

ANALISIS STABILITAS STRUKTUR PELINDUNG PANTAI BATU BRONJONG

Olga P., Kanjalia T., Asriwiyanti D., Hanny J.D., Angga R.Pratama

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha

Jalan Prof. drg. Suria Sumantri, MPH., No. 65, Bandung, 40164

E-mail: olga.pattipawaej@gmail.com

ABSTRAK

Pemanasan global mengakibatkan pertambahan volume air laut sehingga terjadi kenaikan elevasi muka air laut. Kenaikan muka air laut yang terus-menerus menjadi ancaman abrasi dan erosi bagi pulau-pulau kecil di Indonesia terutama di daerah tepi pantai. Struktur pelindung pantai yang kuat dan stabil untuk menangani abrasi dan erosi ini akan dianalisis sehingga dapat meredam kekuatan gelombang secara efektif. Struktur pelindung pantai menggunakan material yang mudah diperoleh di Indonesia, yaitu batu pecah dengan menggunakan bronjong. Pada tulisan ini struktur pelindung pantai yang terletak di pantai Bengkulu akan dievaluasi. Tekanan tanah aktif dan tekanan hidrostatis akan diikutsertakan dalam gaya-gaya yang bekerja pada struktur pelindung pantai batu bronjong. Analisis stabilitas struktur pelindung pantai dihitung dengan menganalisa gaya guling, gaya geser, serta daya dukung tanah. Analisis stabilitas struktur pelindung pantai batu bronjong ditinjau untuk dua kasus, yaitu kondisi tidak terjadi kenaikan muka air laut (normal) dan kondisi terjadi kenaikan muka air laut akibat pemanasan global. Hasil analisis stabilitas struktur pelindung pantai batu bronjong memberikan faktor keamanan berada dalam kondisi stabil dan aman. Berdasarkan analisis kestabilan struktur pelindung pantai ini, diharapkan dapat mengurangi tingkat kerusakan struktur-struktur tepi pantai dan bangunan lain di sekitarnya.

Kata kunci: struktur pelindung pantai, batu bronjong, analisis stabilitas geoteknik, kenaikan muka air laut.

1. PENDAHULUAN

Suhu permukaan bumi secara global telah mengalami kenaikan sekitar $0,74^{\circ}\text{C}$ antara awal dan akhir abad ke-20. Perubahan ini berpengaruh besar terhadap iklim bumi. Kenaikan suhu ini mengakibatkan dua hal utama yang terjadi di lapisan atmosfer paling bawah, yaitu fluktuasi curah hujan yang tinggi dan kenaikan muka air laut. Pada pertengahan abad ke-20, penyebaran panas menyebabkan kenaikan permukaan air laut setinggi 2,5 cm. Berdasarkan pengukuran yang dilakukan sejak 1993-2003, laju peningkatan permukaan air laut rata-rata adalah 3,1 mm/tahun (Bindoff et. al., 2007).

Naiknya permukaan air laut akibat pemanasan global, mengakibatkan garis pantai melebar dan terjadi erosi. Erosi air laut secara terus-menerus oleh gelombang laut dan arus laut merusak dinding pantai. Dampak dari erosi pantai ini adalah menipisnya lapisan permukaan tanah bagian atas, yang akan menyebabkan menurunnya kemampuan lahan (degradasi lahan).

Metode penanggulangan erosi pantai adalah dengan membuat struktur pelindung pantai, dimana struktur tersebut berfungsi sebagai peredam energi gelombang pada lokasi tertentu. Struktur pelindung pantai terbaik untuk pengelolaan dan perlindungan garis

pantai adalah dengan cara membuat situasi dimana garis pantai berorientasi secara paralel terhadap garis puncak gelombang datang, sehingga meminimalkan angkutan sedimen transport sepanjang pantai dan menciptakan pola pantai yang setimbang.

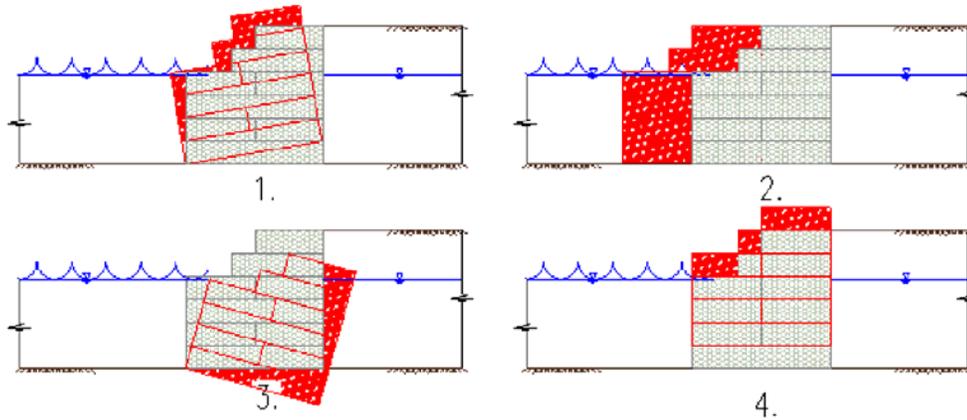
Kerusakan serta longsornya tanah di daratan pinggiran pantai serta menjadikan bangunan yang berada di daerah pantai tetap aman dan stabil, meskipun naiknya permukaan air laut oleh pemanasan global dapat dihindari, yaitu dengan membuat struktur pelindung pantai. Tujuan penelitian ini memberikan penyelesaian kestabilan struktur pelindung akibat erosi pantai serta kenaikan permukaan laut dengan menggunakan material yang mudah didapat dan ekonomis.

