

Tempat Pembuangan Akhir Karimunjawa dengan Sistem *Controlled Landfill*

Musta'in Arif, Herman Wahyudi, Yudhi Lastiasih
Dosen Teknik Sipil - ITS

ABSTRAK: Pulau Karimunjawa tingkat pertumbuhan penduduk 1,44% dan tingkat pertumbuhan wisatawan sebesar 28,22%. Kementerian PUPR merencanakan TPA yang terletak di Pulau Karimunjawa. Rencana lokasi TPA Karimunjawa berada di kaki Bukit Gajah, direncanakan penggalian tanah agar lahan sesuai dengan layout yang telah direncanakan dan menghasilkan talud galian dengan ketinggian 36,2 meter. Selain stabilitas talud, diperlukan adanya proteksi terhadap rembesan air lindi yang berasal dari timbunan sampah serta stabilitas timbunan sampah dengan ketinggian \pm 20-meter. Hasil analisis program GeoStudio, diperoleh angka keamanan (SF) sebesar 0,531 terhadap perencanaan talud oleh Kementerian PUPR, diperlukan perkuatan talud yang direncanakan untuk mencegah kelongsoran pada talud TPA Karimunjawa dengan menggunakan perkuatan terasering, dinding penahan tanah kantilever, beronjong dengan ankur, serta soil nailing. Proteksi yang digunakan untuk menahan air lindi akibat timbunan sampah adalah lapisan geomembrane HDPE dengan ketebalan 1,5 mm. SF timbunan sampah dengan GeoStudio, 1,554 sehingga tidak diperlukan perkuatan timbunan maupun perbaikan tanah dasar pada zona *landfill*. Penurunan tanah yang terjadi akibat timbunan sampah sebesar 2,37 cm.

Kata Kunci: beronjong, dinding penahan tanah kantilever, *geomembrane*, *soil nailing*, stabilitas lereng, terasering

ABSTRACT: Karimunjawa Island has a population growth rate of 1.44% and a tourist growth rate of 28.22%. The Ministry of PUPR plans a landfill located on Karimunjawa Island. The planned location of the Karimunjawa TPA is at the foot of Bukit Gajah, it is planned to excavate the land so that the land is in accordance with the planned layout and produces an excavated embankment with a height of 36.2 meters. In addition to the stability of the channel, it is necessary to provide protection against leachate seepage from the landfill and the stability of the landfill with a height of 20-meters. The results of the analysis of the GeoStudio program, obtained a safety value (SF) of 0.531 for the planning of the embankment by the Ministry of PUPR, it is necessary to strengthen the planned embankment to prevent landslides in the Karimunjawa TPA embankment by using terracing reinforcement, cantilever retaining walls, beronjong with anchors, and soil nailing. The protection used to hold leachate due to landfill is a layer of HDPE geomembrane with a thickness of 1.5 mm. SF landfill with GeoStudio, 1.554 so that no reinforcement of the embankment or improvement of the subgrade in the landfill zone is required. Land subsidence that occurs due to piles of garbage is 2.37 cm.

Keywords: gabion, cantilever retaining wall, geomembrane, soil nailing, slope stability, terraces

1 PENDAHULUAN

Karimunjawa adalah kepulauan yang terletak di utara Pulau Jawa dan termasuk dalam wilayah Kabupaten Jepara. Kepulauan Karimunjawa memiliki luas dataran 1.285,50 ha dan luas perairan 110.117,3 ha yang terdiri dari Pulau

Karimunjawa, Kemujan, Parang, dan Nyamuk, Gbr. 1. Pulau Karimunjawa merupakan pulau terbesar di Kepulauan Karimunjawa yang memiliki kondisi topografi didominasi dataran rendah dengan ketinggian di antara 0 – 506 meter di atas permukaan laut (mdpl). Pulau Karimunjawa memiliki 2 bukit, yaitu Bukit

Gajah dan Bukit Bendera yang merupakan puncak tertinggi dengan ketinggian +506 mdpl, BPS (2018). Pada Tahun 2018, penduduk di Pulau Karimunjawa tercatat 4.810 jiwa yang mendiami Pulau Karimunjawa dengan tingkat pertumbuhan penduduk sebesar 1,44%, BPS Karimunjawa (2018). Pada saat ini, Pulau Karimunjawa mengalami proses pengembangan menjadi tempat wisata yang menarik wisatawan lokal maupun mancanegara. Berdasarkan Laporan Kunjungan Wisata Kabupaten Jepara Tahun 2019, tercatat sebanyak 147.524 pengunjung di Pulau Karimunjawa.



Gbr. 1. Letak Kepulauan Karimunjawa yang terdiri dari Pulau Karimunjawa, Kemujan, Parang, dan Nyamuk.

Jumlah penduduk dan wisatawan yang semakin bertambah setiap tahunnya, menimbulkan dampak terhadap produksi sampah yang dihasilkan. Tercatat bahwa sampah yang diproduksi dari penduduk sebesar 1945,45-ton pertahun dan dari sektor wisatawan sebanyak 58,4-ton pertahun. Produksi sampah yang sangat tinggi menyebabkan beberapa tempat wisata di Pulau Karimunjawa terlihat kumuh akibat sampah. Disamping itu, fasilitas penampungan sampah baik dengan sistem *Open Dumping* maupun sistem *controlled landfill* masih belum tersedia. Pada saat ini, hanya ada 3 tempat yang menjadi lokasi penampungan sampah dengan sistem *Open Dumping* hanya saja lokasinya berada di luar Pulau Karimunjawa. Sebagai akibatnya, diperlukan proses penyeberangan terlebih dahulu untuk membuang sampah ke TPA. Lokasi TPA yang kurang strategis menyebabkan biaya pengiriman sampah menjadi mahal. Dari permasalahan yang diuraikan di atas, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) sedang merencanakan pembangunan TPA dengan usia rencana 50 tahun. Perencanaan TPA yang diusulkan oleh Kementerian PUPR belum

menerapkan sistem *controlled landfill* serta bangunan perkuatan lereng. Pembangunan TPA Karimunjawa diharapkan memiliki peran penting untuk menjaga kebersihan dan kelestarian lingkungan Pulau Karimunjawa dari sampah yang dihasilkan penduduk dan wisatawan serta diharapkan mengurangi biaya pembuangan sampah.

