

Alternatif Perencanaan Timbunan dan Perbaikan Tanah Dasar pada Jalan Tol Krian-Legundi-Bunder-Manyar (STA 12+434 s/d STA 12+684)

Alam Maulana, Noor Endah Mochtar, dan Putu Tantri Kumalasari
Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: noor_endah@ce.its.ac.id; tantri@ce.its.ac.id.

Abstrak—Jawa Timur merupakan salah satu provinsi terbesar di Indonesia. Hal ini ditunjukkan dengan laju pertumbuhan ekonomi Provinsi Jawa Timur pada triwulan III 2017 mencapai 5,21%. Hal ini tidak terlepas dari dua kota industri penting di Jawa Timur yakni Sidoarjo dan Gresik. Laju pertumbuhan ekonomi yang besar mengakibatkan kedua kota tersebut perlu akses jalan yang cepat dan saling terintegrasi. Pemerintah sudah merencanakan tol Krian-Legundi-Bunder-Manyar (KLBM) sepanjang 38,29 km sebagai solusi untuk mengurangi kemacetan serta mempermudah akses kedua kawasan industri tersebut. Pada seksi II pengerjaan tol tersebut, tepatnya pada STA 12+434 s/d STA 12+684 akan dibangun jembatan yang melewati jalan raya yang menghubungkan Desa Katimoho barat dengan timur. Pada awalnya oprit jembatan direncanakan menggunakan pile slab dikarenakan kedalaman tanah lunak yang mencapai 14 meter. Tanah lunak yang relatif dalam dikhawatirkan akan mengakibatkan penurunan tidak seragam yang besar dan dapat mengganggu pengerjaan proyek jalan tol KLBM ini. Namun penggunaan pile slab dirasa kurang efektif mengingat harganya yang sangat mahal. Oleh sebab itu perlu direncanakan alternatif timbunan yang murah, aman terhadap longsor, dan penurunan tidak seragam yang dapat dikendalikan. Pada penulisan studi ini akan memodifikasi desain awal oprit jembatan yang awalnya dengan konstruksi pile slab, dirubah menjadi timbunan tanah atau EPS geofom. Pemilihan material timbunan tanah ditinjau dari segi ekonomi dan ketersediaan material dilapangan. Untuk mengendalikan penurunan yang terjadi pada tanah dasar, maka pada timbunan tanah digunakan prefabricated vertical drain (PVD) untuk mempercepat penurunan yang terjadi. Dalam perencanaan timbunan tanah juga akan digunakan perkuatan berupa geotextile dan encapsulated stone column (ESC). Hasil dari perencanaan dan perhitungan biaya didapatkan alternatif yang paling efisien adalah menggunakan timbunan tanah dengan pemasangan PVD pola segitiga jarak 1,1 meter dan perkuatan timbunan berupa geotextile dengan kuat tarik 120 kN. Harga yang diperlukan untuk alternatif timbunan dan perbaikan tanah dasar tersebut sebesar 12,088 milyar rupiah.

Kata Kunci—*Pile Slab*, *EPS Geofom*, *PVD*, *Geotextile*, *Encapsulated Stone Column*.

I. PENDAHULUAN

JAWA Timur merupakan salah satu provinsi terbesar di Indonesia. Hal ini ditunjukkan dengan laju pertumbuhan ekonomi Provinsi Jawa Timur pada triwulan III 2017 mencapai 5,21%. Besar laku ekonomi tersebut tidak terlepas dari dua kota besar industri yakni Gresik dan Sidoarjo yang menjadi penyumbang terbesar pendapatan Provinsi Jawa Timur. Besarnya laju ekonomi pada dua daerah tersebut

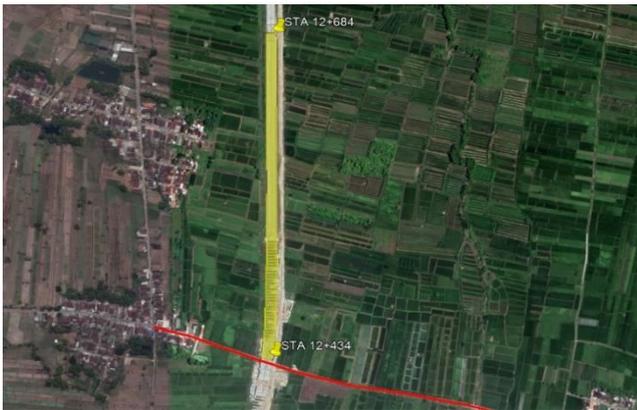
mendorong pemerintah Provinsi Jawa Timur untuk mengembangkan jalan tol agar kawasan industri yang teletak di daerah Sidoarjo dan Gresik dapat saling terintegrasi. Pemerintah telah merencanakan tol Krian-Legundi-Bunder-Manyar (KLBM) sepanjang 38,29 km sebagai solusi untuk mengurangi kemacetan serta mempermudah akses kedua kawasan industri tersebut.

Pembangunan jalan tol pada STA 12+434 s/d STA 12+684 (Gambar 1) terdapat oprit jembatan yang awalnya direncanakan menggunakan timbunan tanah, namun terjadi kendala yakni kedalaman tanah lunak pada lokasi timbunan yang cenderung dalam. Kedalaman tanah lunak dengan nilai NSPT 10 terdapat pada kedalaman 14 meter di bawah permukaan tanah dengan konfigurasi tanah berupa tanah lanau kelempungan sampai dengan kedalaman 50 meter, kondisi muka air tanah pada saat bulan april terdapat pada kedalaman -7 meter dibawah permukaan tanah. kondisi tanah tersebut menyebabkan permasalahan jika digunakan oprit bermaterial timbunan tanah. Masalah-masalah yang muncul akibat kedalaman tanah lunak yang relatif dalam adalah waktu konsolidasi yang sangat lama dan daya dukung tanah lunak yang rendah. Waktu konsolidasi tanah yang lama ini akan menyebabkan tanah tidak termampatkan secara maksimal dalam waktu rencana proyek, hal ini dikarenakan pemampatan yang terjadi pada tanah lunak berlempung bisa terjadi selama bertahun-tahun. Daya dukung pada tanah lunak tidak terlalu baik untuk menahan beban timbunan tanah yang ada di atasnya, dengan daya dukung yang rendah, timbunan rawan terhadap kelongsoran dan akibat pemampatan yang besar menyebabkan penurunan tidak seragam (*differential settlement*).