Untuk memfokuskan penelitian maka pembahasan dibatasi sebagai berikut: studi kasus struktur pelindung pantai pada tulisan ini menggunakan dinding penahan tanah bertipe bronjong. Spesifikasi bronjong kawat sesuai SNI 03-0090-1999: batu pecah berukuran antara 15 cm – 25 cm (toleransi 5%) digunakan di dalam bronjong; tekanan ke arah samping (lateral) diperhitungkan dalam menghitung kestabilan dinding penahan; pemadatan tanah tertahan di belakang dinding penahan merupakan penyebab keruntuhan diasumsikan dalam kondisi stabil; Jenis tanah di sekitar pantai Bengkulu yang digunakan berdasarkan data dari PUSLITBANG Balai Pantai.gaya gempa dan tsunami tidak diperhitungkan.

2. STABILITAS GEOTEKNIK

Stabilitas geoteknikal ditentukan oleh gaya horizontal dan vertikal dari tanah dan air (Verruijt, 2004). Dengan adanya perhitungan mekanika tanah, maka dapat mengetahui apakah bangunan sesuai dengan stabilitas yang diinginkan (Braja, 2006). Hal ini ditentukan oleh daya tahan terhadap kesalahan mekanisme:

1. Stabilitas terhadap guling (*overturning*)
2. Stabilitas terhadap geser (*sliding*)
3. Stabilitas terhadap daya dukung tanah (*bearing capacity*)
4. Stabilitas terhadap daya angkat (*uplifting*)



Gambar 1. Kesalahan Mekanisme Pada Dinding Pelindung Pantai.

Gambar 1 menjelaskan sebagai berikut :

1. Stabilitas terhadap guling (*overturning*)

Tekanan pada setiap sisi menyebabkan bangunan cenderung berotasi pada bangunan kaki. Perubahan momen gerak disebabkan oleh tekanan tanah pada satu sisi, sementara tekanan vertikal pada bangunan dan tekanan tanah pada sisi lain menginduksi momen tentang.

$$2 \leq FS_{(guling)} = \frac{\sum MR + Mh}{\sum Mo + \rho \cdot g \cdot h \left(\frac{1}{3} h \right)} \leq 3 \quad (1)$$

dimana,

MR = Perubahan momen tahan di sekeliling bangunan kaki

Mo = Perubahan momen gerak di sekeliling bangunan kaki

Mh = Gaya hidrostatik

2. Stabilitas terhadap geser (*sliding*)

Tanah yang 'mendorong' bangunan ke sisi lain. Tekanan tanah ini adalah gaya gerak yang mengakibatkan longsor di dasar tanah. Tekanan tanah pada sisi lain dan potongan antara bangunan dan tanah adalah gaya tentang.

$$FS_{(geser)} = \frac{\sum V \cdot \tan(k_1 \cdot \phi_3) + B \cdot k_2 \cdot c_3 + Ph}{Pa \cdot \cos \alpha + \rho \cdot g \cdot h} \geq 1,5 \quad (2)$$

dimana,

$\sum V$ = berat total pelindung pantai

Pa = tekanan tanah aktif

Ph = tekanan airlaut

α = sudut geser dalam

c = kohesi (kg/m²)

$$\frac{1}{2} \leq k_1, k_2 \leq \frac{2}{3} \#$$

α = kemiringan dinding terhadap bidang horizontal

3. Stabilitas terhadap daya dukung tanah (*bearing capacity*)

Tanah yang berada di bawah bangunan dapat turun karena ketidakstabilan gaya residual, seperti kapasitas tahanan bisa terjadi lebih rendah dari nol pada kaki. Dalam kasus ini, hal ini dapat menjadi tekanan di bagian atas, 'tidak stabil' pada satu sisi bangunan. Pada awal estimasi untuk keamanan hal ini telah diperhitungkan maka untuk itu gaya residual pada bangunan harus diperhatikan:

$$FS_{(daya\ dukung\ tanah)} = \frac{q_u}{q_{max}} \geq 3 \quad (3)$$

dimana:

q_u = tekanan *ultimate* (kg/m²)

q_{max} = tekanan maksimum (kg/m²)

4. Stabilitas terhadap daya angkat (*uplifting*)

Tekanan air di bawah bangunan menginduksi tekanan di atasnya. Tekanan di atas ini adalah gaya gerak untuk mengangkat bangunan ke atas. Tanpa pondasi tiang, gaya tekan hanya terdiri dari berat bangunan saja:

$$FS_{(gaya\ angkat)} = \frac{\sum Vr}{\sum Vd} \geq 1,5 \quad (4)$$

dimana,

$\sum Vr$ = gaya tahan vertikal

$\sum Vd$ = gaya gerak vertical.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Bronjong Kawat

Struktur pelindung pantai menggunakan material batu bronjong. Bronjong kawat adalah kotak yang terbuat dari anyaman kawat baja berlapis seng yang pada

penggunaannya diisi batu-batu untuk pencegah erosi yang dipasang pada tebing tebing, tepi-tepi sungai, yang proses penganyamannya menggunakan mesin. Acuannya adalah SNI 03-0090-1987 tentang Mutu dan Cara Uji Bronjong dan Kawat Bronjong, dan syarat bahan baku mengacu pada SNI 03-6154-1999 tentang kawat bronjong. Material batu yang akan dipakai untuk Bronjong Kawat Pabrikasi dan Bronjong harus terdiri dari batu yang bersih, keras dan dapat tahan lama, berbentuk bulat atau persegi. Ukuran batu yang diijinkan untuk digunakan adalah antara 15 cm sampai 25 cm (toleransi 5%) dan sekurang-kurangnya 85% dari batuan yang digunakan harus mempunyai ukuran yang sama atau lebih besar dari ukuran tersebut serta tidak boleh ada batuan yang diijinkan melewati lubang anyaman.