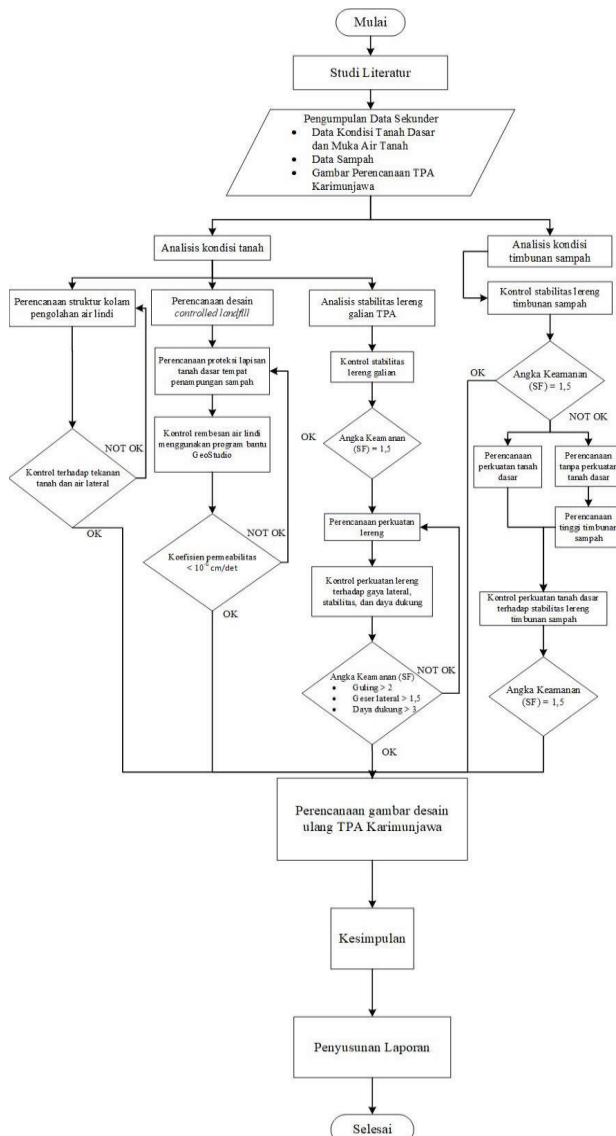
Rencana lokasi TPA Karimunjawa berada di Dukuh Alang-Alang yang berada di kaki Bukit Gajah; sehingga TPA ini akan berada di lereng. Berdasarkan hasil tes tanah yang telah dilakukan, diketahui bahwa kondisi tanah pada lokasi pembangunan TPA berjenis pasir batuan dengan nilai N-SPT yang tinggi. Selain itu, air tanah berada di kedalaman 16-meter (titik bor 1 el. +45,791) dan 13 meter (titik bor 2 el. +40,724). Kondisi lokasi TPA Karimunjawa yang berada di atas lereng mengakibatkan kontur dari daerah tersebut beragam dengan nilai elevasi terendah +28,560 dan nilai elevasi tertinggi +57,712. Sebagai akibat lokasi rencana di atas lereng, diperlukan penggalian tanah agar lahan sesuai dengan layout yang telah direncanakan. Kegiatan penggalian tanah menyebabkan terbentuknya lereng galian yang berada di sebelah (TPA) dengan ketinggian rencana 36,2-meter dan kemiringan lereng sebesar 39°.

Dalam perencanaan pembangunan TPA Karimunjawa, perlu diperhatikan beberapa aspek seperti kondisi lereng dan muka air tanah. Kondisi lereng galian diperlukan perkuatan agar tidak mengalami kelongsoran akibat air tanah dan kemiringan lereng yang curam. Sedangkan untuk menjaga kondisi air tanah pada tempat penampungan sampah, dapat dilakukan dengan merencanakan proteksi lapisan tanah, sehingga air lindi yang berasal dari sampah tidak mencemari air tanah.

Berdasarkan kondisi eksisting di atas, maka diperlukan analisis terhadap talud TPA Karimunjawa, apabila hasil analisis di bawah angka keamanan, maka dilakukan perencanaan perkuatan talud. Selain itu, direncanakan juga struktur kolam IPL TPA Karimunjawa serta perencanaan zona *landfill* yang meliputi analisis stabilitas timbunan sampah dengan tinggi 20 meter dan perencanaan lapisan penahan air lindi. Adanya perencanaan ini, diharapkan menjadi alternatif perencanaan TPA Karimunjawa yang menerapkan sistem *controlled landfill* serta aman terhadap potensi kelongsoran.

2 METODOLOGI

Berikut diagram alir dapat dilihat pada Gbr. 2.



Gbr. 2. Diagram Alir.

3 ANALISIS DATA TANAH DAN KONDISI EKSISTING

3.1 Korelasi Data Tanah

Data tanah pada lokasi perencanaan TPA Karimun Jawa berjenis pasir lempung berbatu dengan nilai N-SPT yang cukup tinggi, Tabel 1. Dalam perencanaan perkuatan, kolam IPL, dan zona *landfill* digunakan data korelasi menggunakan Tabel Bowles dan Biarez karena hasil korelasi lebih konsisten dibandingkan dengan data sekunder yang telah diolah. Lapisan tanah dibagi menjadi 2 lapisan dengan tebal per lapisan 10 meter, sehingga dilakukan

rata – rata dan analisis koefisien variasi (CV) terhadap nilai N-SPT. Berikut rekapitulasi korelasi data tanah TPA Karimun Jawa dengan menggunakan Tabel Bowles dan Biarez, Tabel 2.