Berdasarkan permasalahan yang ada, kontraktor pelaksana mengajukan revisi desain dengan menggunakan *pile slab*. Penggunaan *Pile Slab* tersebut direncanakan pada STA 12+143 sampai dengan STA 12+328 kemudian dilanjutkan STA 12+434 sampai dengan STA 12+684 dengan ketinggian *Pile Slab* tertinggi adalah 8,7 m. Penggunaan *Pile Slab* tersebut bertujuan untuk mengurangi resiko pemampatan yang besar dan kelongsoran akibat daya dukung tanah yang rendah. Dalam hal ini pihak kontraktor pelaksana merasa penggunaan *Pile Slab* dirasa tepat menggantikan timbunan tanah untuk mempersingkat waktu penyelesaian permasalahan yang akan timbul.

Mengingat penggunaan *pile slab* akan membutuhkan biaya konstruksi yang sangat mahal, maka perlu direncanakan kembali alternatif oprit tersebut menggunakan material yang lebih murah, namun tetap aman terhadap kemungkinan

kelongsoran dan *differential settlement*. Oleh sebab itu, dalam studi ini akan direncanakan timbunan menggunakan material tanah dan EPS *geofoam* sebagai alternatif perencanaan oprit pada STA 12+434 s/d STA 12+684.



Gambar 1. Lokasi Alternatif Perencanaan Oprit pada Tol KLB.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Studi Literatur

Studi literatur dalam sebuah perencanaan bertujuan mengumpulkan referensi yang diperlukan untuk mendapatkan gambaran yang menyeluruh tentang teori-teori yang akan digunakan dalam pengerjaan studi.

B. Pengumpulan Data Sekunder

Data-data yang dipakai dalam perencanaan ini adalah data sekunder yang didapatkan dari instansi terkait. Beberapa data yang diperlukan dalam proses perhitungan antara lain:

1. *Layout* area lokasi.
2. Data Borlog dan Sondir.
3. Hasil tes laboratorium parameter-parameter tanah.

C. Perencanaan Timbunan Tanah dan *Geofoam*

Perencanaan alternatif oprit pada studi ini akan digunakan dua material yaitu tanah dan EPS *geofoam*. EPS *geofoam* dipilih karena material yang sangat ringan dengan densitas antara 10-100 kg/m³, hal ini menyebabkan kemungkinan pemampatan pada tanah lunak dengan menggunakan material ini akan sangat kecil. Material tanah dipilih karena sumber daya yang mudah didapatkan, namun dengan berat jenis yang relatif tinggi, kemungkinan terjadi *differential settlement* akan besar. Untuk mengetahui besar pemampatan yang terjadi, perlu dianalisa akibat beban timbunan untuk masing-masing material tersebut.

D. Perencanaan Perbaikan Tanah Metode *Preloading*

Tahapan untuk perbaikan tanah dasar dengan metode *preloading* adalah sebagai berikut:

1. Perhitungan $H_{initial}$ dan H_{final} untuk masing-masing jenis timbunan.
2. Perhitungan besar dan lama waktu pemampatan.
3. Perencanaan *prefabricated vertical drain* untuk mempercepat waktu pemampatan.
4. Perhitungan peningkatan daya dukung tanah dasar.

E. Analisa Kestabilan Timbunan

Analisa kestabilan timbunan pada perencanaan oprit jembatan pada tol KLB ini menggunakan program bantu Geo5. Apabila hasil analisis *safety factor* kurang dari *safety factor* rencana, maka timbunan tersebut tidak aman dan

memerlukan perkuatan. Perkuatan yang digunakan untuk timbunan tanah *geotextile* dan *encapsulated stone column*, sedangkan perkuatan untuk timbunan EPS *geofoam* adalah *anchor*, *metal connector*, dan *geogrid*.

F. Perhitungan Volume dan Biaya Material

Setelah didapatkan hasil dari perhitungan kebutuhan material pada perbaikan tanah dasar dan perkuatan tanah timbunan, maka dapat dihitung total volume material yang dibutuhkan untuk masing-masing perbaikan dan perkuatan. Dari hasil perhitungan volume material tersebut akan didapatkan biaya total material yang dibutuhkan untuk masing-masing alternatif perencanaan timbunan.

G. Pemilihan Alternatif Timbunan

Setelah didapatkan total kebutuhan biaya untuk alternatif timbunan tanah dan alternatif timbunan EPS *geofoam*, selanjutnya adalah pemilihan alternatif timbunan yang digunakan untuk oprit pada tol KLB pada STA 12+434 sampai STA 12+684. Pemilihan alternatif timbunan berdasarkan efektifitas dari segi biaya material.

H. Kesimpulan

Selesaiannya dilakukan proses analisa perhitungan mulai dari tahap perencanaan hingga tahap perhitungan biaya, maka dapat disimpulkan dari studi ini berisi tentang:

1. Hasil perencanaan perbaikan tanah dasar oprit serta volume dan biaya materialnya.
2. Hasil perencanaan perkuatan timbunan untuk alternatif timbunan tanah serta volume dan biaya materialnya.
3. Hasil perencanaan perkuatan timbunan untuk alternatif timbunan EPS *geofoam* serta volume dan biaya materialnya.

Hasil pemilihan alternatif yang akan dilaksanakan dari kedua alternatif timbunan oprit yang dibandingkan

III. HASIL DAN ANALISA

A. Data Tanah Dasar

Data tanah dasar yang dipakai adalah data dari *Bore log* pada lokasi jalan tol Krian-Legundi-Bunder-Manyar yang dilakukan pada tahun 2017. Data tanah yang didapat adalah berupa N-SPT dari 4 titik bor yang tersebar di STA 12+299, STA 12+345, STA 12+455, dan STA 12+496. Berdasarkan data N-SPT dari 4 titik bor tersebut, kemudian akan dicari parameter-parameter tanah dengan cara korelasi N-SPT. Korelasi yang dilakukan hanya untuk tanah yang berjenis lanau kelempungan, hal ini dikarenakan pada rencana alternatif timbunan (STA 12+434 sampai STA 12+684) tanah dasar yang dominan berjenis lanau kelempungan. Kedalaman lapisan tanah *compressible* pada perencanaan kali ini terdapat dua kedalaman berbeda, yaitu 11,5 meter untuk timbunan yang berlokasi antara STA 12+434 sampai dengan STA 12+484 dan 14 meter untuk timbunan yang berlokasi antara STA 12+484 sampai dengan STA 12+684.