3.2 Kondisi Hidraulis

Kondisi gelombang sangat bergantung pada fitur batimetri lepas pantai sebagai batas daratan, pulau lepas pantai dan kedalaman air. Gelombang ini dapat diciptakan oleh angin lokal (keadaan laut) atau gelombang besar dan karakteristiknya berubah sesuai dengan perambatannya pada air dangkal. Iklim gelombang di area dekat pantai ditentukan oleh iklim gelombang lepas pantai.

Data angin untuk prediksi gelombang secara normal didapat melalui cara observasi langsung melalui *fetch* (daerah pembentukan gelombang) yang diasumsikan memiliki kecepatan dan arah angin yang relative konstan dari pengamatan di darat. Arah dan kecepatan maksimum angin harian akan digunakan untuk memprediksi tinggi dan perioda gelombang maksimum yang dapat dibangkitkan angin dalam perioda ulang waktu tertentu. Dalam tulisan ini penghitungan gelombang (yang dibangkitkan angin) dilakukan dengan cara hindcasting berdasarkan formulasi yang tersusun di dalam buku *Shore Protection Manual, Departement of The Army, Coastal Engineering Reseach Center* (1984).

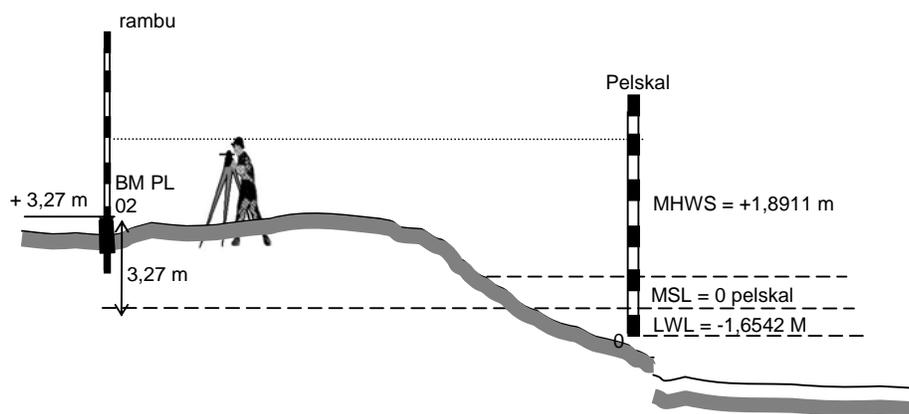
Prinsip dasar metode ini adalah mengestimasi tinggi dan perioda gelombang yang dihitung dari data angin dan *fetch* efektif dengan menggunakan metoda empiris, tinggi dan perioda gelombang. Dalam perhitungan ini digunakan kecepatan angin maksimum, yang dimaksudkan untuk menganalisis kondisi-kondisi ekstrim dari gelombang. Arah angin dinyatakan dari arah datangnya angin. Hal ini diperlakukan sama terhadap gelombang, dimana gelombang dinyatakan dari arah datangnya gelombang.

Tinggi gelombang merupakan tinggi gelombang lepas pantai. Sebelum mencapai pantai, gelombang tersebut mengalami proses refraksi (perubahan arah gelombang) dan *shoaling* (perubahan panjang dan tinggi gelombang). Selain itu, gelombang tersebut pada

kedalaman tertentu mengalami fase pecah gelombang sebelum mencapai pantai, sehingga gelombang di pantai lebih kecil dari pada gelombang di lepas pantai. Untuk keperluan perencanaan dapat digunakan formula tinggi gelombang pecah.

Pasang surut merupakan fenomena fisika oseanografi yang perlu dipelajari dalam upaya memahami pola sirkulasi massa air laut. Parameter pasang surut ini umumnya menentukan gerakan air dalam periode tengah harian sampai harian, tergantung pada tipe pasang surut yang terjadi pada perairan tersebut. Observasi pasut jangka panjang (~30 tahun) dapat memberikan data yang sangat reliabel dan akurat untuk fluktuasi permukaan air termasuk bulanan, musiman dan variasi tahunan. Data pasut yang kurang akurat dapat terjadi dalam pengumpulan *set* konstituen pasut dari Tabel Pasut Indonesia (ITT), database IHO atau *Admiralty Tide Tables* (ATT). Namun, pasut ini hanya terdiri dari konstituen utama yang berkontribusi terhadap sinyal pasut dan hanya tersedia untuk lokasi tertentu seperti pelabuhan utama dan kota-kota besar yang terletak di sepanjang pantai. Umumnya, fluktuasi musiman dan tahunan dari sinyal pasut tidak dapat diderivasi tersendiri dari konstituen ini.

