Karena data yang diperoleh hanya berupa hasil pengujian sondir saja, maka penulis berinisiatif untuk melakukan korelasi untuk memperoleh parameter tanah dengan pendekatan empiris yang tersedia.

Untuk pengolahan data sebelum longsor berupa sondir, hal yang pertama kali dilakukan yaitu menentukan jenis tanahnya berdasar nilai perlawanan konus ( $q_c$ ) dan *friction ratio* ( $fr$ ) berdasar grafik yang diusulkan oleh schertmann [2]. Selain itu penentuan jenis tanah juga dilakukan dengan menggunakan analisis *Soil Behaviour Type* (SBT) yang diusulkan oleh Robertson [3], dimana dalam analisis ini nilai tahanan kunus ( $qt$ ) dan *friction ratio* ( $R_f$ ) digabungkan menjadi satu indeks *soil behaviour type* ( $I_c$ ). Setelah jenis tanah diketahui, maka langkah selanjutnya yaitu merata-rata nilai perlawanan konus ( $q_c$ ) berdasar ketebalan jenis tanah yang sama. Dari nilai perlawanan konus ( $q_c$ ) rata-rata tersebut dikonversi kedalam nilai N-SPT, hal ini dilakukan karena untuk mempermudah korelasi data tanah tersebut. Untuk mencari parameter tanah dari nilai N-SPT dilakukan pendekatan korelasi berdasar pendekatan yang diusulkan Biarez [4] dan Bowles [5].

#### 2) Data Tanah Sebelum Longsor

Pada saat kondisi di lapangan di stationing tertentu mengalami kelongsoran pada oktober 2017, maka dilakukan beberapa titik *soil investigation* ulang di lapangan yaitu berupa pengujian borlog dan N-SPT. Titik-titik tersebut berada pada STA 383+275, STA 383+450, STA 383+550, STA 383+650 dan STA 383+790. Karena pada penulisan ini data tanah setelah longsor yang diperoleh hanya berupa nilai N-SPT, maka untuk mendapatkan nilai parameter tanah tersebut perlu melakukan pendekatan korelasi nilai N-SPT berdasar pendekatan yang diusulkan Biarez [4] dan Bowles [5].

### E. Analisis Penyebab Kelongsoran

Berdasar data sekunder berupa sondir yang diperoleh sebelum terjadi kelongsoran dapat dilakukan analisis penyebab kelongsoran dengan menggunakan program bantu Geo5 untuk mengetahui nilai *safety factor* dan menentukan penyebab kelongsoran yang terjadi.

**F. Pemampatan Tanah Saat Terjadi Kelongsoran**

Proses ini dilakukan untuk mengetahui besar pemampatan tanah yang telah terjadi akibat adanya beban timbunan di atas tanah dasar setinggi 3,50 meter selama 6 bulan dimulai dari awal konstruksi sampai terjadi kelongsoran.

**G. Perubahan Parameter Tanah Akibat Pemampatan**

Tanah akan mengalami *settlement* apabila di atasnya dilakukan pembebanan maka tekanan air pori akan naik sehingga air pori ke luar yang menyebabkan berkurangnya volume, oleh karena itu akan terjadi *settlement* dan akan terjadi perubahan parameter tanah. Analisis perubahan parameter tanah bertujuan untuk mencari perubahan parameter tanah dasar akibat beban yang ada di atasnya berupa timbunan setinggi 3,50 meter selama 6 bulan.

**H. Perencanaan Perbaikan Tanah Dasar**

Berdasar data yang digunakan untuk menghitung besar dan waktu pemampatan tanah dasar, pemampatan yang terjadi setiap tahunnya tidak boleh lebih dari 2,50 cm, apabila pemampatan yang terjadi setiap tahunnya lebih dari yang disyaratkan dan waktu yang dibutuhkan untuk pemampatan sangat lama maka perlu dilakukan perbaikan tanah dasar. Pada penulisan ini perbaikan tanah dasar direncanakan menggunakan metode *preloading* sistem *surchage* dan memasang PVD untuk mempercepat waktu proses pemampatan.

**I. Analisis Stabilitas Tanah Timbunan**

Proses ini dilakukan untuk mengetahui *safety factor* dari suatu timbunan. Batas minimum timbunan tidak longsor ketika *safety factor* memiliki nilai 1,5. Apabila timbunan tersebut memiliki *safety factor* kurang dari batas minimum yang telah ditentukan, maka harus dilakukan perkuatan pada timbunan tersebut. Dari data hasil analisis ini akan digunakan untuk menghitung kebutuhan perkuatan yang akan dilakukan.

**J. Perencanaan Perkuatan Stabilitas Tanah Timbunan**

Alternatif perkuatan timbunan untuk menanggulangi kelongsoran akan dicoba menggunakan tiga alternatif yaitu cerucuk, *encapsulated stone column* (ESC), dan *counterweight*, dan. Dari tiap jenis perkuatan akan dihitung jumlah kebutuhan material yang dipakai dan waktu pelaksanaan. Nilai *safety factor* (SF) yang terjadi pada analisis stabilitas timbunan dengan masing-masing perkuatan direncanakan lebih besar atau sama dengan 1,5.

**K. Perhitungan Jumlah Biaya Material dan Waktu Pelaksanaan**

Setelah perencanaan perkuatan timbunan selesai, maka jumlah biaya material dan waktu pelaksanaan untuk setiap masing-masing alternatif perkuatan yang direncanakan dihitung. Dari jumlah biaya material dan waktu pelaksanaan ini maka dapat ditentukan alternatif perkuatan yang akan digunakan berdasar efisiensi biaya dan sisa waktu kontrak 9 bulan.