3.2 Analisis Kondisi Eksisting

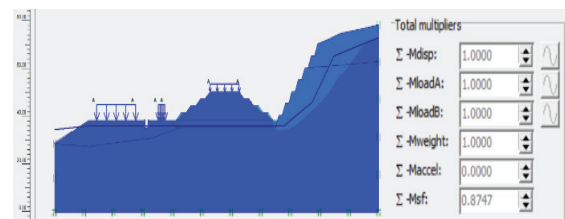
Analisis kondisi eksisting meliputi kondisi lereng telah digali sesuai dengan rencana Kementerian PUPR. Kementerian PUPR merencanakan perkuatan talud dengan menggunakan metode terasering dengan tinggi rencana $\pm 36,2$ -meter. Proses analisis menggunakan program GeoStudio, diperoleh angka keamanan sebesar 0,531 untuk talud dengan perkuatan terasering, Gbr. 3.

Tabel 1. Nilai N-SPT Tanah TPA Karimun Jawa.

Kedalaman (m)	BM. 1		BM. 2	
	N-SPT	Jenis Tanah	N-SPT	Jenis Tanah
2	31	Pasir Lempung Berkatu	21	Pasir Lempung Berkatu
4	35		30	
6	47		46	
8	56		55	
10	60		60	
12	60		60	
14	60		60	
16	60		60	
18	60		60	
20	60		60	

Tabel 2. Nilai Parameter Tanah TPA Karimun Jawa.

Titik Bor	Depth (m)	N-SPT	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ
BM. 1	0 -5	33	16,42	9,8	13,1	31
	5 - 20	58	21,68	18,4	18,8	36
BM. 2	0 -5	25	14,74	7,5	16,4	26
	5 - 20	57	21,47	18,3	15,2	36

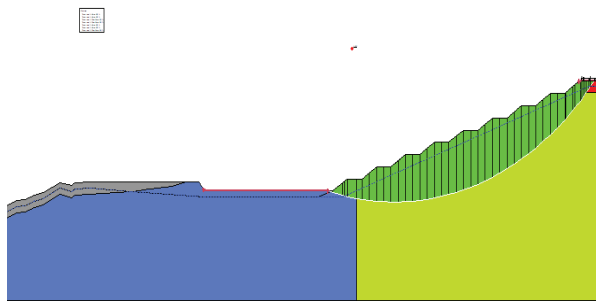


Gbr. 3 Hasil Analisis Talud Terasering Rencana Kementerian PUPR SF = 0,8747.

4 PERENCANAAN PERKUATAN TALUD TPA KARIMUNJAWA

4.1 Perkuatan Talud Menggunakan Terasering

Perencanaan menggunakan terasering dilakukan dengan membuat variasi kemiringan dan tinggi talud. Terdapat 3 variasi kemiringan dan tinggi talud yang dipilih yaitu 1:1 dengan tinggi 3 meter, 1:1,5 dengan tinggi 4 meter, dan 1:2 dengan tinggi 6 meter. Dilakukan analisis dengan program bantu GeoStudio sehingga diperoleh angka keamanan pada talud dengan kemiringan 1:1 sebesar 1,056 dan talud dengan kemiringan 1:1,5 sebesar 1,565 (Gbr. 4). Kemiringan talud 1:2 menghasilkan angka keamanan lebih besar dari kemiringan talud 1:1,5, namun kemiringan 1:2 membutuhkan lahan yang lebih luas sehingga kurang efektif untuk dilaksanakan.



Gbr. 4 Hasil Analisis Perkuatan Lereng Kemiringan 1:1,5 dengan SF 1,565.

4.2 Perkuatan Talud Menggunakan Gabion Wall dan Ground Anchor

Alternatif perkuatan talud TPA Karimunjawa adalah menggunakan bronjong yang diperkuat dengan *ground anchor*, dikarenakan untuk menjaga stabilitas perkuatan talud secara *overall stability*. Berdasarkan program bantu GeoStudio, perencanaan perkuatan yang menggunakan bronjong tanpa adanya *anchor* menghasilkan angka keamanan sebesar 0,7 dan data berikut ini.

$$\begin{aligned} M_{\text{pendorong}} &= 27.590 \text{ kNm} \\ M_{\text{penahan}} &= 19.467 \text{ kNm} \\ \text{Jari - jari} &= 42,455 \text{ m} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil tersebut, dapat direncanakan angkur dengan perhitungan di bawah ini.

$$SF_{\text{rencana}} = 1,5 \text{ (SNI 8460:2017)}$$

$$M_{\text{pen.rencana}} = M_{\text{pendorong}} \times SF_{\text{rencana}} \quad (1)$$

$$\Delta M_r = M_{\text{pen.rencana}} - M_{\text{pen.eksisting}} \quad (2)$$

Perhitungan gaya prategang (N) yang terjadi pada angkur dapat dihitung sebagai berikut.

$$N_{\text{anchor}} = \frac{\Delta M_r}{R \times \tan \phi} \quad (3)$$

Dimana R adalah jari-jari bidang longsor (m) dan ϕ adalah sudut geser ($^{\circ}$).

Untuk menentukan jumlah kapasitas maksimum dari angkur yang digunakan, dapat digunakan persamaan:

$$P_{\text{max}} = \delta P_{\text{ult}} \times \tan \phi \quad (4)$$

Dimana δ adalah faktor keamanan dan ϕ adalah sudut geser ($^{\circ}$).