B. Korelasi Nilai Parameter Tanah

Data tanah yang akan di evaluasi menggunakan metode statistik dengan rentan kepercayaan 90%, sehingga didapatkan satu data tanah yang mencakup keempat data tersebut. Bentuk umum rentan kepercayaan adalah batas bawah < (parameter tanah) < batas atas dengan menggunakan "probabilitas t" sebagai berikut:

$$\bar{x} - t \left(db: \frac{\alpha}{s} \right) \frac{s}{\sqrt{n}} < (\mu) < \bar{x} + t \left(db: \frac{\alpha}{2} \right) \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

Dimana:

- \bar{x} = rata – rata
- db = derajat kebebasan
- α = tingkat kesalahan
- s = standar deviasi
- n = jumlah data
- (μ) = nilai parameter tanah

Hasil rekapitulasi analisa statistik tiap parameter tanah dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1.

Rekapitulasi Nilai Parameter Tanah

Kedalaman (meter)	Gs (gr/cm ³)	e	Wc (%)	γ_t (t/m ³)	γ_{sat} (t/m ³)	CC
0 – 2,5	2,68	1,83	68,26	1,6	1,6	0,524
2,5 – 4,5	2,68	1,83	68,26	1,6	1,6	0,524
4,5 – 6,5	2,68	1,83	68,26	1,6	1,6	0,524
6,5 – 8,5	2,68	1,83	68,26	1,6	1,6	0,524
8,5 – 10,5	2,68	1,53	57,11	1,71	1,71	0,361
10,5 – 12,5	2,68	1,53	57,11	1,71	1,71	0,361
12,5 – 14,5	2,68	1,53	57,11	1,71	1,71	0,361
14,5 – 16,5	2,68	1,23	45,76	1,71	1,71	0,361
16,5 – 18,5	2,68	1,23	45,76	1,71	1,71	0,361
18,5 – 20,5	2,68	1,23	45,76	1,72	1,72	0,34

Tabel 1.

Rekapitulasi Nilai Parameter Tanah (Lanjutan)

Kedalaman (meter)	Cv (cm ² /dtk)	Cs	IP (%)	ϕ (°)	Cu (kg/cm ²)
0 – 2,5	0,00040	0,105	79,37	2	0,092
2,5 – 4,5	0,00040	0,105	79,37	2	0,17
4,5 – 6,5	0,00040	0,105	79,37	2	0,21
6,5 – 8,5	0,00040	0,105	79,37	2	0,22
8,5 – 10,5	0,00062	0,072	79,37	2	0,37
10,5 – 12,5	0,00062	0,072	79,37	2	0,37
12,5 – 14,5	0,00062	0,072	79,37	2	0,37
14,5 – 16,5	0,00065	0,072	79,37	2	0,45
16,5 – 18,5	0,00065	0,072	79,37	2	0,45
18,5 – 20,5	0,00065	0,072	79,37	2	0,45

C. Data Tanah Timbunan

- Jenis tanah : Pasir Batu
- γ_{sat} : 20 KN/m³
- γ_t : 20 KN/m³
- ϕ : 30°
- Cu : 0 kPa

D. Data Spesifikasi Bahan

1. PVD (*Prefabricated Vertical Drain*)
 - Tipe = GD 80
 - Tebal = 3,5 mm
 - Lebar = 100 mm
2. Geotextile
 - Produk geotextile = 120/120
 - Kuat tarik memanjang = 120 kN/m
 - Kuat tarik melintang = 120 kN/m
3. ESC (*Encapsulated Stone Column*)
 - Berat jenis kerikil = 24 kN/m³
 - Kuat geser kerikil = 40°
 - Kuat tarik geotextile = 120 kN/m
4. EPS *Geofoam*
 - Produk EPS = Geofoam 15
 - Berat jenis = 14,4 kg/m³
 - Elastisitas modulus min = 2500 kPa
 - Flexural strength min = 172 kPa
 - Panjang = 2 m
 - Lebar = 1 m

Tebal = 0,61 m

IV. HASIL PERENCANAAN ALTERNATIF TIMBUNAN TANAH

A. Perhitungan H awal dan H akhir Timbunan Tanah

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:

$$H_{awal} = \frac{q + (Sc_{timb} \times \gamma_w)}{\gamma_{timb}} \quad (2)$$

$$H_{pavement} = (H_{initial} - Sc_{timbunan} - Sc_{pavement} - H_{bongkar-traffic}) + H_{pavement} \quad (3)$$

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.

Besar pemampatan (Sc) dihitung menggunakan rumus Terzaghi (1942). Perhitungan besar pemampatan dilakukan untuk mencari tinggi timbunan awal (H awal) yang digunakan untuk mendapatkan tinggi timbunan akhir (H akhir). Pada lokasi studi terdapat dua kedalaman tanah lunak yakni 11,5 meter dan 14 meter, maka besar pemampatan yang terjadi dihitung berdasarkan kedalaman tersebut. Besar nilai H awal memperhitungkan beban timbunan, beban lalu lintas, dan beban perkerasan. Rekapitulasi dari perhitungan H awal, H akhir, dan pemampatan (Sc) dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2.

Rekapitulasi H awal, H akhir, dan Sc Timbunan Tanah

STA	Z _{tanah lunak} (m)	Tinggi Akhir (m)	Tinggi Awal (m)	Besar Pemampatan (m)
STA 12+434	11,5	8,7	9,86	1,55
STA 12+484	14	8,1	9,37	1,65
STA 12+534	14	7	8,15	1,53
STA 12+584	14	5,8	6,8	1,37
STA 12+634	14	4,5	5,31	1,17
STA 12+684	14	3,5	4,15	0,99

B. Waktu Pemampatan

Perhitungan waktu pemampatan dilakukan untuk mengetahui apakah tanah dasar perlu dilakukan perbaikan atau tidak. Apabila waktu pemampatan yang terjadi melebihi waktu perencanaan proyek, maka diperlukan cara untuk mempercepat waktu pemampatan yang terjadi. Besar pemampatan yang terjadi dapat diketahui dengan persamaan berikut:

$$t = \frac{T_v (H_{dr})^2}{C_v} \quad (4)$$

Dimana:

- T = waktu konsolidasi.
- T_v = *time factor*, bergantung dari derajat konsolidasi U (%).
- H_{dr} = Jarak keluarnya air pori dari lapisan tanah (m).
- C_v = koefisien konsolidasi akibat aliran air pori arah vertikal.