Selanjutnya dengan melakukan levelling pengikatan nol pelskal terhadap patok BM pengukuran topografi diperoleh elevasi pasang surut. Gambar pengikatan nol pelskal seperti pada Gambar 2. Hasil pengamatan pengukuran pasang surut digunakan juga untuk menentukan elevasi muka air HHWL (*Highest High Water Level*), MSL (*Mean Sea Level*) dan LLWL (*Lowest Low Water Level*). Berdasarkan data hasil pengamatan, dibuat peramalan karakteristik tinggi muka air di lokasi pantai Bengkulu dengan elevasi seperti pada Tabel 1.



Gambar 2. Pengikatan Nol Pelskal Terhadap BM.

Tabel 1. Karakteristik Elevasi Muka Air.

Kondisi Muka Air	Elevasi (m)
Highest High Water Level (HHWL)	2,2966
Mean High Water Spring (MHWS)	1,8911
Mean High Water Neap (MHWN)	0,8025
Mean Sea Level (MSL)	0
Mean Low Water Neap (MLWN)	-0,8121
Mean Low Water Spring (MLWS)	-1,1410
Lowest Low Water Level (LLWL)	-1,6540

3.3 Kondisi Tanah

Pada analisis stabilitas geoteknik struktur pelindung pantai adalah analisis terhadap bahaya terguling, kuat dukung, terangkat dan tergeser. Bentuk penampang struktur pada dasarnya harus aman terhadap limpasan dan aman terhadap gaya yang bekerja. Bentuk struktur perlu mempertimbangkan terhadap kondisi tanah. Tabel 2 adalah hasil pendugaan sondir di Pantai Bengkulu yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 2. Hasil Pendugaan Sondir.

Kedalaman (m)	Jenis Lapisan	Perlawanan konus (qc) kg/cm ²	Kekuatan
0,00 – 1,40	Pasir halus	11,64 – 24,25	Sedang
1,40 – 3,80	Pasir sedang	32,98 – 72,75	Padat
3,80 – 6,40	Pasir kasar	118,24 – 195,94	Sangat padat

4. ANALISI DAN PEMBAHASAN

Pada bagian awal akan menjelaskan desain struktur pelindung pantai dengan batu bronjong. Data lapangan Pantai Bengkulu digunakan untuk mendesain struktur pelindung pantai ini. Analisis kestabilan geoteknik struktur pelindung pantai dengan batu bronjong melingkupi analisis stabilitas terhadap guling (*overturning*), analisis stabilitas terhadap geser (*sliding*), dan analisis stabilitas terhadap daya dukung tanah (*bearing capacity*). Analisis stabilitas terhadap gaya angkat (*uplifting*) tidak diikutsertakan dalam tulisan ini, karena gaya gelombang air laut telah diserap oleh struktur batu bronjong tersebut.

4.1. Desain Struktur Pelindung Pantai dengan Batu Bronjong

Elevasi muka air laut rencana merupakan parameter sangat penting di dalam perencanaan struktur pelindung pantai. Elevasi tersebut merupakan penjumlahan dari beberapa parameter, seperti tinggi *run-up*, tinggi kebebasan, dan tinggi muka air laut tertinggi, serta kenaikan muka air karena perubahan suhu global. Gelombang dominan dari kedalaman di Pantai bengkulu muncul dari arah Selatan untuk periode ulang 25 tahun dan tingginya adalah 5,52 meter. Untuk mendapatkan nilai tinggi gelombang (H) desain untuk kondisi di daerah bibir pantai dengan kondisi gelombang sudah pecah adalah

$$H = 0,78 \times d = 1,56 \text{ meter}$$

dan panjang gelombang (L_0) di lokasi struktur pelindung pantai adalah

$$L_0 = 1,56 \times T_s^2 = 188,76 \text{ meter}$$

dimana d adalah tinggi air laut rata-rata dan T adalah perioda ulang gelombang.

Tinggi rayapan gelombang untuk menentukan nilai *run-up* gelombang diperoleh dengan menggunakan rumus Iribaren:

$$I_r = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} = \frac{\tan(45^\circ)}{\sqrt{\frac{1,56}{188,76}}} = 11$$

dimana θ adalah sudut kemiringan sisi struktur pelindung pantai (1:2).

Dengan menggunakan grafik *run-up* gelombang (Gambar 3) diperoleh:

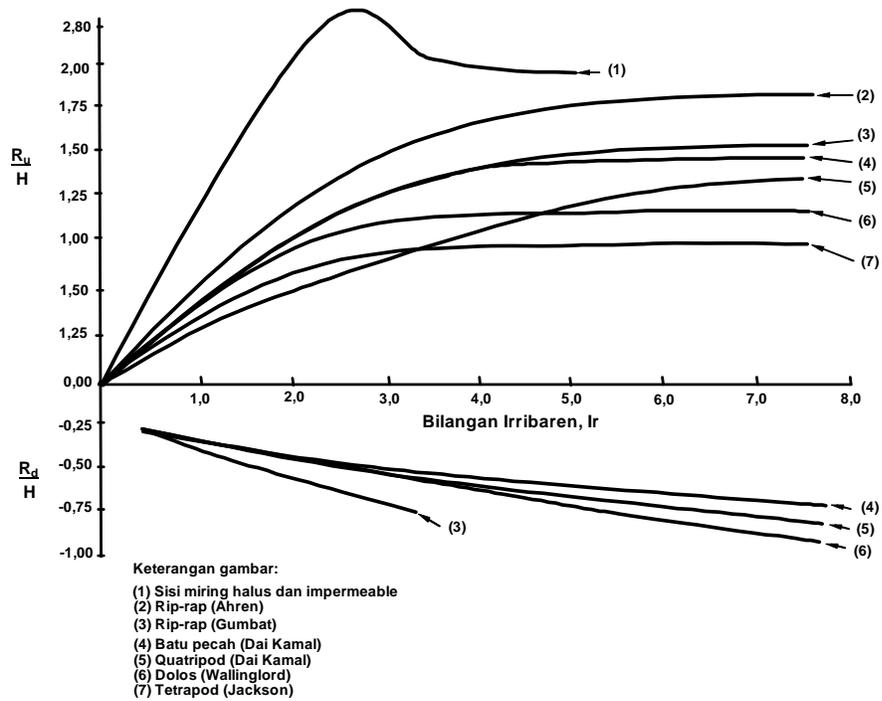
$$\frac{R_u}{H} = 0,85 \text{ atau } R_u = 0,85 \times 1,56 = 1,326 \text{ meter.}$$