Direncanakan menggunakan 10 angkur, maka beban dibagi menjadi 10 untuk mendapatkan gaya tiap angkur. Angkur yang digunakan berasal dari brosur Freyssinet (Freyssinet 670-E) dengan diameter 30 mm dan kapasitas tarik *ultimate* sebesar 566 kN.

Berdasarkan perhitungan kapasitas gaya tarik dari angkur dengan persamaan di atas, maka nilai $P_{\text{max}} > P_{\text{beban}}$, sehingga digunakan angkur Freyssinet dengan diameter 30 mm dan kapasitas tarik *ultimate* sebesar 566 kN. Dalam penentuan panjang grouting, dapat digunakan perumusan 2.48 dengan nilai SF sebesar 2 dan nilai c' sebesar 12,53 kN/m². Berikut perumusan panjang *grouting* yang dibutuhkan.

$$L = \frac{P \times SF}{c \times D \times \pi} \quad (4)$$

Dimana P adalah kapasitas maksimum angkur (kN), c adalah kohesi tanah (kN/m²) dan D adalah diameter grouting (m).

Panjang *grouting* yang dibutuhkan untuk perkuatan adalah 16-meter dengan panjang total sebesar 20 meter. Berdasarkan hasil analisis dengan program bantu GeoStudio, diperoleh angka keamanan sebesar 1,581 Gbr.5, sehingga perkuatan lereng dengan bronjong dan angkur aman terhadap kelongsoran.

4.3 Perkuatan Talud Menggunakan Dinding Penahan Tanah Kantilever

Dinding penahan tanah direncanakan pada

dasar lereng. Dinding penahan direncanakan dengan ketinggian 8 meter dan lebar kaki sebesar 13 meter. Perkuatan dinding penahan tanah perlu memperhatikan stabilitas terhadap geser, stabilitas terhadap guling atau overall stability, dan stabilitas terhadap ambles. Berikut merupakan tahapan perhitungan perencanaan beronjong terhadap tiga stabilitas tersebut.

Data tanah urugan:

$$\gamma_{\text{sat}} = 18,00 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma' = 8,00 \text{ kN/m}^3$$

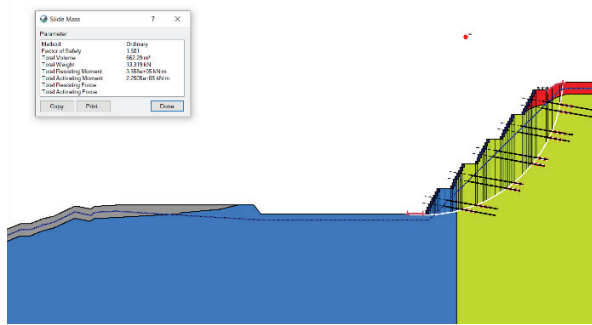
$$c = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\phi = 36^\circ$$

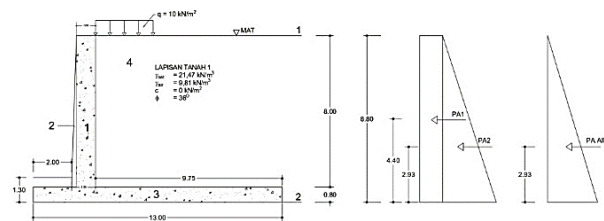
$$\phi' = 24^\circ$$

$$K_a = 0,42173$$

Berikut perumusan untuk perhitungan tekanan aktif akibat tanah, air, dan beban tambahan (10 kN/m^2) dengan diagram tekanan tanah pada Gbr. 6.



Gbr. 5 Angka Keamanan Perkuatan Beronjong dan Anchor dengan SF 1,581.



Gbr. 6 Diagram Tekanan Tanah dan Air Aktif Dinding Penahan Tanah.

$$\sigma_v = \gamma \times h \quad (5)$$

$$\sigma_h = \sigma_v \times K_a \quad (6)$$

$$P_a = \sigma_h \times h \times 1 \quad (7)$$

dimana γ adalah berat volume (kN/m^3), h adalah tebal lapisan tanah (m) dan K_a adalah koefisien tekanan aktif.

Berdasarkan perumusan dan diagram tersebut diperoleh nilai momen akibat tekanan tanah dan air pada Tabel 3. Berat dinding penahan tanah dapat dihitung berdasarkan pada Gbr. 6, sehingga dapat direkapitulasi gaya dan momen penahan dinding kantilver sebagai berikut, Tabel 4. Berdasarkan perhitungan tekanan tanah dan air di atas serta berat dinding penahan tanah, maka dapat dihitung stabilitas dengan perumusan sebagai berikut.

1. Stabilitas terhadap geser

$$FS_{\text{geser}} = \frac{\Sigma V \times \tan \phi' + B \times c' + Pp}{Pa} \quad (8)$$

dimana ΣV adalah berat total struktur (kN), B adalah lebar kaki dinding (m), ϕ adalah sudut geser ($^\circ$), c adalah kohesi tanah (kN/m^2), Pa adalah gaya aktif (kN) dan Pp adalah gaya pasif (kN).

2. Stabilitas terhadap overturning

$$FS_{\text{overturning}} = \frac{\Sigma M_{\text{penahan}}}{\Sigma M_{\text{pendorong}}} \quad (9)$$

dimana $\Sigma M_{\text{penahan}}$ adalah momen penahan (kNm), $\Sigma M_{\text{pendorong}}$ adalah momen pendorong (kNm) sehingga $FS_{\text{overturning}} = 5,442 > 2$ (OK).

