

# Perencanaan Alternatif Tempat Pembuangan Akhir Karimunjawa dengan Sistem *Controlled Landfill*

Muhammad Syamsu Bachri, Herman Wahyudi, dan Mustain Arif  
Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
e-mail: herman\_its@yahoo.com

**Abstrak**—Kepulauan Karimunjawa terdiri dari Pulau Karimunjawa, Kemujaan, Parang, dan Nyamuk. Pulau Karimunjawa memiliki tingkat pertumbuhan penduduk sebesar 1,44% dan tingkat pertumbuhan wisatawan sebesar 28,22%. Kenaikan pertumbuhan penduduk dan wisatawan menyebabkan produksi sampah meningkat, sehingga Kementerian PUPR merencanakan TPA yang terletak di Pulau Karimunjawa. Rencana lokasi TPA Karimunjawa berada di kaki Bukit Gajah, sebagai akibatnya 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. Berdasarkan hasil analisis dengan program bantu GeoStudio, diperoleh angka keamanan sebesar 0,531 terhadap perencanaan talud oleh Kementerian PUPR, sehingga diperlukan perkuatan talud yang direncanakan untuk mencegah kelongsoran pada talud TPA Karimunjawa dengan menggunakan perkuatan terasering, dinding penahan tanah kantilever, beronjong dengan angkur, serta soil nailing. Proteksi yang digunakan untuk menahan air lindi akibat timbunan sampah adalah lapisan geomembrane HDPE dengan ketebalan 1,5 mm. Dari perhitungan angka keamanan timbunan sampah dengan program bantu GeoStudio, diperoleh angka keamanan sebesar 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.

## I. PENDAHULUAN

KEPULAUAN 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, Kemujaan, Parang, dan Nyamuk (Gambar 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% (Sumber: 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



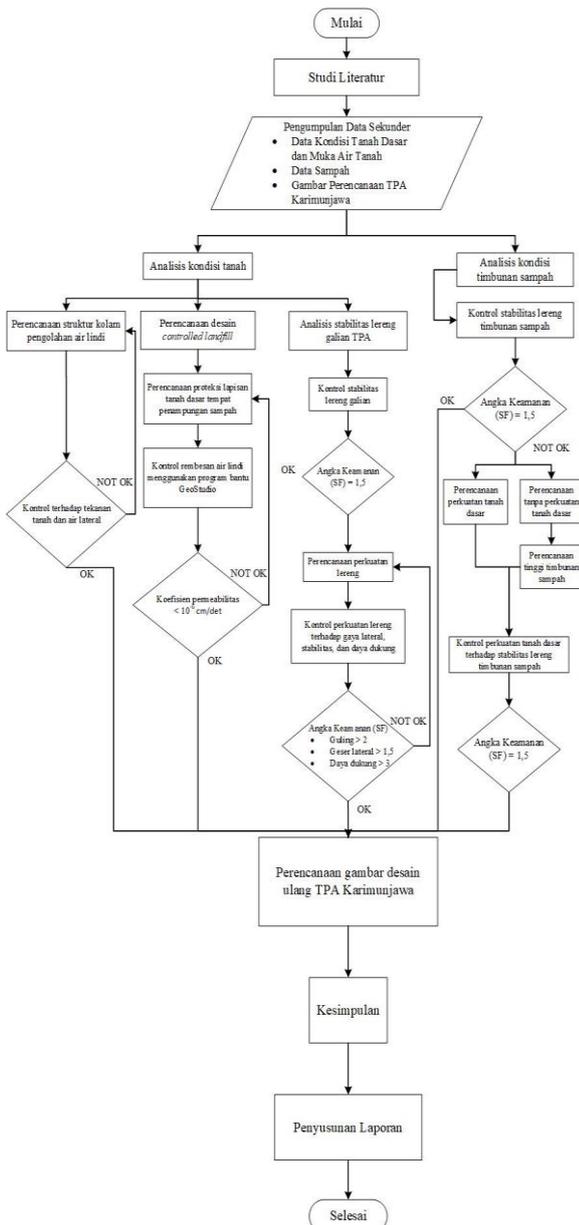
Gambar 1. Letak Kepulauan Karimunjawa yang terdiri dari Pulau Karimunjawa, Kemujaan, Parang, dan Nyamuk.