**III. HASIL PENGOLAHAN DATA**

**A. Data Tanah Dasar**

Untuk mempermudah dalam perencanaan, beberapa data pengujian tanah yang dilakukan sebelum atau setelah longsor maka dilakukan analisa data tanah dengan metode

Tabel 1.  
Parameter Tanah Dasar Sebelum Longsor

Depth (m)	N- SPT	Sifat Fisik				Sifat Teknis			
		Volumetric + Gravimetric γ <sub>w</sub>	W <sub>c</sub>	e	n	PI (%)	Cu (kPa)	φ (°)	Consolidation Cc Cv (cm <sup>2</sup> /s)
2.0	2	15.51477	79.2	0.36	0.67	130.48	5.5	-	0.594 0.00029
4.0	2	15.51477	79.2	0.36	0.67	130.48	5.5	-	0.594 0.00029
6.0	5	15.80572	181.7	0.33	0.63	123.47	12.7	-	0.492 0.00045
8.0	4	15.91771	157.1	0.64	0.62	226.60	15.2	-	0.534 0.00039
10.0	4	15.91771	157.1	0.64	0.62	226.60	15.2	-	0.534 0.00039
12.0	4	15.91771	157.1	0.64	0.62	226.60	15.2	-	0.534 0.00039
14.0	8	16.28963	421.5	0.75	0.61	214.98	18.6	22.0	0.344 0.00053
16.0	8	16.28963	421.5	0.75	0.61	214.98	18.6	22.0	0.344 0.00053
18.0	27	17.49447	441.0	0.67	0.516	-	-	26.0	- -
20.0	39	18.87733	780.8	0.53	0.460	-	-	35.0	- -

Tabel 2.  
Parameter Tanah Dasar Setelah Longsor

Depth (m)	N- SPT	Sifat Fisik				Sifat Teknis		
		Volumetric + Gravimetric γ <sub>w</sub>	W <sub>c</sub>	e	n	Cu (kPa)	φ (°)	Consolidation Cc Cv (cm <sup>2</sup> /s)
1.0	3	15.620	75.67	1.916	0.657	8.6	-	0.549 0.00036
3.0	3	15.620	75.67	1.916	0.657	8.6	-	0.549 0.00036
5.0	5	15.884	70.71	1.796	0.642	16.5	-	0.509 0.00043
7.0	5	15.884	70.71	1.796	0.642	16.5	-	0.509 0.00043
9.0	6	16.021	68.24	1.707	0.631	20.6	-	0.480 0.00048
11.0	6	16.021	68.24	1.707	0.631	20.6	-	0.480 0.00048
13.0	11	17.237	52.44	1.111	0.526	47.7	-	0.280 0.00079
15.0	11	17.237	52.44	1.111	0.526	47.7	-	0.280 0.00079
17.0	18	18.375	56.54	1.030	0.507	43.9	-	0.253 0.000828
19.0	18	18.375	56.54	1.030	0.507	43.9	-	0.253 0.000828

analisa statistik dengan selang kepercayaan 90%. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan nilai-nilai parameter tanah sepanjang stationing yang direncanakan. Hasil analisa statistik untuk data tanah sebelum dan setelah longsor dapat ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 2 data tanah dasar setelah longsor dari beberapa parameter tanah tersebut lebih baik dibandingkan data tanah sebelum kelongsoran, hal ini dapat terjadi kemungkinan tanah timbunan tergeser ke dalam lapisan tanah dasar saat terjadi longsor.

**B. Zonasi Perencanaan**

Zonasi perencanaan yaitu membagi perencanaan pada ruas yang ditinjau menjadi beberapa zona, hal ini dimaksudkan untuk mempermudah perhitungan dan metode pelaksanaan di lapangan dalam melakukan perencanaan perbaikan tanah dasar serta perkuatan stabilitas timbunan pada ruas tersebut. Zonasi perencanaan dilakukan berdasarkan pada variasi kedalaman tanah lunak dan variasi tinggi timbunan yang direncanakan. Hasil analisa zonasi perencanaan dapat ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3.  
Zonasi Daerah Perencanaan

Zona	Stationing	Kedalaman Tanah Lunak (m)	Tinggi Timbunan (m)
Zona A	383+100 s.d 383+300	16,00	4,72
Zona B	383+300 s.d 383+500	16,00	5,49
Zona C	383+500 s.d 383+700	15,00	6,22
Zona D	383+700 s.d 383+800	11,00	7,36
Zona E	383+800 s.d 383+900	7,00	8,27

Tabel 4.  
Pemampatan Yang Terjadi Saat Longsor

		Zona A	Zona B	Zona C	Zona D	Zona E
Tinggi Timbunan	(m)	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
Kedalaman Tanah Lunak	(m)	16.00	16.00	15.00	11.00	7.00
Besar Sc Timbunan	(m)	0.769	0.769	0.748	0.636	0.430
Besar Sc Replacement	(m)	0.015	0.015	0.015	0.013	0.010
Besar ScTotal	(m)	0.784	0.784	0.763	0.649	0.440
Waktu Untuk Sc Total	(Bulan)	1689.7	1689.7	1491.6	799.3	278.4
Waktu Untuk ScTotal	(Tahun)	140.8	140.8	124.3	66.6	23.2
Cv Gabungan	m <sup>2</sup> /tahun	1.542	1.542	1.535	1.541	1.791
Besar Sc Selama 6 Bulan	(m)	0.049	0.049	0.050	0.058	0.067