- Waktu Pemampatan untuk kedalaman tanah lunak 14 meter.

$$Cv_{gabungan} = 1,48 \text{ m}^2/\text{tahun}$$

$$U = 90\%$$

$$Tv = 0,848$$

Waktu konsolidasi yang terjadi:

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

$$t = \frac{0,848 (14 \text{ m})^2}{1,48 \text{ m}^2/\text{tahun}}$$

$$= 112 \text{ tahun}$$

- Waktu pemampatan untuk kedalaman tanah lunak 11,5 meter.

$$Cv_{gabungan} = 1,407 \text{ m}^2/\text{tahun}$$

$$U = 90\%$$

$$Tv = 0,848$$

Waktu konsolidasi yang terjadi:

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

$$t = \frac{0,848 (11,5 \text{ m})^2}{1,407 \text{ m}^2/\text{tahun}}$$

$$= 80 \text{ tahun}$$

Karena untuk mencapai pemampatan dengan derajat konsolidasi 90% sangat lama melebihi waktu rencana proyek, sehingga direncanakan perbaikan tanah menggunakan PVD.

C. Perencanaan PVD

Pemampatan yang akan dipercepat menggunakan PVD direncanakan 90% dari total pemampatan yang terjadi. Panjang pemasangan PVD direncanakan sedalam 10 meter, hal tersebut bertujuan untuk menghindari kedalaman pemasangan PVD yang berbeda (14 meter dan 11,5 meter) dan juga diharapkan dapat menghebat biaya material PVD.

Pola PVD yang digunakan adalah pola segitiga dengan jarak 1,1 meter. Sehingga nilai derajat konsolidasi total (U_{total}) dapat diketahui dengan persamaan di bawah ini dengan nilai U_{total} selama waktu perencanaan ditunjukkan oleh Tabel 3.

$$U_h = \left[1 - \left(\frac{1}{e^{\left(\frac{t \times 8 \times ch}{D^2 \times 2 \times F(n)} \right)}} \right) \right] \quad (5)$$

$$U_{total} = [1 - (1 - U_h) \cdot (1 - U_v)] \times 100\% \quad (6)$$

Dimana:

- Ch = koefisien konsolidasi tanah akibat aliran air pori arah radial = $(kh.kv) \cdot Cv$
- Kh/Kv = perbandingan antara koefisien permeabilitas tanah arah radial dan vertikal, untuk tanah lempung yang jenuh air, harga $(kh.kv)$ berkisar antara 2 – 5
- D = diameter ekivalen dari lingkaran tanah yang merupakan daerah pengaruh dari *vertical drain*
- Uv = derajat konsolidasi arah vertikal (%)
- Uh = derajat konsolidasi arah horizontal (%)

D. Peningkatan Daya Dukung Akibat Preloading

Timbunan tanah yang dilaksanakan menggunakan metode *preloading* mengalami peningkatan daya dukung sesuai dengan umur derajat konsolidasi PVD (U_{total}). Besar peningkatan daya dukung didapatkan dengan persamaan:

- Untuk $PI < 120\%$

$$Cu \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 0,0737 + (0,1899 - 0,0016.PI) \cdot \sigma_p' \quad (7)$$

- Untuk $PI > 120\%$

$$Cu \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 0,0737 + (0,0454 - 0,00004.PI) \cdot \sigma_p' \quad (8)$$

Dimana:

PI = Plasticity Index

σ_p' = penambahan tegangan total (kg/cm²)

Berdasarkan persamaan diatas, didapatkan peningkatan daya dukung untuk beberapa variasi ketinggian timbunan seperti Tabel 4.

Tabel 3.
Derajat Konsolidasi Pola Segitiga Jarak 1,1 meter

t (minggu)	Tv	Uv	Uh	U _{total} (%)
1	0,0002	0,018	0,136	15,15
2	0,0005	0,026	0,253	27,23
3	0,0007	0,031	0,355	37,48
4	0,0010	0,036	0,442	46,25
5	0,0012	0,041	0,518	53,75
6	0,0015	0,044	0,583	60,19
7	0,0018	0,048	0,640	65,73
8	0,0020	0,051	0,689	70,49
9	0,0023	0,054	0,731	74,58
10	0,0025	0,057	0,768	78,10
11	0,0028	0,060	0,799	81,13
12	0,0031	0,063	0,826	83,74
13	0,0033	0,065	0,850	85,98
14	0,0036	0,068	0,870	87,92
15	0,0038	0,070	0,888	89,59
16	0,0041	0,072	0,903	91,02
17	0,0043	0,075	0,916	92,26
18	0,0046	0,077	0,928	93,33
19	0,0049	0,079	0,938	94,25
20	0,0051	0,081	0,946	95,04
21	0,0054	0,083	0,953	95,72
22	0,0056	0,085	0,960	96,31
23	0,0059	0,087	0,965	96,82
24	0,0062	0,089	0,970	97,26

Tabel 4.
Besar Peningkatan Daya Dukung

STA	Tinggi Akhir (m)	Sebelum Peningkatan Nilai Cu	Setelah Peningkatan Nilai Cu
STA 12+434	8,7	0,63	0,78
STA 12+484	8,1	0,65	0,80
STA 12+534	7	0,67	0,82
STA 12+584	5,8	0,71	0,88
STA 12+634	4,5	0,79	0,90
STA 12+684	3,5	0,92	0,98

E. Perencanaan Perkuatan Timbunan

Besar peningkatan daya dukung yang terjadi belum mencapai nilai *safety factor* (SF) rencana yaitu 1,5. Oleh sebab itu perlu direncanakan perkuatan untuk memastikan nilai SF tersebut tercapai. Dalam perencanaan kali ini akan dibandingkan dua alternatif perkuatan yaitu *geotextile* dan *encapsulated stone column* (ESC).