Tahun 2019, tercatat sebanyak 147.524 pengunjung dengan tingkat pertumbuhan sebesar 28,22% yang mengunjungi Pulau Karimunjawa.

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

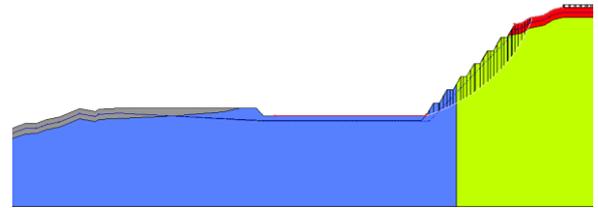


Gambar 2. Diagram alir penulisan tugas akhir.

meter (titik bor 1 el. +45,791) dan 13 meter (titik bor 2 el. +40,724). Kondisi lokasi TPA Karimun Jawa 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 Karimun Jawa, 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.

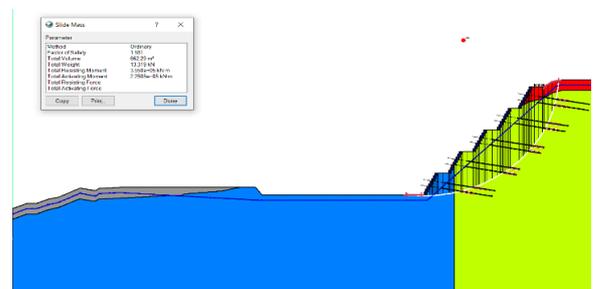
Berdasarkan kondisi eksisting di atas, maka diperlukan analisis terhadap talud TPA Karimun Jawa, apabila hasil



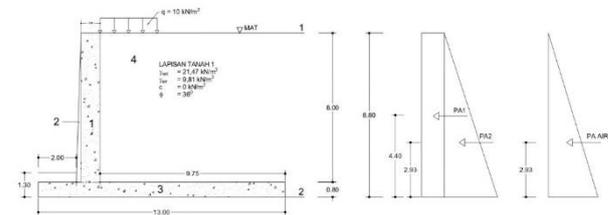
Gambar 3. Hasil analisis talud terasering rencana Kementerian PUPR dengan program bantu GeoStudio.



Gambar 4. Hasil analisis perkuatan lereng kemiringan 1:1,5 dengan SF 1,565.



Gambar 5. Angka keamanan perkuatan beronjong dan anchor dengan SF 1,581.



Gambar 6. Diagram tekanan tanah dan air aktif dinding penahan tanah.

analisis di bawah angka keamanan, maka dilakukan perencanaan perkuatan talud. Selain itu, direncanakan juga struktur kolam IPL TPA Karimun Jawa 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 Karimun Jawa yang menerapkan sistem *controlled landfill* serta aman terhadap potensi kelongsoran

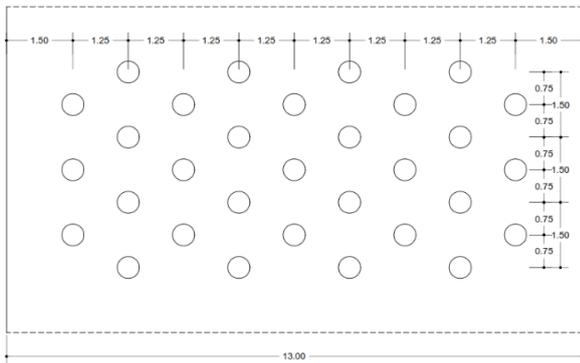
## II. METODOLOGI

Berikut diagram alir dalam penulisan tugas akhir ini dapat dilihat pada Gambar 2.