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Penyebab Kelongsoran

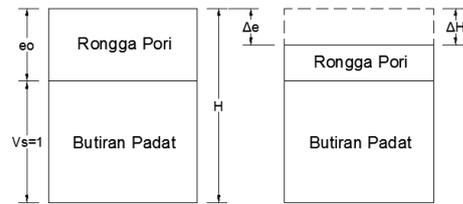
Berdasar hasil analisa stabilitas timbunan dengan menggunakan program bantu Geo5, didapatkan SF pada STA 383+500 yaitu 0,74 dan pada STA 383+700 yaitu 0,71 serta type kelongsoran yang terjadi dari hasil analisa tersebut yaitu *overall stability*. Dimana hal ini membuktikan bahwa perbaikan tanah dasar yang dilakukan pada perencanaan awal masih belum cukup aman. Maka, dapat disimpulkan bahwa penyebab kelongsoran adalah stabilitas timbunan yang direncanakan belum cukup aman terhadap kelongsoran mengingat nilai *safety factor* setelah di cek ulang ternyata masih kurang dari 1,0. Hal ini mungkin terjadi karena pendekatan korelasi antara parameter tanah yang dipakai untuk perencanaan yang didasarkan pada data pengujian sondir kurang teliti

B. Pemampatan Yang Terjadi Saat Longsor

Besar pemampatan yang telah terjadi saat longsor yaitu ketika tanah dasar telah menerima beban sebesar tinggi timbunan 3,50 meter dengan waktu 6 bulan. Dalam tahap ini maka digunakan data tanah sebelum longsor untuk mengetahui besarnya *settlement*-nya. Berikut adalah rekapitulasi besar *settlement* pada setiap zona ditunjukkan pada Tabel 4.

C. Perubahan Parameter Saat Longsor

Pada proses konsolidasi, perubahan tinggi ( $\Delta H$ ) per satuan dari tinggi awal ( $H$ ) adalah sama dengan perubahan volume ( $\Delta V$ ) per satuan volume awal ( $V$ ) atau bila volume padat  $V_s=1$  dan angka pori awal adalah  $e_o$  maka kedudukan akhir dari proses konsolidasi dapat ditunjukkan pada Gambar 2. Besaran volume padat tetap, angka pori berkurang karena adanya  $\Delta e$ .



Gambar 2. Fase sebelum dan sesudah konsolidasi

Tabel 5.  
Rekapitulasi H final, H insial dan settlement

Zona	H Final (m)	H Inisial (m)	Settlement (m)
Zona A	4,72	5,34	1,02
Zona B	5,49	6,23	1,15
Zona C	6,22	7,02	1,22
Zona D	7,36	8,06	1,13
Zona E	8,27	8,62	0,78

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1 + e_o}$$

$$\Delta e = (1 + e_o) \cdot \frac{\Delta H}{H}$$

$$\Delta e = (1 + 2,036) \cdot \frac{0,049}{16} = 0,009$$

$$\Delta e = e_o \text{ lama} - e_o \text{ baru}$$

$$\gamma_{sat \text{ baru}} = \frac{(2,68 + 2,027) \times 10 \text{ kN/m}^3}{1 + 2,027} = 15,550 \text{ kN/m}^3$$

$\gamma_{sat \text{ lama}} 15,514 \text{ kN/m}^3$ , Karena perubahan parameter tanah akibat *settlement* sangat kecil maka dapat diabaikan atau parameter tanah dianggap tidak berubah, untuk langkah selanjutnya dalam perencanaan perbaikan tanah dasar dan perkuatan timbunan menggunakan parameter tanah berdasarkan data sebelum longsor

D. Perhitungan H awal dan H akhir Timbunan

Dalam perencanaan timbunan di atas tanah lunak, tinggi timbunan yang harus dilaksanakan lebih besar dari tinggi timbunan rencana. Hal ini dikarenakan terjadi pemampatan yang cukup besar pada tanah tersebut. Besar tinggi awal ( $H$  awal) dan tinggi akhir ( $H$  akhir) dapat diketahui dengan persamaan berikut:

$$H_{awal} = \frac{q + (Sc \times \gamma_w)}{\gamma_{timb}} \tag{1}$$

$$H_{akhir} = (H_{awal} - Sc_{timbunan} - Sc_{pavement} - H_{bongkar}) + H_{pavement}$$

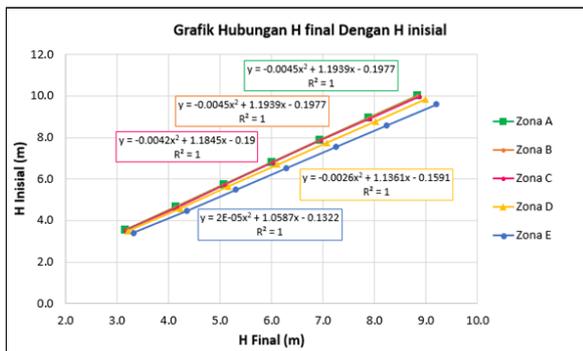
Dimana:

- $q$  = Beban yang diasumsikan awal dalam perhitungan pemampatan.
- $Sc_{timbunan}$  = Penurunan akibat beban timbunan.
- $Sc_{pavement}$  = Penurunan akibat beban lalu lintas.
- $H_{bongkar-traffic}$  = Tinggi timbunan yang dapat dibongkar Akibat beban *traffic*.
- $H_{pavement}$  = Ketebalan perkerasan rencana

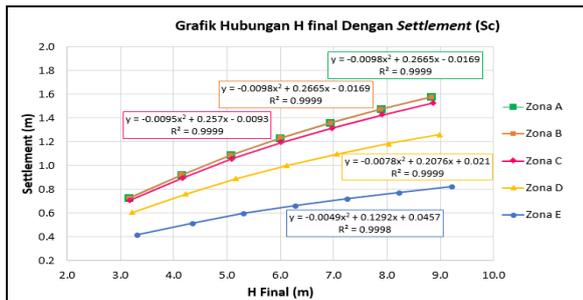
Rekapitulasi dari perhitungan H awal, H akhir, dan pemampatan ( $Sc$ ) dapat dilihat pada Tabel 5.