1) Geotextile

Geotextile digunakan sebagai salah satu perkuatan stabilitas timbunan untuk mencegah terjadinya longsor. Perhitungan jumlah kebutuhan *geotextile* didapatkan dengan Persamaan berikut:

$$T_{allow} = T_{ult} \times \left(\frac{1}{FS_{id} \times FS_{cr} \times FS_{cd} \times FS_{bd}} \right) \quad (9)$$

$$M_{geotextile 1} = T_{allow} \times T_i \quad (10)$$

Dimana:

T_{ult} = kekuatan ultimate *geotextile*

FS_{id} = faktor keamanan akibat kerusakan pada saat pemasangan

- FS_{cr} = faktor keamanan akibat rangkai
- FS_{cd} = faktor keamanan akibat pengaruh bahan-bahan kimia
- FS_{bd} = faktor keamanan akibat pengaruh aktifitas biologi dalam tanah
- Ti = jarak *geotextile* ke titik kelongsoran

Setelah itu, perhitungan panjang *geotextile* terpasang yang dibutuhkan pada satu sisi timbunan dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$L_{total} = S_v + L_o + L_e + L_r \tag{11}$$

Dimana:

- S_v = panjang lipatan *geotextile* setebal tanah diperkuat (antara 25 – 30 cm)
- L_o = panjang penyaluran setelah S_v (biasanya diambil 1/2 dari L_e)
- L_e = panjang *geotextile* berada dibelakang bidang longsor

$$= \frac{T_{allow} \times FS}{(\tau_1 + \tau_2) \times E}$$
- τ₁ = tegangan geser antar tanah dasar dengan *geotextile*

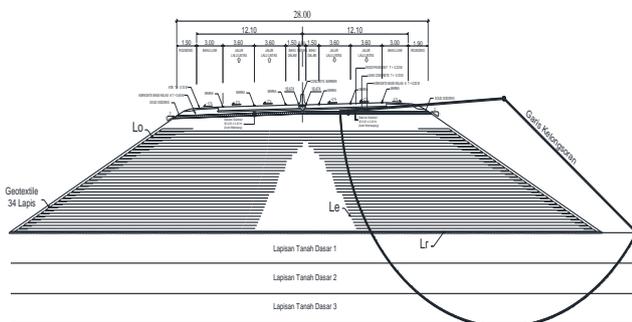
$$= (C_{u1} + \sigma_v \cdot \tan \delta_1)$$
- τ₂ = tegangan geser antar tanah timbunan dengan *geotextile*

$$= (C_{u2} + \sigma_v \cdot \tan \delta_2)$$
- E = efisiensi diambil sebesar 80%
- FS = faktor aman sesuai penggunaan *geotextile*
- L_r = panjang *geotextile* didepan bidang longsor.

Berdasarkan rumusan di atas, didapatkan hasil kebutuhan *geotextile* untuk masing-masing variasi ketinggian ditampilkan pada Tabel 5, sedangkan untuk contoh visualisasi pemasangan *geotextile* untuk tinggi akhir timbunan 8,7 meter dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 5.
Total Kebutuhan Lapis Geotextile

STA	Tinggi Akhir (m)	Total Geotextile 2 Sisi Timbunan (Lapis)
STA 12+434	8,7	34
STA 12+484	8,1	22
STA 12+534	7	13
STA 12+584	5,8	8
STA 12+634	4,5	4
STA 12+684	3,5	3



Gambar 2. Kebutuhan *Geotextile* pada Tinggi Timbunan Akhir 8,7 meter.

2) Encapsulated Stone Column (ESC)

Perencanaan *encapsulated stone column* sebagai perkuatan stabilitas timbunan menggunakan perhitungan yang sama seperti *stone column*. Fungsi *geotextile* yaitu sebagai pembungkus agar menjaga *stone column* dari keruntuhan *bulging* yang diakibatkan tanah disekitar *stone column* tidak mampu menahan tegangan vertikal yang membebani *stone*

column. Perhitungan jumlah kebutuhan *encapsulated stone column* (ESC) sebagai perkuatan dapat menggunakan Persamaan:

- Tegangan efektif *stone column* pada bidang longsor (σ_z^s)

$$\sigma_z^s = \sigma_s + \gamma'_{sc} \times Zn \tag{12}$$

Dimana:

- σ_s = tegangan yang bekerja pada ESC
- γ'_{sc} = berat volume efektif ESC
- Zn = panjang ESC yang terpotong bidang longsor
- Tegangan geser pada *stone column* (τ_z^s)

$$\tau_z^s = \sigma_N^s \times \text{tg} \phi_s + C_s \tag{13}$$

Dimana:

- σ_N^s = tegangan normal ESC pada bidang longsor.

$$= \sigma_z^s \times \cos^2 \beta$$
- β = sudut kemiringan antara garis singgung permukaan bidang longsor dengan bidang horisontal.
- φ_s = sudut geser dalam ESC
- C_s = kohesi dari ESC
- Besar gaya geser 1 *stone column* pada bidang longsor (P_z^s)

$$P_z^s = \tau_z^s \times \frac{A_s}{\cos \beta} \tag{14}$$

Dimana:

- A_s = luas penampang melintang ESC
- Tambahan momen penahan akibat adanya 1 Sc (ΔMr)

$$\Delta Mr = P_z^s \times R \tag{15}$$

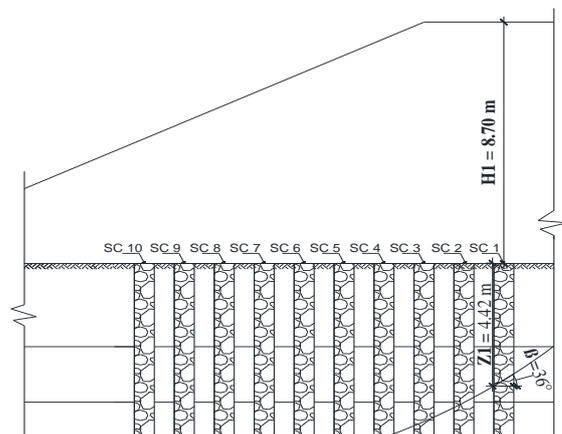
Dimana:

- R = jari-jari bidang longsor

Berdasarkan rumusan di atas, didapatkan hasil kebutuhan *encapsulated stone column* sebagai perkuatan untuk masing-masing variasi ketinggian ditampilkan pada Tabel 6 dengan kebutuhan selimut *geotextile* pada setiap *stone column* adalah 1 lapis dengan kuat tarik 120 kN/m. Sedangkan untuk contoh visualisasi pemasangan *encapsulated stone column* untuk tinggi akhir timbunan 8,7 meter dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 6.
Total Kebutuhan Encapsulated Stone Column

STA	Tinggi Akhir (m)	Kedalaman Pemasangan (m)	Jumlah ESC
STA 12+434	8,7	14	20
STA 12+484	8,1	14	18
STA 12+534	7	14	14
STA 12+584	5,8	11	12
STA 12+634	4,5	11	8
STA 12+684	3,5	11	8



Gambar 3. Kebutuhan ESC pada Tinggi Timbunan Akhir 8,7 meter.