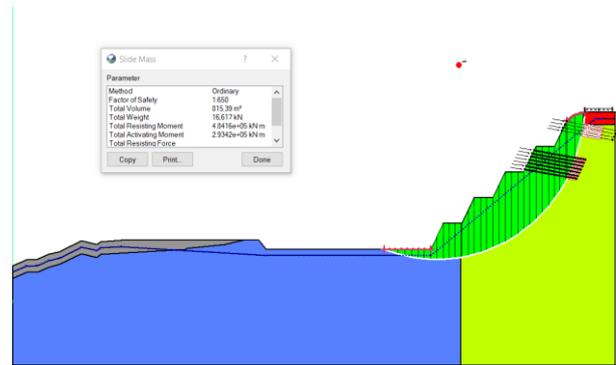
## III. ANALISIS DATA TANAH DAN KONDISI EKSISTING

### A. Korelasi Data Tanah

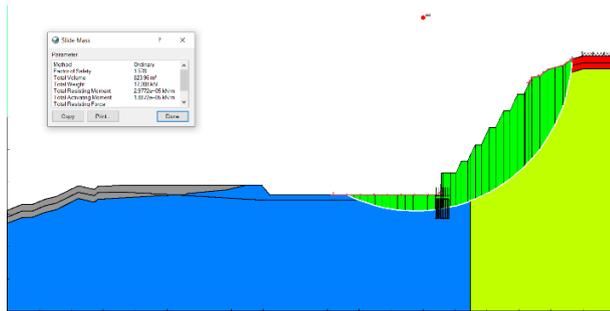
Data tanah pada lokasi perencanaan TPA Karimun Jawa berjenis pasir lempung berbatu dengan nilai N-SPT yang



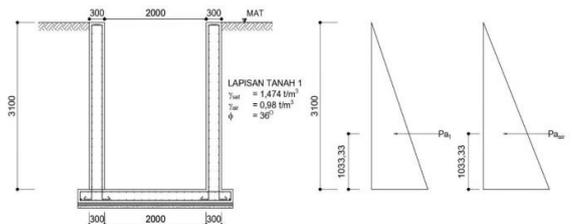
Gambar 7. Denah cerucuk untuk dinding penahan tanah.



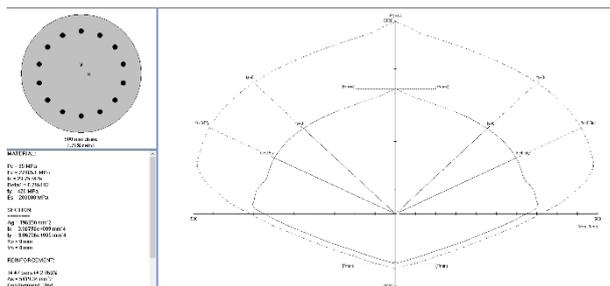
Gambar 10. Angka keamanan soil nailing dengan SF 1,65.



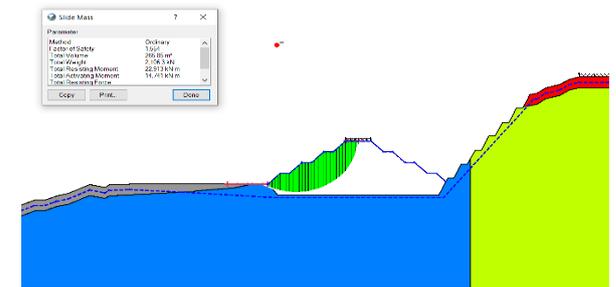
Gambar 8. Angka keamanan dinding penahan tanah diperkuat cerucuk dengan SF 1,578.



Gambar 11. Diagram tekanan tanah dan air kolam sedimentasi.



Gambar 9. Penulangan cerucuk bore pile.



Gambar 12. Hasil analisis talud timbunan sampah dengan program bantu GeoStudio.

cukup tinggi (Tabel 1). Dalam perencanaan perkuatan, kolam IPL, dan zona landfill digunakan data korelasi menggunakan Tabel Bowles[1] 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 Karimunjawa dengan menggunakan Tabel Bowles [1] dan Biarez (Tabel 2).