Nilai *run-up* gelombang (R_u) yang digunakan adalah 1,4 meter.

Kemudian menentukan elevasi muka air rencana sebagai berikut:

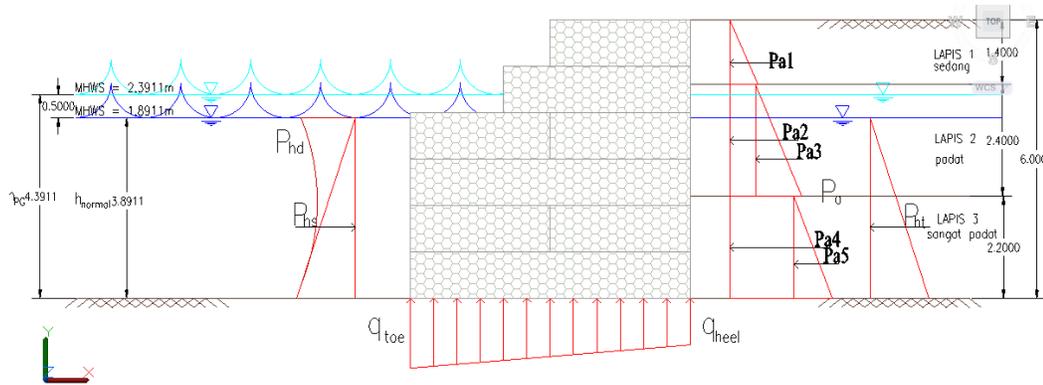
$$\text{Elevasi puncak} = \text{HHWL} + R_u + \text{Tinggi jagaan} = 4,00 \text{ meter}$$

atau + 4,00 (MSL, *mean sea level*) dimana HHWL adalah muka air tertinggi (*highest high water level*) = 2,3 meter, dan tinggi jagaan atau *freeboard* adalah 0,3 meter.



Gambar 3. Run-up Gelombang.

Tinggi struktur pelindung pantai dengan batu bronjong yang akan diteliti adalah 6 meter dan lebar dasar struktur (B_p) adalah 6 meter dan lebar bagian atas (B_a) struktur pelindung pantai ini adalah 2 meter. Desain struktur pelindung pantai dengan batu bronjong dapat dilihat pada Gambar 4, dimana P_h adalah tekanan yang disebabkan oleh gelombang merupakan gabungan dari tekanan hidrostatik dan tekanan dinamis, P_a merupakan tekanan tanah aktif yang terdiri dari 3 lapisan tanah, P_{ht} adalah tekanan hidrostatik dalam tanah, q_{heel} adalah tegangan maksimum berat struktur, dan q_{toe} tegangan minimum berat struktur.



Gambar 4. Struktur Pelindung Pantai Batu Bronjong.

4.2 Analisis Stabilitas terhadap Guling

Struktur pelindung pantai dengan batu bronjong ini terdiri dari 3 lapisan tanah, yaitu lapis 1 untuk tanah berkekuatan sedang, lapis 2 untuk tanah berkekuatan padat, dan lapis 3 untuk tanah berkekuatan sangat padat. Grafik korelasi tahanan ujung dan kedalaman untuk mendapatkan nilai ϕ diperoleh dari Durgunoglu dan Mitchell (1975). Tabel 4.1 menunjukkan data tanah untuk setiap lapisan yang diketahui.

Tabel 3. Data Tanah.

Lapisan tanah	Kedalaman (m)	ϕ (°)	$\gamma = \gamma_{sat}$ (kg/m ³)	c (kg/m ²)
1	1,4	38,0	1840	0
2	1,4 - 3,8	40,0	1900	0
3	3,8 - 6,4	42,5	1960	0

Langkah selanjutnya adalah menghitung tekanan tanah aktif, yang dihitung dengan 3 lapisan tanah yang berbeda. Perhitungan tekanan tanah aktif untuk setiap lapisan tanah bergantung kepada K_a merupakan koefisien tekanan tanah aktif, γ adalah berat volume tanah, H_t adalah tinggi tanah, dan P_a merupakan tekanan tanah aktif.