3. Stabilitas terhadap daya dukung

$$FS_{\text{bearing}} = \frac{q_u}{q_{\text{max}}} \quad (10)$$

$$q_u = c \times N_c + q \times N_q + 0,5 \times \gamma \times B \times N_\gamma \quad (11)$$

$$q_{\text{max}} = \frac{\Sigma V}{B} \times \left(1 + \frac{6e}{B} \right) \quad (12)$$

$$e = \frac{\Sigma M}{\Sigma V} \quad (13)$$

dimana ΣM = total momen (kNm), ΣV adalah total berat (kN), c adalah kohesi tanah (kN/m^2), q adalah beban merata di depan kaki dinding (kN/m^2), B adalah lebar kaki dinding (m), e adalah eksentrisitas (m) dan N_c , N_q , N_γ adalah faktor daya dukung tanah, sehingga $FS_{\text{bearing}} = 3,0074 > 3$ (OK).

Tabel 3. Rekapitulasi Momen Tekanan Tanah dan Air.

	P (kN)	Lengan (m)	Momen (kNm)
Pa ₁	37,112	4,4	163,294
Pa ₂	154,54	2,933	453,304
Pa _{air}	379,84	2,933	1114,207

Tabel 4. Rekapitulasi Berat dan Momen Dinding Penahan Kantilever.

Area	b (m)	h (m)	A (m ²)	W (kN/m)	Lengan (kPa)	Momen
1	1	8	8	192	2,5	480
2	0,25	8	1	24	2,0833	50
3	13	0,8	10,4	249,6	6,5	1.622,4
4	9,75	8	78	894,66	8,125	7.269,11
ΣV				1.360,3	ΣM	9.421,51

^aΣV: Total berat struktur & tanah urug (W) ΣW: Total momen penahan

Sebagai akibat stabilitas geser belum memenuhi dan untuk menjaga *overall stability* dinding penahan tanah kantilever, maka digunakan spesifikasi cerucuk *bore pile* dengan diameter 50 cm dan panjang 6-meter sebanyak 9 buah dengan pemasangan seperti pada Gbr. 7. Jumlah kebutuhan cerucuk dapat dihitung dengan perumusan di bawah ini. Berdasarkan hasil analisis dengan program GeoStudio, diperoleh angka keamanan sebesar 1,578. Gbr. 8.

$$T = \left(\frac{EI}{f} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (14)$$

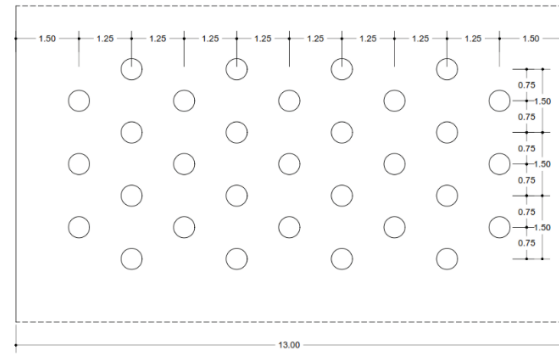
$$P_{\max} = \frac{M_u}{F_m \times T} \quad (15)$$

$$n = \frac{\Delta M_r}{P_{\max} \times R} \quad (16)$$

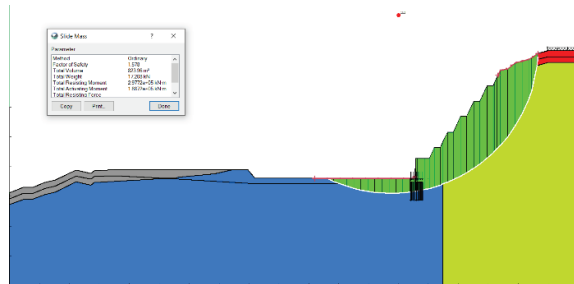
$$M_{\text{pen.rencana}} = M_{\text{pendorong}} \times SF_{\text{rencana}} \quad (17)$$

$$\Delta M_r = M_{\text{pen.rencana}} - M_{\text{pen.eksisting}} \quad (18)$$

dimana T adalah faktor kekakuan tiang (kg/cm²), E adalah modulus elastisitas tiang (MPa), I adalah inersia tiang (cm⁴), f adalah faktor modulus tanah (kg/cm³), F_m adalah koefisien momen gaya lateral, P_{max} adalah gaya horizontal yang mampu dipikul 1 tiang (kN) dan n adalah jumlah cerucuk.



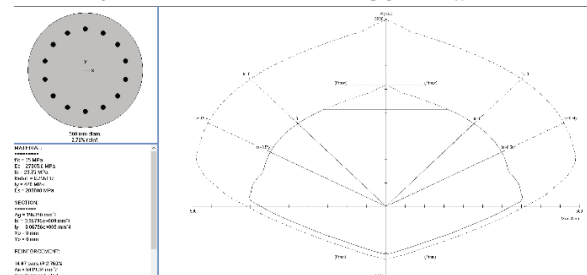
Gbr. 7 Denah Cerucuk untuk Dinding Penahan Tanah.



Gbr. 8 Angka Keamanan Dinding Penahan Tanah Diperkuat Cerucuk dengan SF 1,578.

Spesifikasi penulangan serta beton yang digunakan untuk dinding penahan tanah diperkuat cerucuk sebagai berikut.

1. Bagian badan dinding penahan tanah
 - Cover = 50 mm
 - Dtulangan = 25 mm
 - f_y = 420 MPa
 - f_{c'} = 35 MPa
 - Tulangan badan = 55 D25 – 140
2. Bagian *pile cap* dinding penahan tanah
 - Cover = 50 mm
 - Dtulangan = 25 mm
 - f_y = 420 MPa
 - f_{c'} = 35 MPa
 - Tulangan badan = 45 D30 – 250
3. Bagian cerucuk *bore pile* dinding penahan tanah
 - Cover = 50 mm
 - Dtulangan = 22 mm
 - f_y = 420 MPa
 - f_{c'} = 35 MPa



Gbr. 9 Penulangan Cerucuk *Bore Pile*.