**B. 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 ± 36,2 meter. Proses analisis menggunakan program GeoStudio, diperoleh angka keamanan sebesar 0,531 untuk talud dengan perkuatan terasering (Gambar 3).

**IV. PERENCANAAN PERKUATAN TALUD TPA KARIMUNJAWA**

**A. 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 (Gambar 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.

**B. Perkuatan Talud Menggunakan Gabion Wall dan Ground Anchor**

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

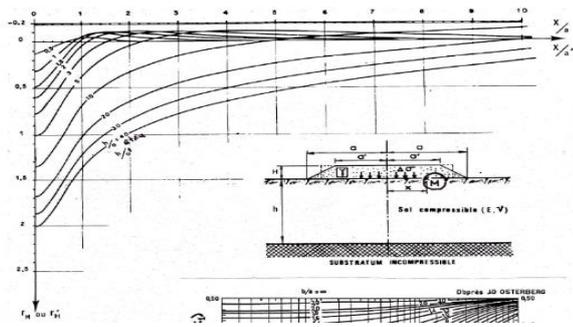
$$M_{\text{pendorong}} = 27.590 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{penahan}} = 19.467 \text{ kNm}$$

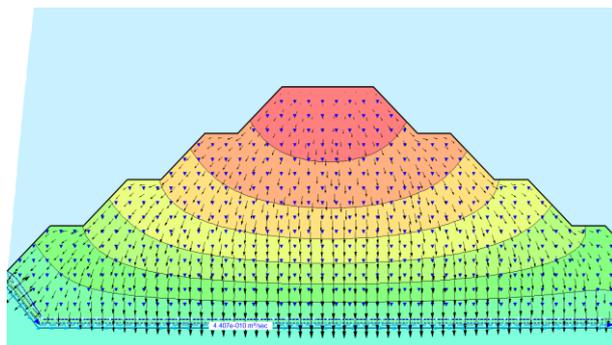
$$\text{Jari - jari} = 42,455 \text{ m}$$

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

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



Gambar 13. Grafik penentuan  $\Gamma_H$  dan  $\Gamma'_H$ .



Gambar 14. Hasil rembesan air lindi timbunan sampah dengan program bantu GeoStudio.

$$M_{pen.rencana} = M_{pendorong} \times SF_{rencana} \tag{1}$$

$$\Delta M_r = M_{pen.rencana} - M_{pen.eksisting} \tag{2}$$

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

$$N_{anchor} = \frac{\Delta M_r}{R \times \tan \phi} \tag{3}$$

Dimana:

$R$  = jari-jari bidang longsor (m)

$\phi$  = sudut geser ( $^{\circ}$ )

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

$$P_{mx} = \delta P_{ult} \times \tan \phi \tag{4}$$

Dimana:

$\delta$  = faktor keamanan

$\phi$  = 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  $P_{max} > P_{beban}$ , 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 [2] dan nilai  $c'$  sebesar 12,53 kN/m<sup>2</sup>. Berikut perumusan panjang *grouting* yang dibutuhkan.

$$L = \frac{P \times SF}{c \times D \times \pi} \tag{5}$$

Dimana:

$P$  = kapasitas maksimum angkur (kN)

$c$  = kohesi tanah (kN/m<sup>2</sup>)

Tabel 1.  
Nilai N-SPT Tanah TPA Karimunjawa

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

Tabel 2.  
Nilai N-SPT Tanah TPA Karimunjawa

Titik Bor	Depth (m)	N-SPT	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma'_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\phi$
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

Tabel 3.  
Rekapitulasi Momen Tekanan Tanah dan Air

P (kN)	Lengan (m)	Momen (kNm)
$P_{a1}$	37,112	4,4
$P_{a2}$	154,54	2,933
$P_{air}$	379,84	2,933

$D$  = 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 (Gambar 5), sehingga perkuatan lereng dengan beronjong dan angkur aman terhadap kelongsoran.