Untuk lapisan tanah 1:

$$K_{a1} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) = 0,238$$

dan

$$K_{a1} \gamma_1 H_{t1} = 613,088 \text{ kg/m}^2$$

Sehingga tekanan tanah aktif untuk lapisan 1 diperoleh

$$P_{a1} = \frac{1}{2} K_{a1} \gamma_1 Ht_1^2 = 429,162 \text{ kg/m}$$

Untuk lapisan tanah 2:

$$K_{a2} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) = 0,217$$

dan

$$K_{a2} \gamma_1 Ht_1 = 558,994 \text{ kg/m}^2$$

serta

$$K_{a2} \gamma_2 Ht_2 = 989,540 \text{ kg/m}^2$$

Sehingga tekanan tanah aktif pada lapisan tanah ke dua diperoleh

$$P_{a2} = K_{a2} \gamma_1 Ht_1 Ht_2 = 1341,581 \text{ kg/m}$$

dan

$$P_{a3} = \frac{1}{2} K_{a2} \gamma_2 Ht_2^2 = 1187,424 \text{ kg/m}$$

Untuk lapisan tanah 3:

$$K_{a3} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) = 0,193$$

dan

$$K_{a3} [\gamma_1 Ht_1 + \gamma_2 Ht_2] = 1377,248 \text{ kg/m}^2$$

serta

$$K_{a3} \gamma_3 Ht_3 = 832,216 \text{ kg/m}^2$$

Sehingga tekanan tanah aktif untuk lapisan tanah ke tiga didapat

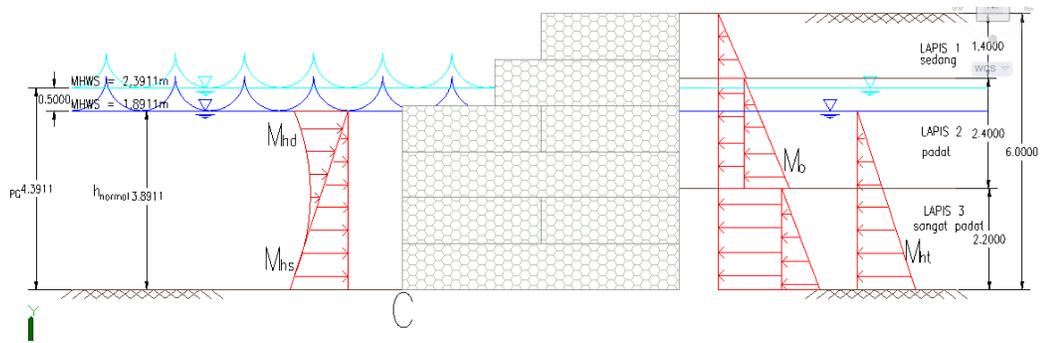
$$P_{a4} = K_{a3} [\gamma_1 Ht_1 + \gamma_2 Ht_2] Ht_3 = 3029,945 \text{ kg/m}$$

dan

$$P_{a5} = \frac{1}{2} K_{a3} \gamma_3 Ht_3^2 = 915,437 \text{ kg/m}$$

Tekanan tanah aktif total diperoleh sebagai berikut:

$$\sum_{i=1}^5 P_{ai} = P_{a1} + P_{a2} + P_{a3} + P_{a4} + P_{a5} = 6903,549 \text{ kg/m}$$



Gambar 5. Perubahan Momen.

Kemudian menentukan perubahan momen dapat dilihat ilustrasinya pada Gambar 5. Sehingga dapat dilakukan serangkaian perhitungan perubahan momen sebagai berikut:

$$M_{o1} = P_{a1} \left(\frac{Ht_1}{3} + 4,6 \right) = 2174,421 \text{ kg},$$

$$M_{o2} = P_{a2} \left(\frac{Ht_2}{2} + 2,2 \right) = 4561,375 \text{ kg},$$

$$M_{o3} = P_{a3} \left(\frac{Ht_2}{3} + 2,2 \right) = 3562,272 \text{ kg},$$

$$M_{o4} = P_{a4} \left(\frac{Ht_3}{2} \right) = 3332,940 \text{ kg},$$

dan

$$M_{o5} = P_{a5} \left(\frac{Ht_3}{3} \right) = 671,320 \text{ kg}.$$

Sehingga diperoleh total perubahan momen gerak di sekeliling bangunan kaki:

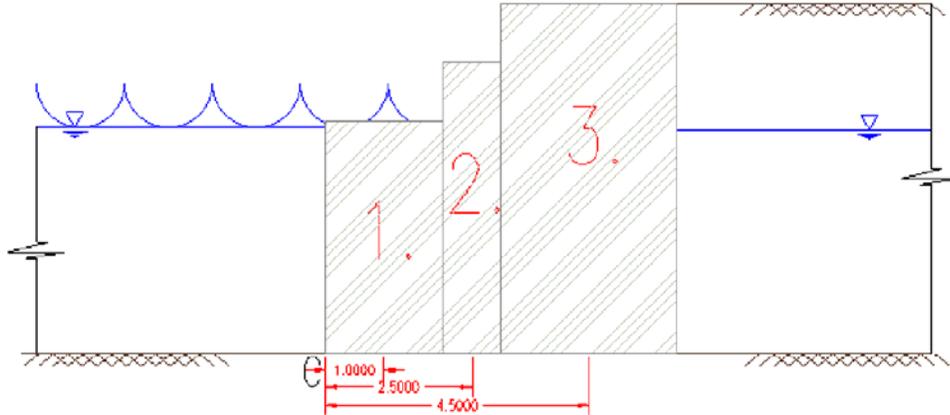
$$\sum_{i=1}^5 M_{oi} = M_{o1} + M_{o2} + M_{o3} + M_{o4} + M_{o4} = 14302,328 \text{ kg}$$