E. Perhitungan Waktu Konsolidasi Tanpa PVD

Perhitungan waktu konsolidasi tanpa PVD, yaitu total waktu yang dibutuhkan tanah dasar untuk memampat tanpa bantuan PVD sehingga air mengalir keluar ke arah vertikal saja. Tanah dasar memiliki beberapa lapis jenis tanah



Gambar 3. Grafik hubungan antara H final dengan H inisial



Gambar 4. Grafik hubungan antara H final dengan Settlement

dengan ketebalan masing-masing yang berbeda-beda dan nilai Cv yang berbeda-beda, sehingga nilai Cv yang digunakan yaitu Cv gabungan.

$$H_{dr} = 16 \text{ m}$$

$$Cv_{gab} = 1,542 \text{ m}^2/\text{tahun}$$

$$U = 90\%$$

$$Tv = 0,848$$

Sehingga waktu konsolidasi yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi 90% yaitu :

$$t = \frac{T_v \times (H_{dr})^2}{C_v} \tag{2}$$

$$t = 140 \text{ tahun}$$

Karena waktu konsolidasi yang dibutuhkan sangat lama dan settlement yang terjadi pada tahun pertama sampai tahun ketiga lebih dari 2,5 cm per tahun, maka untuk mengantisipasi agar tidak terjadinya kerusakan pada perkerasan akibat differential settlement direncanakan pemasangan PVD.

F. Perencanaan Prefabricated Vertical Drain (PVD)

Prefabricated Vertical Drain (PVD) merupakan salah satu material yang dapat mempercepat waktu penurunan tanah dimana tanah lempung lunak memiliki permeabilitas yang rendah sehingga membutuhkan waktu yang lama untuk menyelesaikan waktu konsolidasi. Selain itu, keuntungan pemasangan PVD dapat meningkatkan stabilitas tanah dasar akibat peningkatan daya dukung tanah (Cu), sehingga kemungkinan terjadi kelongsoran timbunan akan menjadi lebih kecil. Perencanaan ini PVD dipasang sesuai kedalaman rencana dengan pola pemasangan segiempat. Dimensi PVD yang dipakai adalah lebar (a) 100 mm dan tebal (b) 3,5 mm, Sebagai contoh perhitungan perencanaan PVD pola segiempat sebagai berikut:

- Jarak (S) = 1000 mm

Tabel 6.  
Faktor Hambatan F(n) Pola Segiempat

Jarak PVD	D	a	b	Dw	n	F(n)
S (m)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
0.60	678	100	3.5	65.89	10.29	1.594
0.70	791	100	3.5	65.89	12.00	1.746
0.80	904	100	3.5	65.89	13.72	1.877
0.90	1017	100	3.5	65.89	15.43	1.994
1.00	1130	100	3.5	65.89	17.15	2.098
1.10	1243	100	3.5	65.89	18.86	2.193
1.20	1356	100	3.5	65.89	20.58	2.279
1.30	1469	100	3.5	65.89	22.29	2.359
1.40	1582	100	3.5	65.89	24.01	2.432
1.50	1695	100	3.5	65.89	25.72	2.501
1.60	1808	100	3.5	65.89	27.44	2.565
1.70	1921	100	3.5	65.89	29.15	2.625
1.80	2034	100	3.5	65.89	30.87	2.682

Tabel 7.  
Derajat Konsolidasi (U-Gab) Pola Segiempat

S (m)	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40
t D (m)	0.904	1.017	1.130	1.243	1.356	1.469	1.582
F(n)	1.877	1.994	2.098	2.193	2.279	2.359	2.432
1	22.45%	17.65%	14.27%	11.83%	10.02%	8.64%	7.58%
2	39.16%	31.40%	25.66%	21.37%	18.10%	15.58%	13.60%
3	52.18%	42.75%	35.42%	29.74%	25.32%	21.84%	19.08%
4	62.38%	52.17%	43.84%	37.16%	31.83%	27.57%	24.14%
5	70.39%	60.02%	51.13%	43.76%	37.74%	32.84%	28.83%
6	76.68%	66.57%	57.46%	49.65%	43.11%	37.69%	33.21%
7	81.63%	72.03%	62.95%	54.90%	48.00%	42.18%	37.30%
8	85.52%	76.60%	67.73%	59.60%	52.46%	46.33%	41.12%
9	88.59%	80.41%	71.88%	63.80%	56.53%	50.17%	44.69%
10	91.00%	83.60%	75.50%	67.55%	60.24%	53.73%	48.04%
11	92.91%	86.27%	78.65%	70.92%	63.62%	57.02%	51.18%
12	94.41%	88.51%	81.39%	73.93%	66.72%	60.08%	54.12%
13	95.59%	90.37%	83.77%	76.62%	69.55%	62.91%	56.89%
14	96.52%	91.94%	85.85%	79.04%	72.13%	65.54%	59.48%
15	97.26%	93.25%	87.66%	81.20%	74.50%	67.98%	61.91%
16	97.84%	94.34%	89.24%	83.14%	76.66%	70.25%	64.19%
17	98.29%	95.26%	90.62%	84.88%	78.63%	72.35%	66.33%
18	98.65%	96.03%	91.82%	86.44%	80.44%	74.30%	68.35%
19	98.94%	96.67%	92.86%	87.83%	82.09%	76.11%	70.24%
20	99.16%	97.21%	93.78%	89.09%	83.61%	77.80%	72.01%
21	99.34%	97.66%	94.57%	90.21%	84.99%	79.36%	73.68%
22	99.48%	98.04%	95.26%	91.22%	86.26%	80.82%	75.25%
23	99.59%	98.36%	95.87%	92.12%	87.42%	82.17%	76.72%
24	99.67%	98.63%	96.40%	92.93%	88.48%	83.42%	78.11%