### C. 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:

$$\gamma_{sat} = 21,47 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma' = 11,66 \text{ kN/m}^3$$

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

$$\phi = 36^{\circ}$$

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

$$K_a = 0,42173$$

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

$$\sigma_v = \gamma \times h \tag{6}$$

$$\sigma_h = \sigma_v \times K_a \tag{7}$$

$$P_a = \sigma_h \times h \times l \tag{8}$$

Dimana:

$\gamma$  = berat volume (kN/m<sup>3</sup>)

Tabel 4.  
Nilai N-SPT Tanah TPA Karimunjawa

Area	b (m)	h (m)	A (m <sup>2</sup> )	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

\*ΣV: Total berat struktur & tanah urug (W) ΣW: Total momen penahan.

Tabel 5.  
Rekapitulasi Momen Tekanan Tanah dan Air

P (ton)	Lengan (m)	Momen (tonm)
Pa <sub>1</sub>	2,609	1,0333
Pa <sub>air</sub>	4,666	1,0333

Tabel 6.

Rekapitulasi Angka Keamanan Perkuatan Talud TPA Karimunjawa	
Jenis Perkuatan	Angka Keamanan
Terasing kemiringan 1:1,5	1,565
Berjong dengan anchor	1,581
Dinding penahan tanah	1,578
Soil nailing	1,65

$h$  = tebal lapisan tanah (m)

$K_a$  = 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 Gambar 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 [3].

1) Stabilitas terhadap geser

$$FS_{geser} = \frac{\sum v \times \tan \phi' + B \times c' + Pp}{Pa} \tag{9}$$

Dimana:

$\sum v$  = berat total struktur (kN)

$B$  = lebar kaki dinding (m)

$\phi$  = sudut geser (°)

$c$  = kohesi tanah (kN/m<sup>2</sup>)

$Pa$  = gaya aktif (kN)

$Pa$  = gaya pasif (kN)

$FS_{geser} = 1,059 < 1,5$  (NOT OK)

2) Stabilitas terhadap overturning

$$FS_{overturning} = \frac{\sum M_{penahan}}{\sum M_{pendorong}} \tag{10}$$

Dimana:

$\sum M_{penahan}$  = momen penahan (kNm)

$\sum M_{pendorong}$  = momen pendorong (kNm)

$FS_{overturning} = 5,442 > 2$  (OK)

3) Stabilitas terhadap daya dukung

$$FS_{bearing} = \frac{q_u}{q_{max}} \tag{11}$$

$$q_u = c \times N_c + q \times N_q + 0,5 \times \gamma \times B \times N_\gamma \tag{12}$$

$$q_{max} = \frac{\sum V}{B} \times \left(1 + \frac{6e}{B}\right) \tag{13}$$

$$e = \frac{\sum M}{\sum V} \tag{14}$$

Dimana:

$\sum M$  = total momen (kNm)

$\sum V$  = total berat (kN)

$c$  = kohesi tanah (kN/m<sup>2</sup>)

$q$  = beban merata di depan kaki dinding (kN/m<sup>2</sup>)

$B$  = lebar kaki dinding (m)

$e$  = eksentrisitas (m)

$N_c, N_q, N_\gamma$  = faktor daya dukung tanah [4]

$FS_{bearing} = 3,0074 > 3$  (OK)

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

$$T = \left(\frac{EI}{f}\right)^{\frac{1}{5}} \tag{15}$$

$$P_{max} = \frac{M_u}{F_m \times T} \tag{16}$$

$$n = \frac{\Delta M_r}{P_{max} \times R} \tag{17}$$

$$M_{pen.rencana} = M_{pendorong} \times SF_{rencana} \tag{18}$$

$$\Delta M_r = M_{pen.rencana} - M_{pen.eksisting} \tag{19}$$

Dimana:

$T$  = faktor kekakuan tiang (kg/cm<sup>2</sup>)

$E$  = modulus elastisitas tiang (MPa)

$I$  = inersia tiang (cm<sup>4</sup>)

$f$  = faktor modulus tanah (kg/cm<sup>3</sup>) [5]

$F_m$  = koefisien momen gaya lateral [6]

$P_{max}$  = gaya horizontal yang mampu dipikul 1 tiang (kN)

$n$  = jumlah cerucuk

Spesifikasi penulangan serta beton yang digunakan untuk dinding penahan tanah diperkuat cerucuk (Gambar 9) sebagai berikut.