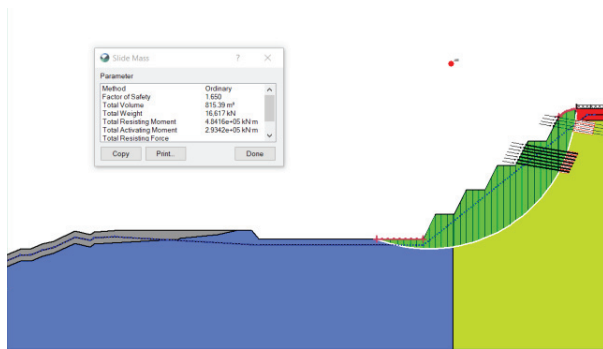
4.4 Perkuatan Talud Menggunakan Soil Nailing

Perkuatan ini akan dipasang pada bagian atas talud, karena menghasilkan panjang yang lebih efisien daripada pemasangan pada bagian bawah talud. Direncanakan sebanyak 6 buah soil nailing akan dipasang untuk meningkatkan angka keamanan talud. Material soil nailing menggunakan brosur dari SAS Soil Nails dengan mutu 550 MPa dan diameter sebesar 40 mm, sehingga dapat dihitung kapasitas tarik *soil nailing* sebagai berikut.

$$R_T = 0,25 \times d^2 \times f_y \times \pi \quad (19)$$

dimana d adalah diameter *nails* (mm) dan f_y adalah mutu *nails* (MPa).

Berdasarkan hasil analisis dengan program bantu GeoStudio dan kapasitas tarik *soil nailing*, diperoleh angka keamanan terhadap kelongsoran sebesar 1,65, Gbr. 10.



Gbr. 10 Angka Keamanan *Soil Nailing* dengan SF 1,65.

Berdasarkan hasil perhitungan perkuatan di atas, dapat diperoleh tabel rekapitulasi angka keamanan perkuatan talud TPA Karimunjawa sebagai berikut, Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Angka Keamanan Perkuatan Talud TPA Karimunjawa.

Jenis Perkuatan	Angka Keamanan
Terasering kemiringan 1:1,5	1,565
Beronjong dengan <i>anchor</i>	1,581
Dinding penahan tanah	1,578
<i>Soil nailing</i>	1,65

5 PERENCANAAN STRUKTUR KOLAM IPL

5.1 Tekanan Aktif Tanah dan Gaya Uplift

Data tanah:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{sat}} &= 1,474 \text{ ton/m}^3 \\ \gamma &= 1,474 - 0,981 = 0,493 \text{ ton/m}^3 \\ \phi &= 36^\circ \\ \phi' &= 24^\circ \\ K_a &= 0,556 \end{aligned}$$

Data kolam:

$$\begin{aligned} \text{Panjang} &= 2 \text{ meter} \\ \text{Lebar} &= 4 \text{ meter} \\ \text{Tinggi} &= 3,1 \text{ meter} \\ \text{Tebal dinding} &= 0,3 \text{ meter} \\ \text{Tebal pelat} &= 0,3 \text{ meter} \end{aligned}$$

Persamaan perhitungan tekanan aktif tanah sebagai berikut:

$$\sigma_v = \gamma \times h \quad (20)$$

$$\sigma_h = \sigma_v \times K_a \quad (21)$$

$$P_a = \sigma_h \times h \times 1 \quad (22)$$

dimana γ adalah berat volume (kN/m^3), h adalah tebal lapisan tanah (m) dan K_a adalah koefisien tekanan aktif.

Diagram beserta hasil rekapitulasi tekanan tanah dan air aktif dapat dilihat pada Gbr. 11 serta Tabel 7. Perencanaan kolam IPL perlu memperhatikan aspek gaya *uplift* akibat air yang berada di dalam tanah. Apabila berat struktur kolam tanpa air lebih besar dari gaya *uplift*, maka kolam aman terhadap gaya angkat. Berikut perumusan kontrol gaya *uplift* pada kolam IPL:

$$W = \gamma_{\text{beton}} \times V_{\text{beton}} \quad (23)$$

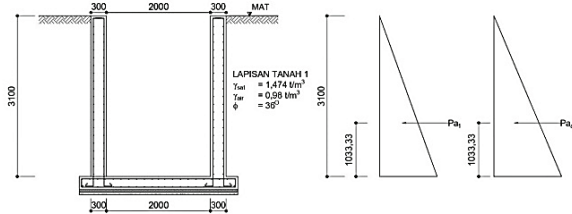
$$\sigma_{\text{air}} = \gamma_{\text{air}} \times h_{\text{air}} \quad (24)$$

$$P_{\text{air}} = \sigma_{\text{air}} \times A \quad (25)$$

dimana h adalah tinggi air di dalam tanah (m) dan A adalah luas dasar kolam.

Tabel 6. Rekapitulasi Momen Tekanan Tanah dan Air.

P (ton)	Lengan (m)	Momen (tonm)
Pa ₁	2,609	1,0333
Pa _{air}	4,666	1,0333
		4,821



Gbr. 11 Diagram Tekanan Tanah dan Air Kolam Sedimentasi.

5.2 Desain Struktur Dinding Kolam IPL

Struktur dinding kolam IPL direncanakan untuk menahan tekanan aktif tanah dan air. Berikut desain dinding kolam IPL yang dapat digunakan.