Langkah selanjutnya mencari berat dan lengan momen pusat area terhadap titik C dari struktur pelindung pantai dengan batu bronjong. Berat struktur diperoleh berdasarkan material yang digunakan, yaitu batu bronjong dengan $\gamma_{\text{batu pecah}}$ sebesar 1450 kg/m^3 dan

$\gamma_{\text{kawat bronjong}}$ sebesar $13,5 \text{ kg/m}^3$ sehingga

$$\gamma_{\text{batu bronjong}} = \gamma_{\text{batu pecah}} + \gamma_{\text{kawat bronjong}} = 1450 + 13,5 = 1463,5 \text{ kg/m}^3.$$

Gambar 4.5 memperlihatkan pembagian area bidang 1, 2, dan 3 untuk mempermudah penentuan lengan momen pusat area terhadap titik C. Berat dan momen untuk setiap area bidang 1,2, dan 3 serta berat dan momen total dapat dilihat pada Tabel 4.2. Momen yang dihitung adalah momen per unit satuan panjang, dalam hal ini satuannya adalah berat.



Gambar 6. Lengan Momen Pusat Area terhadap Titik C.

Tabel 4. Berat dan Momen Tahanan.

No.	Area(m ²) A	Berat (kg/m) $W = \gamma \times A$	Jarak dari titik C(m) D	Momen (kg) $MR = W \times d$
1	2x4 = 4	11708	1	11708
2	1x5 = 5	7317,5	2,5	18293,75
3	3x6 = 12	26343	4,5	118543,5
		$\sum_{i=1}^3 V = 45368,5$		$\sum_{i=1}^3 MR = 148545,25$

Setelah mendapatkan momen dari struktur pelindung pantai batu bronjong, langkah selanjutnya menghitung momen akibat beban air. Momen akibat beban air merupakan momen dari gelombang air yang terdiri dari momen hidrostatik dan momen dinamis, dimana momen hidrostatik dinyatakan sebagai $M_{hs(normal)}$ untuk kondisi air laut normal, $M_{hs(PG)}$ momen hidrostatik untuk kondisi air laut yang naik akibat pemanasan global, momen dinamis untuk kondisi air laut normal adalah $M_{hd(normal)}$, dan momen dinamis untuk kondisi kenaikan muka air lalu akibat pemanasan global adalah $M_{hd(PG)}$. Momen

akibat gelombang air dibedakan atas dua kasus, yaitu kasus untuk kondisi air laut normal ($M_{h(\text{normal})}$) dan kasus untuk kondisi kenaikan muka air laut akibat pemanasan global ($M_{h(\text{PG})}$). Sehingga diperoleh

$$M_{hs(\text{normal})} = \rho g h \left(\frac{1}{3} h_{(\text{normal})} \right) = 50943,271 \text{ kg},$$

$$M_{hs(\text{PG})} = \rho g h \left(\frac{1}{3} h_{(\text{PG})} \right) = 64876,692 \text{ kg},$$

$$M_{hd(\text{normal})} = \frac{\rho g H^2 L}{16T} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) = 52454,295 \text{ kg},$$

$$M_{hd(\text{PG})} = \frac{\rho g H^2 L}{16T} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) = 52322,566 \text{ kg},$$

$$\text{dimana } k = \frac{2\pi}{L_0} = \frac{2\pi}{188,76} = 0,033$$

$$M_{h(\text{normal})} = M_{hs(\text{normal})} + M_{hd(\text{normal})} = 105781,426 \text{ kg},$$

dan,

$$M_{h(\text{PG})} = M_{hs(\text{PG})} + M_{hd(\text{PG})} = 117199,258 \text{ kg}.$$

Perhitungan stabilitas terhadap guling adalah sebagai berikut:

Untuk kondisi muka air laut normal:

$$FS_{\text{guling}(\text{normal})} = \frac{\sum_{i=1}^3 MR + M_{h(\text{normal})}}{\sum_{i=1}^5 M_{oi} + M_{s(\text{normal})}} = 3,89$$

Untuk kondisi naiknya muka air laut akibat pemanasan global:

$$FS_{\text{guling}(\text{PG})} = \frac{\sum_{i=1}^3 MR + M_{h(\text{PG})}}{\sum_{i=1}^5 M_{oi} + M_{s(\text{PG})}} = 3,356$$

Faktor keamanan stabilitas terhadap guling adalah $2 \leq FS_{\text{guling}(\text{normal})} = 3,89$ dan $2 \leq FS_{\text{guling}(\text{PG})} = 3,356$. Hasil menunjukkan struktur pelindung pantai dengan batu bronjong stabil terhadap guling baik dalam kondisi muka air laut normal maupun kondisi saat kenaikan muka air laut akibat pemanasan global.

4.3 Analisis Stabilitas terhadap Geser

Untuk perhitungan stabilitas terhadap geser, dipengaruhi oleh tekanan yang diakibatkan oleh gelombang air laut yang terdiri dari tekanan hidrostatis dan tekanan dinamis. Dalam hal ini tekanan yang diakibatkan oleh gelombang juga dihitung untuk kondisi muka air normal ($P_{h(normal)}$) dan kondisi kenaikan muka air laut akibat pemanasan global ($P_{h(PG)}$), yaitu

$$P_{h(normal)} = \rho \cdot g \cdot h + \left(\frac{\rho \cdot g \cdot H}{2} \right) \frac{\cosh.k.(h + h)}{\cosh.k.h} = 47345,354 \text{ kg/m}$$

dan,

$$P_{h(PG)} = 52438,500 \text{ kg/m}$$

Gaya pasif pada umumnya diabaikan dalam menghitung faktor keamanan terhadap geser.