- Pola = Segiempat, maka (D = 1,13 S)
- D = 1,13 × 1000 mm = 1130 mm

$$Dw = \frac{2(100+3,5)}{\pi} = 65,89 \text{ mm}$$

$$n = \frac{1130}{65,89} = 17,15$$

$$F(n) = \left( \frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \cdot \left[ \ln(n) - \left( \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \right) \right]$$

$$= \left( \frac{17,15^2}{17,15^2 - 1} \right) \cdot \left[ \ln(17,15) - \left( \frac{3 \times (17,15)^2 - 1}{4 \times (17,15)^2} \right) \right]$$

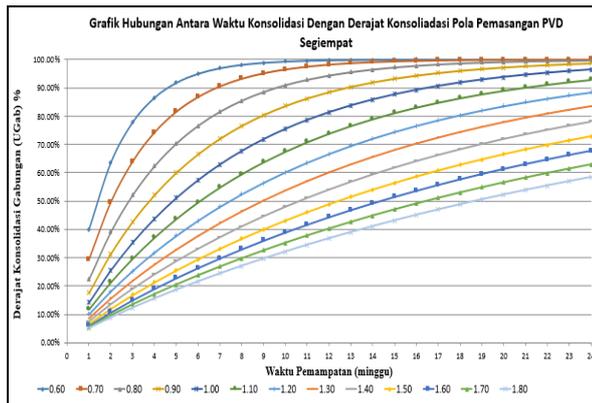
$$= 2,098$$

Perhitungan derajat konsolidasi arah horizontal dan vertikal direncanakan untuk zona A dengan kedalaman tanah yang compressible 16 m dengan jarak antar PVD (S) = 1,00 m dan pola pemasangan segiempat. Untuk rekapitulasi perhitungan derajat konsolidasi untuk masing-masing jarak dapat ditunjukkan pada Tabel 7.

Pada perencanaan PVD dengan pola segiempat dengan jarak 0.60 m, 0.70 m, 0.80 m, 0.90 m, 1.00 m, 1.10 m, 1.20 m, 1.30 m, 1.40 m, 1.50 m, 1.60 m, 1.70 m dan 1.80 m dicari derajat konsolidasi lebih ≥ 90 % dapat ditunjukkan

Tabel 8.  
Rekapitulasi Pemasangan PVD

Zona	Kedalaman Tanah Lunak (m)	Tinggi Timbunan (m)	Kedalaman PVD Terpasang (m)	Pola Pemasangan PVD	Jarak PVD (m)
Zona A	16,00	4,72	10,00	Segiempat	1,0
Zona B	16,00	5,49	10,00	Segiempat	1,0
Zona C	15,00	6,22	10,00	Segiempat	1,0
Zona D	11,00	7,36	10,00	Segiempat	1,0
Zona E	7,00	8,27	7,00	Segiempat	1,0



Gambar 5. Derajat Konsolidasi (U-Gab) Pola Segiempat

pada grafik seperti pada Gambar 5. Untuk rekapitulasi perhitungan kebutuhan PVD yang direncanakan dapat ditunjukkan pada Tabel 8.

G. Perkuatan Dengan Cerucuk

Metode perkuatan menggunakan cerucuk adalah salah satu cara stabilisasi tanah dengan cara memasukkan *micropile* ke dalam tanah dasar. Salah satu tujuan penggunaan cerucuk yaitu menahan kelongsoran pada tanah timbunan bersama dengan tanah dasar di bawahnya.

Untuk perkuatan menggunakan cerucuk, akan dilakukan satu contoh perhitungan pada Zona A. Cerucuk hanya akan dipasang sepanjang bidang longsor di luar timbunan, karena kondisi dilapangan sudah ada tinggi timbunan 3,50 meter. Dalam perencanaan cerucuk dibutuhkan beberapa kali percobaan untuk mendapatkan nilai SF dengan menggunakan program bantu Geo 5, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 9. Dasar pemilihan nilai SF yang digunakan sebagai penentuan dalam perencanaan ini yaitu nilai SF yang mempunyai jumlah kebutuhan cerucuk yang paling banyak. Untuk menentukan kedalaman pemasangan cerucuk didasarkan pada kedalaman bidang longsor yang didapat dari percobaan yang menghasilkan nilai SF 1,50.