Cover	= 40 mm
D _{tulangan}	= 13 mm
D _{tulangan pembagi}	= 8 mm
f _y	= 390 MPa
f _{c'}	= 25 MPa
Tulangan dinding	= 8 D13 – 120
Tulangan pembagi	= 5 D8 - 150

5.3 Desain Struktur Pelat Dasar Kolam IPL

Tabel 7. Rekapitulasi Dimensi Penulangan Struktur Kolam IPL TPA Karimunjawa

Jenis Kolam	Sedimentasi	Pengumpul 1	Pengumpul 2
Panjang (m)	4	3	3
Lebar (m)	2	1,5	2
Tinggi (m)	3,1	2,8	3,92
Mutu Beton (m)	25	25	25
Mutu Baja (MPa)	390	390	390
Tebal Dinding (mm)	300	300	300
Tebal Pelat (mm)	300	200	200
Selimut beton dinding (mm)	40	40	40
Selimut beton pelat (mm)	40	40	40
Tulangan Dinding (mm)	D13 – 120	D13 – 150	D19 – 130
Tulangan Pembagi (mm)	D8 – 150	D8 – 150	D10 – 150
Tulangan Pelat (mm)	D10 – 120	D10 – 140	D10 – 140
Gaya Uplift atau P (ton)	24,33	12,361	23,073

Jenis Kolam	Sedimentasi	Pengumpul 1	Pengumpul 2
Berat Beton atau W (ton)	31,776	21,168	31,968
W > P	OK	OK	OK

^aOK: Struktur kolam aman terhadap gaya angkat atau *uplift*

Struktur pelat kolam IPL direncanakan untuk menahan beban air yang akan mengisi kolam. Berikut desain pelat kolam IPL yang dapat digunakan.

Cover	= 40 mm
D _{tulangan}	= 13 mm
f _y	= 390 MPa
f _{c'}	= 25 MPa
Tulangan pelat	= 7 D13 – 120

Berdasarkan hasil perhitungan penulangan dinding dan pelat kolam, dapat diperoleh tabel rekapitulasi untuk struktur setiap bak kolam IPL TPA Karimunjawa, Tabel 7 & Tabel 8.

Tabel 8. Rekapitulasi Dimensi Penulangan Struktur Kolam IPL TPA Karimunjawa.

Jenis Kolam	Aerasi	Anaerob	Wetland
Panjang (m)	6	7	6
Lebar (m)	3	3,5	3
Tinggi (m)	3,1	4,45	2,25
Mutu Beton (m)	25	25	25
Mutu Baja (MPa)	390	390	390
Tebal Dinding (mm)	300	300	300
Tebal Pelat (mm)	300	600	300
Selimut beton dinding (mm)	40	40	40
Selimut beton pelat (mm)	40	40	40
Tulangan Dinding (mm)	D13 - 120	D13 – 150	D19 - 130
Tulangan Pembagi (mm)	D8 - 150	D8 - 150	D8 - 150
Tulangan Pelat (mm)	D10 – 120	D10 – 140	D10 - 140
Gaya Uplift atau P (ton)	24,3288	12,361	23,073
Berat Beton atau W (ton)	31,776	21,168	31,968
W > P	OK	OK	OK

^aOK: Struktur kolam aman terhadap gaya angkat atau *uplift*

6 PERENCANAAN ZONA LANDFILL

6.1 Perkuatan Timbunan Sampah

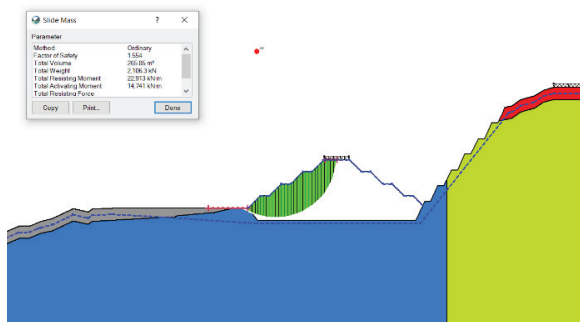
Timbunan sampah direncanakan mencapai ketinggian 20 meter dan digunakan perkuatan timbunan sampah dengan perkuatan terasering. Tinggi setiap bagian terasering adalah 4 meter. Berikut data timbunan sampah TPA Karimunjawa.
Data sampah:

$\gamma_{\text{sampah}} = 8 \text{ kN/m}^3$
 $c = 6 \text{ kN/m}^2$
 $\phi = 30^\circ$
Kemiringan = 1:1
Lebar timbunan = 53 meter

Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan program bantu GeoStudio diperoleh angka keamanan terhadap longsor sebesar 1,554, Gbr. 12. Selain kontrol terhadap longsor, diperlukan kontrol terhadap penurunan dan daya dukung tanah dasar *landfill*. Penurunan tanah tergolong *immediate settlement* karena tanah dasar berjenis pasir lempung berbatu. Berikut perhitungan penurunan dan daya dukung tanah dasar dengan data sebagai berikut.

Data tanah:

$\gamma_{\text{sat}} = 21,47 \text{ kN/m}^3$
 $\gamma_t = 18,3 \text{ kN/m}^3$
 $\gamma' = 21,47 - 9,81 = 11,66 \text{ kN/m}^3$
 $c = 0 \text{ kN/m}^2$
 $E = 69.000 \text{ kN/m}^2 = 690 \text{ t/m}^2$
 $C_v = 0,028 \text{ cm/s}$, Tabel Biarez
 $a = \frac{1}{2} \times (53 + (20.1)) = 36,5 \text{ meter (tan } 45 = 1)$
 $a' = 53 \times \frac{1}{2} = 26,5 \text{ meter}$
 $\Gamma_H = 0,547$, Gbr. 13
 $\Gamma'_H = 0,26$, Gbr. 13



Gbr. 12 Hasil Analisis Talud Timbunan Sampah dengan Program Bantu GeoStudio.