V. HASIL PERENCANAAN ALTERNATIF TIMBUNAN EPS GEOFOAM

Bahan EPS geofom yang tidak tahan terhadap radiasi sinar ultraviolet matahari mengakibatkan penggunaannya untuk timbunan harus dilapisi material lain. Menurut manual penggunaan EPS geofom [1], cover yang disarankan adalah berupa material tanah dengan ketebalan 0,5 – 1 meter. Oleh sebab itu dalam perencanaan ini akan direncanakan timbunan EPS geofom dengan menggunakan tebal soil cover 0,5 meter dan 1 meter.

A. Perhitungan H awal dan H akhir Timbunan EPS geofom

Besar tinggi awal (H awal) dan tinggi akhir (H akhir) untuk masing-masing ketebalan soil cover ditunjukkan pada Tabel 7 dan Tabel 8. Dalam studi ini perencanaan tinggi timbunan awal (H awal) memperhitungkan beban timbunan EPS geofom, beban perkerasan, dan beban akibat ketebalan soil cover 0,5 meter dan 1 meter.

Tabel 7.

Rekapitulasi H awal, H akhir, dan Sc Soil Cover 0,5 meter

STA	Z _{tanah lunak} (m)	Tinggi Akhir (m)	Tinggi Awal (m)	Besar Pemampatan (m)
STA 12+434	11,5	8,7	8,35	0,15
STA 12+484	14	8,1	7,75	0,15
STA 12+534	14	7	6,65	0,15
STA 12+584	14	5,8	5,45	0,15
STA 12+634	14	4,5	4,14	0,14
STA 12+684	14	3,5	3,14	0,14

Tabel 8.

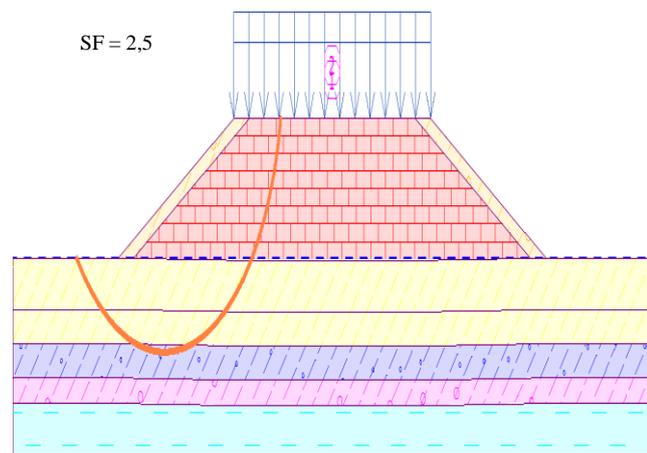
Rekapitulasi H awal, H akhir, dan Sc Soil Cover 1 meter

STA	Z _{tanah lunak} (m)	Tinggi Akhir (m)	Tinggi Awal (m)	Besar Pemampatan (m)
STA 12+434	11,5	8,7	8,42	0,22
STA 12+484	14	8,1	7,83	0,23
STA 12+534	14	7	6,72	0,22
STA 12+584	14	5,8	5,51	0,21
STA 12+634	14	4,5	4,20	0,20
STA 12+684	14	3,5	3,19	0,19

B. Stabilitas Timbunan EPS Geofom

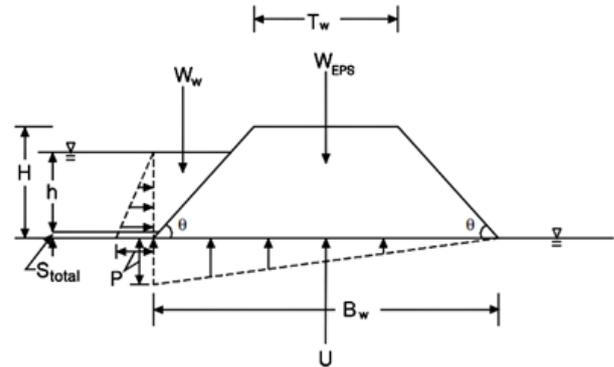
1) Overall stability

Timbunan EPS geofom perlu di cek terhadap kemungkinan kelongsoran akibat tanah dasar yang tidak mampu menahan beban di atasnya. Gambar 4 berikut menunjukkan hasil stabilitas timbunan terhadap kemungkinan overall stability dengan ketebalan soil cover 1 meter.



Gambar 4. Hasil analisis stabilitas timbunan EPS geofom untuk tinggi timbunan 8,7 meter dan ketebalan soil cover 1 meter.

- Perhitungan potensi uplift untuk muka air banjir 1 sisi



Gambar 5. Gaya uplift jika muka air pada satu sisi [1].