Cerucuk yang digunakan dalam perencanaan ini menggunakan produk dari PT. Wika Beton jenis *Prestressed concrete spun piles* dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Mutu :  $f_c' = 52 \text{ mPa}$
- Kelas tiang : C
- Diameter : 0,35 m
- Inersia (I) : 62162,74 cm<sup>4</sup>
- Momen *crack* : 6,0 ton.m

Tabel 9.  
Hasil *running* Geo 5

No	SF Ext (Bishop)	Circle Centre		Momen	
		x (m)	y (m)	R (m)	Rest (kN.m)
1	0.94	30.54	26.82	12.93	6874.88
2	0.98	30.24	29.66	19.15	16097.85
3	0.99	30.79	29.74	16.89	11861.94
4	1.01	31.45	29.46	18.11	14678.35
5	1.02	29.86	27.24	19.27	17298.95
6	1.09	30.20	28.93	21.17	22347.38
7	1.22	28.64	29.87	22.21	27620.69
8	1.54	28.08	30.59	23.77	39657.98

Tabel 10.  
Rekapitulasi Perhitungan Cerucuk

Zona	Kedalaman Cerucuk (m)	Jumlah Cerucuk (buah)	Jarak Antar Cerucuk (m)	Tinggi Timbunan (m)
A	13	13	1,60	4,72
B	14	18	1,50	5,49
C	14	23	1,30	6,22
D	12	23	1,00	7,36
E	9	22	0,90	8,27

Hasil dari analisa Geo5 yang digunakan sebagai contoh perhitungan,

- SF min = 0,98
- Mres min = 16097.85 kNm
- Jari – jari = 19,15 m
- SF rencana = 1,5
- Panjang bidang longsor = 13,25 m (diluar timbunan)

$$P = \frac{M_{u.crack}}{F_m \times T} = \frac{60 \text{ kN.m}}{(0,94 \times 1,798 \text{ m})} = 35,493 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah cerucuk yang dibutuhkan} \\ M \text{ dorong} &= \frac{M_{R \text{ min}}}{SF \text{ min}} \\ &= \frac{16097.85 \text{ kNm}}{0,98} \\ &= 16426,4 \text{ kn.m} \end{aligned}$$

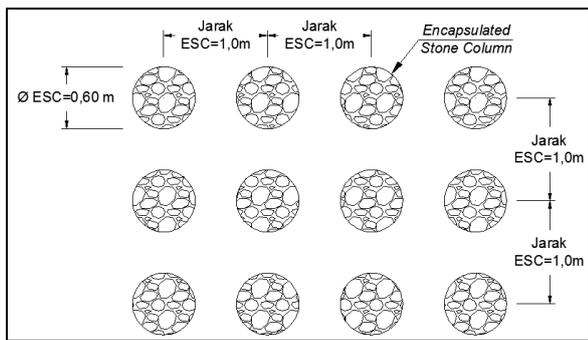
$$\begin{aligned} \text{Jumlah cerucuk} &= \left( \frac{SF \text{ rencana} - SF \text{ min}}{P \times R} \right) \times MD \\ &= \left( \frac{1,5 - 0,98}{35,493 \times 19,15} \right) \times 16426,4 \\ &= 13 \text{ buah} \end{aligned}$$

Maka, cerucuk akan dipasang sepanjang bidang longsor diluar timbunan dengan kedalaman 13 meter dan jarak 1,60 meter dengan jumlah kebutuhan cerucuk yaitu 13 buah. Rekapitulasi jumlah kebutuhan cerucuk pada masing-masing zona dapat ditunjukkan pada Tabel 10.

H. Perkuatan Dengan *Encapsulated Stone Column* (ESC)

Alternatif perkuatan timbunan selanjutnya yang ditawarkan dalam perencanaan ini adalah *Encapsulated Stone Column*. *Encapsulated stone column* adalah kolom agregat yang dipadatkan dengan cara digetarkan dengan menggunakan *vibro cat* dan di selimuti dengan menggunakan *geotextile*.

Pola pemasangan *encapsulated stone column* direncanakan menggunakan pola segiempat dengan jarak antar *encapsulated stone column* 1,0 m dengan diameter



Gambar 6. Pola pemasangan *encapsulated stone column* (ESC)

Tabel 11.

Rekapitulasi Perhitungan *Encapsulated stone column*

Zona	Kedalaman ESC (m)	Jumlah ESC (buah)	Pola Pemasangan ESC	Jarak Antar ESC (m)	Tinggi Timbunan (m)
A	13	7	Segiempat	1,00	4,72
B	14	8	Segiempat	1,00	5,49
C	14	10	Segiempat	1,00	6,22
D	13	9	Segiempat	1,00	7,36
E	9	9	Segiempat	1,00	8,27

0,60 m. *Encapsulated stone column* (ESC) harus memotong bidang longsor yang memiliki  $\Delta Mr$  terbesar dan kedalaman pemasangan ESC sampai menyentuh bidang longsor SF 1,50, pada kasus ini *encapsulated stone column* terpasang sampai kedalaman 13 m. Pola pemasangan *encapsulated stone column* (ESC) dapat ditunjukkan pada Gambar 6.

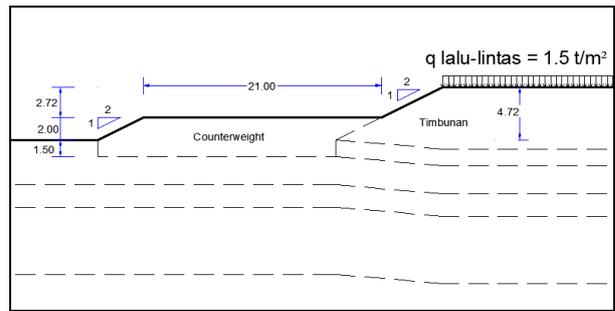
Untuk rekapitulasi jumlah kebutuhan *Encapsulated stone column* dari hasil perencanaan pada masing-masing zona dapat ditunjukkan pada Tabel 11.