1. Bagian badan dinding penahan tanah

Cover = 50 mm

Dtulangan = 25 mm

fy = 420 MPa

fc' = 35 MPa

Tulangan badan = 55 D25 – 140

2. Bagian *pile cap* dinding penahan tanah

Cover = 50 mm

Dtulangan = 25 mm

fy = 420 MPa

fc' = 35 MPa

Tulangan badan = 45 D30 – 250

3. Bagian cerucuk *bore pile* dinding penahan tanah

Cover = 50 mm

Dtulangan = 22 mm

fy = 420 MPa

fc' = 35 MPa

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 <i>Uplift</i> atau P (ton)	24,33	12,361	23,073
Berat Beton atau W (ton)	31,776	21,168	31,968
W > P	OK	OK	OK

\*OK: Struktur kolam aman terhadap gaya angkat atau *uplift*

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 <i>Uplift</i> 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

\*OK: Struktur kolam aman terhadap gaya angkat atau *uplift*

D. 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.

$$R_T = 0,25 \times d^2 \times f_y \times \pi \tag{20}$$

Dimana:

$d$  = diameter *nails* (mm)

$f_y$  = mutu *nails* (MPa)

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

Berdasarkan hasil perhitungan perkuatan di atas, dapat diperoleh tabel rekapitulasi angka keamanan perkuatan talud TPA Karimunjawa yang dapat dilihat pada Tabel 6.

V. PERENCANAAN STRUKTUR KOLAM IPL

A. Tekanan Aktif Tanah dan Gaya *Uplift*

Data tanah:

$$\gamma_{sat} = 1,474 \text{ ton/m}^3$$

$$\gamma' = 1,474 - 0,981 = 0,493 \text{ ton/m}^3$$

$$\phi = 36^\circ$$

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

$$K_a = 0,556$$

Data kolam:

Panjang = 2 meter

Lebar = 4 meter

Tinggi = 3,1 meter

Tebal dinding = 0,3 meter

Tebal pelat = 0,3 meter

Persamaan perhitungan tekanan aktif tanah sebagai berikut:

$$\sigma_v = \gamma \times h \tag{21}$$

$$\sigma_h = \sigma_v \times K_a \tag{22}$$

$$P_a = \sigma_h \times h \times 1 \tag{23}$$

Dimana:

$\gamma$  = berat volume (kN/m<sup>3</sup>)

$h$  = tebal lapisan tanah (m)

$K_a$  = koefisien tekanan aktif

Diagram beserta hasil rekapitulasi tekanan tanah dan air aktif dapat dilihat pada Gambar 11 serta Tabel 5. 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:

$$W = \gamma_{beton} \times V_{beton} \quad (24)$$

$$\sigma_{air} = \gamma_{air} \times h_{air} \quad (25)$$

$$P_{air} = \sigma_{air} \times A \quad (26)$$

Dimana:

h = tinggi air di dalam tanah (m)

A = Luas dasar kolam

### B. 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 <sub>tulangan</sub>	= 13 mm
D <sub>tulangan pembagi</sub>	= 8 mm
f <sub>y</sub>	= 390 MPa
f <sub>c'</sub>	= 25 MPa
Tulangan dinding	= 8 D13 – 120
Tulangan pembagi	= 5 D8 - 150

### C. Desain Struktur Pelat Dasar Kolam IPL

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 <sub>tulangan</sub>	= 13 mm
f <sub>y</sub>	= 390 MPa
f <sub>c'</sub>	= 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 dan Tabel 8).