Berat jenis EPS geofom yang lebih kecil dibandingkan berat jenis air mengakibatkan timbunan dengan bermaterial geofom rawan terhadap gaya angkat (uplift) akibat muka air banjir di daerah timbunan tersebut. Besar beban yang dibutuhkan untuk menahan uplift akibat banjir satu sisi menggunakan persamaan:

$$Q_{req} = SF \times \left[\left(\frac{1}{2} \times \gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w \right) \right] - [(W_{EPS} + W_w)] \quad (16)$$

Dimana:

W_{EPS} = Berat EPS geofom

$$= \frac{H(T_w + B_w)}{2} \times \gamma_{EPS \text{ Dry}}$$

W_w = Berat vertikal akibat air banjir

$$= \frac{1}{2} \times (h + S_{total}) \times \left(\frac{sh}{sv} \times (h + S_{total}) \right) \times \gamma_w$$

h = tinggi timbunan

S_{total} = total pemampatan

B_w = lebar bawah timbunan

T_w = lebar timbunan atas

Stabilitas timbunan terhadap uplift dengan muka air banjir satu sisi harus memenuhi persamaan:

$$Q_{req} < (\gamma_{pavement} \times T_{pavement} \times T_w) - (\gamma_{EPS} \times T_{pavement} \times T_w) + W_{cover} \quad (17)$$

Dimana:

W_{cover} = berat soil cover rencana

$$= 2 \times \left(\gamma_{cover} \times \frac{T_{EPS}}{\sin \theta} \times \frac{T_{cover}}{\cos \theta} \right)$$

T_{pavement} = tebal perkerasan

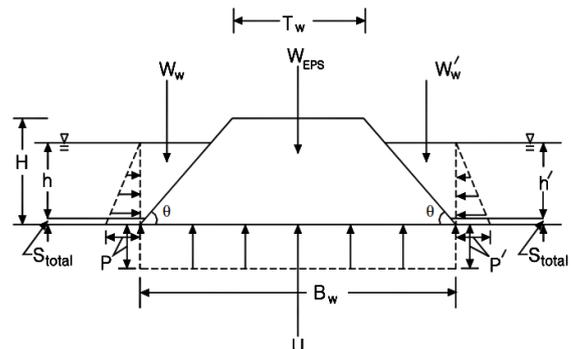
γ_{pavement} = berat jenis perkerasan

γ_{EPS} = berat jenis EPS geofom

T_{eps} = tinggi timbunan rencana

T_{cover} = tebal soil cover

- Perhitungan potensi uplift untuk muka air banjir 2 sisi



Gambar 6. Gaya uplift jika muka air pada satu sisi [1].

Selain banjir 1 sisi, potensi lainnya yang mungkin terjadi adalah banjir pada kedua sisi timbunan. Banjir pada kedua sisi timbunan ini mempunyai pengaruh gaya *uplift* yang lebih besar jika dibandingkan dengan banjir satu sisi. Besar beban yang dibutuhkan untuk menahan *uplift* akibat banjir dua sisi menggunakan persamaan:

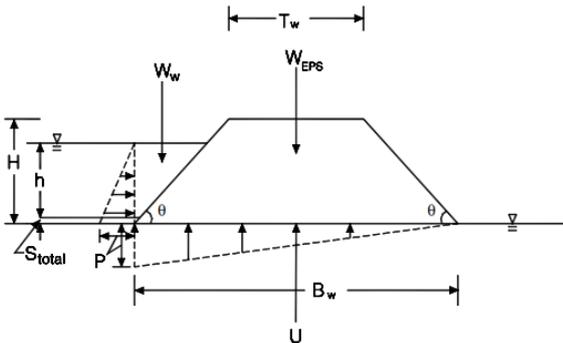
$$Q_{REQ} = SF \times [(\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w)] - [(W_{EPS} + W_w + W_w')] \quad (18)$$

Dimana:

W_w = berat vertikal akibat air banjir sisi 1

W_w' = berat vertikal akibat air banjir sisi 2

- Perhitungan potensi geser akibat muka air banjir

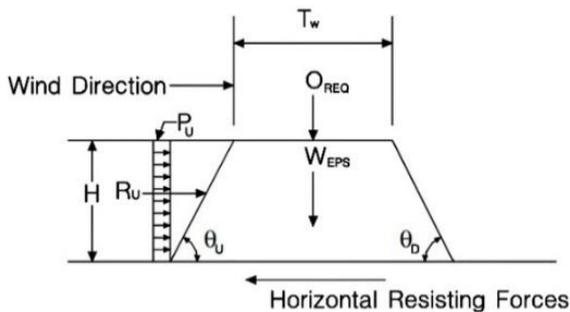


Gambar 7. Translasi akibat muka air banjir [1].

Timbunan EPS *geofoam* yang terendam banjir juga memiliki potensi geser. Hal ini dikarenakan banjir pada salah satu sisi timbunan akan menekan timbunan EPS *geofoam* yang cenderung lebih ringan. Besar beban yang dibutuhkan untuk menahan gaya geser akibat banjir menggunakan persamaan:

$$Q_{REQ} = \frac{SF \times (\frac{1}{2}) \times (\gamma_w \times (h + S_{total})^2)}{\tan \delta} + (\frac{1}{2} (h + S_{total}) \times \gamma_w \times (B_w)) - W_{EPS} - W_{water} \quad (19)$$

- Perhitungan potensi geser akibat angin



Gambar 8. Translasi akibat angin [1].

Timbunan EPS *geofoam* juga memiliki potensi geser akibat angin yang bekerja pada timbunan. Hal ini selain disebabkan oleh berat jenis EPS *geofoam* yang ringan, namun juga disebabkan oleh tinggi timbunan EPS *geofoam* itu sendiri. Semakin tinggi timbunan, maka semakin besar pula gaya angin yang bekerja. Besar beban yang dibutuhkan untuk menahan gaya geser akibat angin menggunakan persamaan:

$$Q_{req} = \frac{SF \times (R_u)}{\tan \delta} - W_{EPS} \quad (20)$$

Dimana:

R_u = Gaya angin pada timbunan

= $P_u \times H_{timbunan}$

P_u = $0,75 V^2 \sin \theta_U$

θ_U = sudut timbunan arah P_u

V = kecepatan angin yang bekerja pada timbunan (m/dt)

δ = sudut geser dalam (EPS dengan tanah)

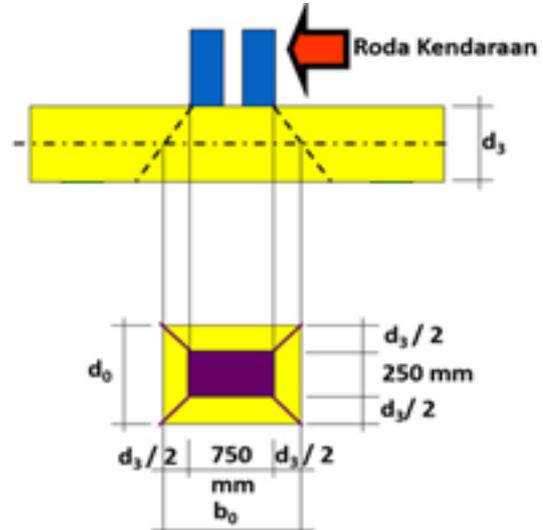
Berdasarkan hasil analisa stabilitas pada saat muka air banjir 1 meter dan kecepatan angin 30 km/jam dengan ketebalan *soil cover* 1 meter, dihasilkan nilai angka keamanan seperti pada Tabel 9.