I. Perkuatan Dengan *Counterweight*

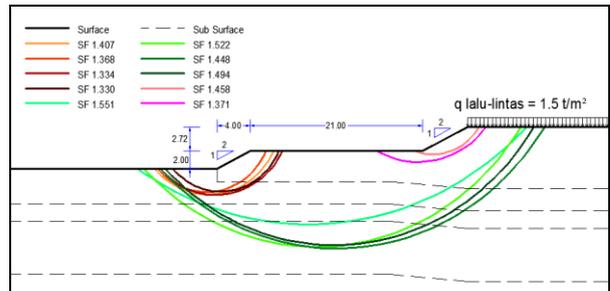
Alternatif perkuatan ketiga yang ditawarkan dalam perencanaan ini adalah *counterweight*. *Counterweight* merupakan suatu metode perkuatan timbunan dengan menambahkan sebuah massa tertentu di belakang timbunan sehingga dapat menambah tekanan pasif terhadap timbunan. Semakin besar gaya yang menahan sehingga dapat memperkecil kemungkinan terjadinya kelongsoran. Sehingga dibutuhkan lahan yang luas pada lokasi area timbunan. Perencanaan *counterweight* ini dengan asumsi bahwa lahan disekitar lokasi akan dibebaskan apabila ROW Jalan Tol Batang Semarang Seksi 2 masih kurang, mengingat timbunan berada pada area persawahan warga.

Dimensi *counterweight* untuk zona A dengan tinggi timbunan 4,72 m dicoba seperti pada Gambar 7. Untuk mendapatkan dimensi yang optimum dan SF yang aman maka dilakukan metode *trial and error* jumlah slope, lebar dan tinggi timbunan *counterweight*.

Dalam menganalisa kestabilan tanah timbunan *counterweight* dilakukan dengan program bantu Xstabl dan dilakukan beberapa kali percobaan dengan mengubah initiation dan termination. Dimensi *counterweight* diatas di analisa dengan beban lalu lintas sebesar 15 kN/m<sup>2</sup> sehingga didapatkan nilai keamanan sebesar 1,494. Untuk hasil output analisa Xstabl berupa nilai SF beberapa kali percobaan dapat ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 7. Dimensi rencana *counterweight* untuk zona A



Gambar 8. Stabilitas *counterweight* Zona A

Tabel 12.

Rekapitulasi Dimensi *Counterweight*

Zona	Tinggi Timbunan (m)	Kedalaman Soft Soil (m)	Lebar Counterweight (m)	Jumlah Slope (buah)	Nilai Slope
A	4,72	16	25	2	1:2
B	5,49	16	36	3	1:2
C	6,22	15	41	3	1:2
D	7,36	11	48	3	1:2
E	8,27	7	35	3	1:2

Dari hasil *trial and error* dimensi *counterweight* pada Zona A yang ideal untuk digunakan adalah lebar 25 meter dan jumlah 2 slope dengan perbandingan 1:2. Untuk rekapitulasi dimensi timbunan *counterweight* ditunjukkan pada Tabel 12.

J. Perhitungan Waktu Pelaksanaan

Untuk menghitung kapasitas produksi perhari, maka jumlah jam kerja perhari harus ditetapkan terlebih dahulu. Jam kerja efektif adalah jumlah jam kerja dalam satu hari, untuk perhitungan perencanaan ini jam kerja yang dipakai yaitu sesuai pada jam kerja Proyek Pembangunan Jalan Tol Batang-Semarang Seksi 2 yaitu mulai pukul 08.00 s.d 12.00 dan 13.00 s.d 17.00 atau 8 jam perhari, sedangkan *overtime* dianggap tidak ada, karena perhitungan memakai jam kerja normal.

Untuk rekapitulasi waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan tiap alternatif pekerjaan dapat ditunjukkan pada Tabel 13.

K. Perhitungan Biaya Material

Perhitungan biaya material perkuatan tanah dalam perencanaan ini hanya dilakukan perhitungan terhadap biaya material saja, tidak memperhitungkan biaya pekerja, alat dan

Tabel 13.  
Rekapitulasi Waktu Pelaksanaan Tiap Alternatif Perkuatan

No	Alternatif	Volume	Satuan	Waktu (hari)
1	Pemasangan PVD	386625	m'	40
2	Cerucuk	392000	m'	73
3	Stone Column	176800	m'	198
4	Counterweight	259423	m <sup>3</sup>	87

Tabel 14.  
Biaya Material Tiap Alternatif Perkuatan

No	Alternatif Perkuatan	Biaya Material
1	PVD + Cerucuk	Rp. 112 milyar
2	PVD + Stone Column	Rp. 22 milyar
3	PVD + Counterweight	Rp. 51 milyar

PPN 10%. Sehingga biaya yang dibutuhkan untuk masing-masing alternatif dapat ditunjukkan pada Tabel 14.

#### L. Pemilihan Alternatif Perkuatan

Dari hasil analisa biaya material, didapatkan alternatif perkuatan yang termurah adalah *encapsulated stone column* (ESC) sebesar Rp. 22 milyar. Tetapi dari hasil analisa waktu pelaksanaan, alternatif perkuatan tersebut membutuhkan waktu yang sangat lama yaitu 198 hari.