1. Kontrol penurunan tanah dasar

$$S_i = \frac{\gamma_{\text{dry}} \times H_1}{E} \times \frac{a^2}{a - a'} \left[\Gamma_H - \left(\frac{a'}{a} \right)^2 \Gamma'_H \right] \quad (26)$$

Berdasarkan perumusan 26 diperoleh penurunan tanah sebesar 2,37 cm.

2. Kontrol daya dukung tanah dasar

$$FS_{\text{bearing}} = \frac{q_u}{q_{\text{max}}} \quad (27)$$

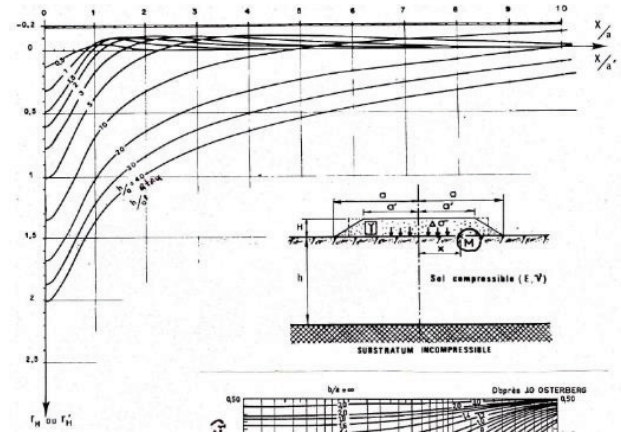
$$q_u = c \times N_c + q \times N_q + 0,5 \times \gamma \times B \times N_\gamma \quad (28)$$

$$q_{\text{max}} = \gamma_{\text{sampah}} \times B \quad (29)$$

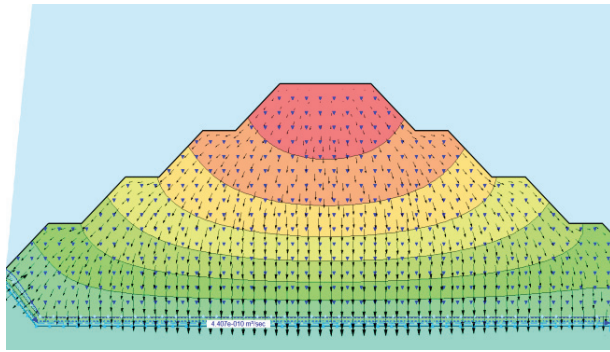
dimana c adalah kohesi tanah (kN/m^2), q adalah beban merata di depan kaki dinding (kN/m^2), B adalah lebar bagian dasar timbunan sampah (m), dan N_c , N_q , N_γ adalah faktor daya dukung tanah, sehingga $FS_{\text{bearing}} = 9,63 > 3$ (OK).

6.2 Perencanaan Geomembran sebagai Lapisan Dasar Landfill

Direncanakan lapisan pada dasar zona *landfill* untuk menahan air lindi yang berasal dari timbunan sampah. Lapisan tersebut terdiri dari lapisan kerikil dengan tebal 50 cm dan geomembran HDPE ketebalan 1,5 mm. Dengan program bantu GeoStudio SEEP/W, diperoleh angka rembesan sebesar $4,407\text{E}-10 \text{ m/s}$, Gbr. 14, dimana angka tersebut lebih kecil dari persyaratan ($< 10^{-6} \text{ cm/det}$).



Gbr. 13 Grafik Penentuan Γ_H dan Γ'_H .



Gbr. 14 Hasil Rembesan Air Lindi Timbunan Sampah dengan Program Bantu GeoStudio.

7 KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan, dapat disimpulkan mengenai perencanaan TPA Karimun Jawa sebagai berikut: (1) Berdasarkan hasil analisis dengan program bantu, diperoleh angka keamanan sebesar 0,8747 terhadap perencanaan talud oleh kementerian PUPR, sehingga diperlukan alternatif perkuatan; (2) Terdapat 4 jenis perkuatan, yaitu perkuatan dengan terasering, dinding penahan tanah kantilever, beronjong dengan ankur, serta soil nailing. Berdasarkan perhitungan pada bab sebelumnya, dapat diperoleh rekapitulasi angka keamanan pada Tabel 6;

(3) Proteksi untuk menahan air lindi akibat timbunan menggunakan lapisan geomembran ketebalan 1,5 mm dan lapisan kerikil dengan tebal 50 cm. Penurunan yang terjadi akibat timbunan sampah sebesar 2,37 cm; (4) Perencanaan TPA Karimun Jawa dengan *controlled landfill* meliputi tinggi timbunan sampah dengan tinggi rencana 20 meter, pelapisan dasar zona landfill, dan kolam pengolahan lindi.

DAFTAR PUSTAKA - REFERENCES

- Dinas Pariwisata dan Kebudayaan Karimun Jawa. 2019. *Laporan Kunjungan Wisatawan*. Dinas Pariwisata dan Kebudayaan Karimun Jawa. Jepara.
- J. Bowles. 1991. *Sifat-sifat Fisis Tanah dan Geoteknis Tanah*. Jakarta: Erlangga.
- B. M. Das. 1988. *Mekanika Tanah Jilid I: Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik*. Jakarta: Erlangga.
- Standar Nasional Indonesia. 2017. *SNI 8460:2017 Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Standar Nasional Indonesia.
- H. Wahyudi. 1999. *Daya Dukung Pondasi Dalam*. Jurusan Teknik Sipil FTSP – ITS. Surabaya.
- NAVFAC DM-7. 1970. *Design Manual, Soil Mechanics, Foundation and Earth Structure*. Virginia.
- J. P. Jones. 1986. *Design Manual: Soil Mechanics*. Naval Facilities Engineering Command.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. 2013. *Penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Persampahan Dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga*. Kementerian Pekerjaan dan Perumahan Rakyat. Jakarta.