Tabel 9.
Rekapitulasi Angka Keamanan Stabilitas Timbunan EPS *geofoam*

STA	Tinggi Akhir (m)	Uplift 1 Sisi Banjir	Uplift 2 Sisi Banjir	Geser Akibat Banjir	Geser Akibat Angin
STA 12+434	8,7	3,94	1,80	3,67	2,17
STA 12+484	8,1	3,26	1,76	3,57	2,20
STA 12+534	7	3,22	1,72	3,44	2,27
STA 12+584	5,8	3,15	1,67	3,28	2,38
STA 12+634	4,5	3,05	1,60	3,08	2,58
STA 12+684	3,5	2,95	1,54	2,90	2,83

- Perhitungan perbandingan kekuatan lentur bahan *geofoam* terhadap beban yang terjadi.

Pemilihan bahan EPS *geofoam* berdasarkan kemampuan material tersebut untuk menahan beban yang diterima. Beban-beban yang akan diterima EPS *geofoam* untuk timbunan berupa beban mati akibat perkerasan dan beban hidup akibat lalu lintas. Beban lalu lintas yang dimaksud adalah beban akibat truk yang mengacu pada SNI 1725:2016 dimana besaran beban pada roda belakang truk sebesar 112,5 kN. Tegangan akibat kombinasi beban hidup dan mati tersebut yang harus mampu ditahan oleh EPS *geofoam*. Perhitungan stabilitas tersebut menggunakan perbandingan tegangan yang diterima dengan kekuatan lentur EPS *geofoam*. Gambar 10 menunjukkan konversi luasan tegangan akibat beban truk yang diterima lapisan atas EPS *geofoam*.



Gambar 9. Konversi luasan roda truk.

Besar tegangan yang harus diterima lapisan atas EPS *geofoam* akibat beban hidup dan beban mati adalah 104,6 kN/m². Spesifikasi kekuatan lentur bahan EPS *geofoam* adalah 172 kN/m². Berdasarkan perbandingan kekuatan lentur tersebut didapatkan kesimpulan bahwa EPS *geofoam* mampu menahan beban yang terjadi.

VI. KESIMPULAN

Dari hasil perencanaan dan analisa yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Kondisi tanah dasar dibawah timbunan merupakan tanah berjenis lanau lempungan. Area studi memiliki dua

- kedalaman tanah lunak dengan nilai N SPT kurang dari 10. Untuk STA 12+434 sampai dengan STA 12+484 memiliki kedalaman tanah lunak 11,5 meter dan untuk STA 12+484 sampai dengan STA 12+684 memiliki kedalaman tanah lunak 14 meter.
2. Tinggi timbunan awal, akhir, dan pemampatan untuk timbunan material tanah dapat dilihat pada Tabel 2, sedangkan untuk timbunan material EPS *geofoam* dapat dilihat pada Tabel 7 untuk *soil cover* 0,5 meter dan Tabel 8 untuk *soil cover* 1 meter.
 3. Timbunan dengan material EPS *geofoam* memiliki berat volume relatif ringan dan menghasilkan pemampatan yang kecil. Sehingga dalam pelaksanaannya tidak menggunakan metode *preloading*. Sedangkan untuk timbunan tanah, beban *preloading* yang dibutuhkan untuk menghilangkan pemampatan ditampilkan pada Tabel 10.
 4. Waktu pemampatan yang terjadi tanpa perbaikan tanah dasar pada kedalaman tanah lunak 11,5 meter adalah 80 tahun dan untuk kedalaman tanah lunak 14 meter adalah 112 tahun.

Tabel 10.

Rekapitulasi Beban *preloading* yang Dibutuhkan untuk Menghilangkan Pemampatan

STA	Tinggi Akhir (m)	Akibat Tanah (kN/m ²)	Akibat Perkerasan (kN/m ²)	Akibat Lalulintas (kN/m ²)
STA 12+434	8,7	197,35	10,80	2,50
STA 12+484	8,1	187,39	10,80	2,50
STA 12+534	7	162,92	10,80	2,50
STA 12+584	5,8	135,89	10,80	2,50
STA 12+634	4,5	106,21	10,80	2,50
STA 12+684	3,5	83,00	10,80	2,50

5. Untuk menghindari kedalaman PVD yang berbeda, PVD direncanakan dipasang pada kedalaman 10 meter baik pada kedalaman tanah lunak 11,5 meter maupun 14 meter. Pola pemasangan PVD yang efektif untuk menghilangkan 90% pemampatan pada waktu rencana 24 minggu adalah pola segitiga dengan jarak spasi 1,1 meter antar PVD.
6. Besar peningkatan daya dukung yang terjadi setelah adanya pemasangan PVD dan *preloading* untuk beberapa variasi tinggi timbunan dapat dilihat pada Tabel 4. Berdasarkan nilai tersebut, peningkatan daya dukung masih menyebabkan kelongsoran ($SF < 1$). Oleh sebab itu diperlukan perkuatan timbunan.
7. Untuk timbunan material EPS *geofoam*, asumsi muka air banjir yang terjadi dilapangan tidak melebihi 1 meter dengan kecepatan angin maksimal 30 km/jam. Berdasarkan Tabel 9, SF yang terjadi melebihi SF rencana (1,2) maka timbunan EPS *geofoam* tidak memerlukan perkuatan tambahan. Perkuatan timbunan tanah untuk masing-masing alternatif dapat dilihat pada Tabel 5 (*geotextile*) dan Tabel 6 (*encapsulated stone column*).
8. Hasil analisa stabilitas timbunan EPS *geofoam* dapat dilihat pada Tabel 9.
9. Berdasarkan hasil perhitungan biaya, alternatif timbunan yang membutuhkan biaya material paling ekonomis adalah timbunan tanah dengan perkuatan *geotextile* dengan total biaya Rp 12.088.071.723,.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. D. Stark, D. Arellano, J. S. Horvath, and D. Leshchinsky, *Geofoam Applications in The Design and Construction of Highway Embankments*. National Academy of Sciences, 2004.