Alternatif perkuatan dengan biaya material termurah kedua adalah perkuatan menggunakan *counterweight* dengan total biaya material sebesar Rp. 51 milyar. Dari hasil analisa waktu pelaksanaan, alternatif perkuatan timbunan menggunakan *counterweight* memiliki waktu yang lebih cepat dibandingkan dengan menggunakan *encapsulated stone column* (ESC). Waktu yang dibutuhkan perkuatan tersebut yaitu 87 hari. Tetapi alternatif ini membutuhkan lahan yang sangat luas, sehingga harus ada pembebasan lahan untuk sisi kiri dan sisi kanan timbunan. Luas lahan yang harus di bebaskan yaitu mencapai 57.400 m<sup>2</sup>. Harga pembebasan lahan area persawahan di Kabupaten Batang mencapai Rp. 700.000,00 setiap m<sup>2</sup>. Sehingga biaya untuk pembebasan lahan bisa mencapai Rp. 40 milyar. Selain itu proses untuk pembebasan lahan juga akan membutuhkan yang lama untuk proses pembayaran dan negosiasi.

Alternatif perkuatan dengan biaya material termahal adalah cerucuk yaitu sebesar Rp. 112 milyar. Tetapi dari hasil analisa waktu pelaksanaan, alternatif tersebut membutuhkan waktu yang paling cepat yaitu 73 hari.

Dari uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa pemilihan alternatif perkuatan timbunan yang akan digunakan yaitu cerucuk meskipun alternatif tersebut memiliki biaya material yang paling mahal. Hal ini disebabkan waktu pelaksanaannya yang paling cepat. Mengingat sisa kontrak tinggal 9 bulan (berakhir bulan agustus 2018), dan ruas jalan tol tersebut harus dapat beroperasi untuk melayani arus mudik tahun 2018. Dengan demikian sisa waktu efektif yang bisa digunakan untuk pelaksanaan konstruksinya hanya tinggal 7 bulan.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

Dari hasil analisis kondisi eksisting dan hasil perhitungan perencanaan perkuatan terhadap stabilitas timbunan, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Kelongsoran terjadi karena stabilitas timbunan yang direncanakan belum cukup aman mengingat nilai *safety factor* setelah di cek ulang ternyata masih kurang dari 1,0. Hal ini mungkin terjadi karena pendekatan korelasi antara parameter tanah yang dipakai untuk perencanaan yang didasarkan pada data pengujian sondir kurang teliti.
2. Besar *settlement* yang sudah terjadi saat longsor (selama 6 bulan) yaitu 4,9 cm untuk zona A dan zona B, 5,0 cm untuk zona C, 5,8 cm untuk zona D, dan 6,7 cm untuk zona E.
3. Perkuatan untuk menjaga stabilitas tanah timbunan dilakukan dengan menggunakan cerucuk, *Encapsulated Stone Column* (ESC) dan *Counterweight* dimana untuk masing-masing perkuatan direncanakan dengan *safety factor* 1,5.
  - Alternatif perkuatan menggunakan cerucuk; cerucuk dipasang di luar kaki timbunan (masih dalam bidang longsor) sampai kedalaman pemasangan yaitu 13,0 meter untuk zona A, 14,0 meter untuk zona B dan zona C, 12,0 meter untuk zona D, dan 9,0 meter untuk zona E.
  - Alternatif perkuatan menggunakan *Encapsulated Stone Column* (ESC); ESC direncanakan menggunakan pola segiempat dengan jarak antar ESC yaitu 1,0 meter. Kekuatan *geotextile* pembungkus *stone column* mempunyai kuat tarik 200 kN/m. *Encapsulated Stone Column* (ESC) dipasang sampai kedalaman 13,0 meter untuk zona A dan zona D, 14,0 meter untuk zona B dan zona C, dan 9,0 meter untuk zona E.
  - Alternatif perkuatan menggunakan *counterweight*; *counterweight* direncanakan menggunakan 2 slope untuk zona A, 3 slope untuk zona B, zona C, zona D, dan zona E dengan nilai slope 1 : 2.
4. Alternatif perkuatan yang dipilih adalah **cerucuk** dengan biaya Rp. 112 milyar; pemilihan didasarkan pada sisa waktu pelaksanaan proyek yang efektif tinggal 7 bulan.

### B. Saran

Setelah dilakukan perhitungan dan analisis, penulis memberikan saran yaitu untuk menganalisis penyebab kelongsoran dan perencanaan stabilitas timbunan jalan tol pada tanah lunak, sebaiknya data tanah yang diambil lebih banyak lagi dan dilengkapi dengan tes laboratorium.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Proyek Pembangunan Jalan Tol Batang-Semarang Seksi 2 yang dikerjakan oleh PT. Waskita Karya (Persero) Tbk selaku kontraktor utama yang telah memberi bantuan dan informasi data.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT. Waskita Karya (Persero) Tbk., "Leaflet Progress Oktober 2017," 2017.
- [2] B. G. Look, *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London: Taylor & Francis Group, 2007.
- [3] P. K. Robertson, *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*, 6th ed. California: Gregg Drilling & Testing, Inc., 2015.
- [4] J. Biarez, *Correlations De Parametres En Mecanique Des Sols*. Paris: Ecole Centrale Des Arts Et Manufactures, 1976.
- [5] J. E. Bowles, *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*, 2nd ed. Jakarta: Erlangga, 1993.