## VI. PERENCANAAN ZONA LANDFILL

### A. 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:

$\gamma_{sampah}$	= 8 kN/m <sup>3</sup>
c	= 6 kN/m <sup>2</sup>
$\phi$	= 30 <sup>o</sup>
Kemiringan	= 1:1
Lebar timbunan	= 53 meter

Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan program bantu GeoStudio diperoleh angka keamanan terhadap longsor sebesar 1,554 (Gambar 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:

$\gamma_{sat}$	= 21,47 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_t$	= 18,3 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma'$	= 21,47 – 9,81 = 11,66 kN/m <sup>3</sup>
c	= 0 kN/m <sup>2</sup>

$$E = 69.000 \text{ kN/m}^2 = 690 \text{ t/m}^2$$

$$Cv = 0,028 \text{ cm/s (Tabel Biarez)}$$

$$a = \frac{1}{2} \times (53 + (20.1)) = 36,5 \text{ meter (tan } 45 = 1)$$

$$a' = 53 \times \frac{1}{2} = 26,5 \text{ meter}$$

$$\Gamma_H = 0,547 \text{ (Gambar 13)}$$

$$\Gamma'_H = 0,26 \text{ (Gambar 13)}$$

### 1) Kontrol penurunan tanah dasar

$$S_i = \frac{\gamma_{dry} \times H_1}{E} \times \frac{a^2}{a-a'} \left[ \Gamma_H - \left( \frac{a'}{a} \right)^2 \Gamma'_H \right] \quad (27)$$

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

### 2) Kontrol daya dukung tanah dasar

$$FS_{bearing} = \frac{q_u}{q_{max}} \quad (28)$$

$$q_u = c \times N_c + q \times N_q + 0,5 \times B \times N_\gamma \times \gamma \quad (29)$$

$$q_{max} = \gamma_{sampah} \times B \quad (30)$$

Dimana:

c = kohesi tanah (kN/m<sup>2</sup>)

q = beban merata di depan kaki dinding (kN/m<sup>2</sup>)

B = lebar bagian dasar timbunan sampah (m)

N<sub>c</sub>, N<sub>q</sub>, N<sub>γ</sub> = faktor daya dukung tanah [4]

FS<sub>bearing</sub> = 9,63 > 3 (OK)

### B. 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 4,407E-10 m/s (Gambar 14), dimana angka tersebut lebih kecil dari persyaratan (< 10<sup>-6</sup> cm/det) [7].

## VII. KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan pada Bab 3, dapat disimpulkan mengenai perencanaan TPA Karimunjawa sebagai berikut: (1) Berdasarkan hasil analisis dengan program bantu, diperoleh angka keamanan sebesar 0,531 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 angkur, 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 Karimunjawa dengan *controlled landfill* meliputi tinggi timbunan sampah dengan tinggi rencana 20 meter, pelapisan dasar zona landfill, dan kolam pengolahan lindi; (5) Perbandingan perencanaan TPA Karimunjawa oleh Kementerian PUPR dengan perencanaan alternatif terdapat perbedaan pada perkuatan talud. Perkuatan talud yang direncanakan oleh Kementerian PUPR hanya menggunakan terasering dengan angka keamanan sebesar 0,531, sehingga

diperlukan suatu alternatif perkuatan talud.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. E. Bowles, *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*. Jakarta: Erlangga, 1984.
- [2] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2017.
- [3] B. M. Das, *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis)*, 1 st. Jakarta: Erlangga, 1998.
- [4] H. Wahjudi, *Daya Dukung Pondasi Dalam*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 1999.
- [5] J. P. Jones, *Foundation and Earth Structures*. Virginia: Naval Facilities Engineering Command, 1986.
- [6] J. P. Jones, *Soil Mechanics*. Virginia: Naval Facilities Engineering Command, 1986.
- [7] Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia, *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 03/PRT/M/2013 Tentang Penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Persampahan dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 2013.