Faktor keamanan stabilitas geser untuk kondisi muka air laut normal:

$$FS_{geser(normal)} = \frac{\sum_{i=1}^3 V \tan(k_i \phi_i) + Bk_2 c_3 + P_{h(normal)}}{Pa \cdot \cos \alpha + \rho \cdot g \cdot h_{normal}} = 1,555$$

dan untuk kondisi kenaikan muka air laut diperoleh

$$FS_{geser(PG)} = 1,501$$

dimana konstanta $k_1 = \frac{2}{3}$ dan $k_2 = \frac{2}{3}$, serta kemiringan terhadap bidang horizontal $\alpha = 0$.

Faktor keamanan stabilitas geser diperoleh $1,5 \leq FS_{geser(normal)} = 1,555$ dan $1,5 \leq FS_{geser(PG)} = 1,501$, artinya struktur pelindung pantai dengan batu bronjong untuk

kondisi muka air laut normal dan kondisi kenaikan muka air laut akibat pemanasan global dalam kondisi stabil.

4.4 Analisis Stabilitas terhadap Daya Dukung Tanah

Langkah awal dalam menganalisa stabilitas terhadap daya dukung tanah adalah menentukan eksentrisitas:

$$e = \frac{B}{2} - \frac{\sum_{i=1}^3 MR - \sum_{i=1}^5 M_{oi}}{\sum_{i=1}^3 V_i} = 0,041$$

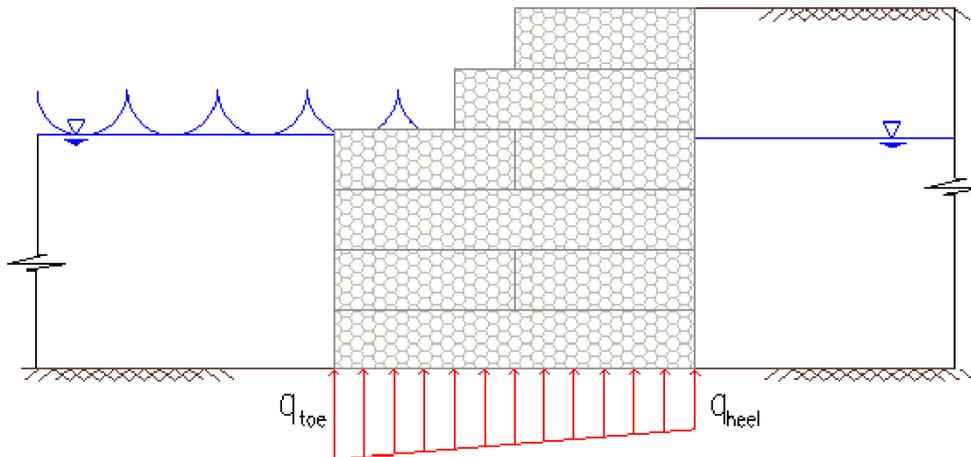
Sehingga tegangan maksimum dan minimum diperoleh sebagai berikut:

$$q_{toe} = \frac{\sum_{i=1}^3 V}{B} \left(1 + \frac{6e}{B} \right) = 7871,846 \text{ kg/m}^2$$

dan

$$q_{heel} = \frac{\sum_{i=1}^3 V}{B} \left(1 - \frac{6e}{B} \right) = 7251,398 \text{ kg/m}^2$$

Ilustrasi hasil dari tegangan maksimum dan minimum dapat dilihat Gambar 7. Hasil tegangan maksimum didapatkan dari q_{toe} dengan nilai 7871,846 kg/m².



Gambar 7. Tegangan Maksimum dan Minimum.

Selanjutnya menentukan tegangan ultimate. Langkah awal menentukan lebar efektif yang dipenuhi oleh syarat sebagai berikut:

$$e = 0,041 < \frac{B}{6} = \frac{6}{6} = 1.$$

Sehingga lebar efektif adalah $B' = B - 2e = 5,918 \text{ m}$ dan $q = \gamma_3 \times D_f = 1960 \times 0 = 0$.

D_f merupakan kedalaman pondasi yang tertanam di dalam tanah, dalam kasus ini nilainya adalah 0.

Faktor-faktor koreksi terdiri dari F_{cd} , F_{ci} , F_{qd} , F_{qi} , $F_{\gamma d}$, dan $F_{\gamma i}$ merupakan faktor-faktor koreksi tanpa dimensi dari kohesi (c), berat tanah (γ), dan beban merata (q) yang diperhitungkan untuk geometri dan jenis tanah fondasi sebagai berikut:

$$F_{cd} = 1 + 0,4 \left(\frac{D_f}{B'} \right) = 1,$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \tan \varphi_3 (1 - \sin \varphi_3)^2 \left(\frac{D_f}{B'} \right) = 1,$$

$$F_{\gamma d} = 1,$$

$$F_{ci} = \left(1 - \frac{\Psi}{90} \right)^2 = \left(1 - \frac{\tan^{-1} \left(\frac{P_a \cos \alpha}{\sum_{i=1}^3 V_i} \right)}{90} \right)^2 = 0,817$$

$$F_{qi} = F_{ci} = 0,817,$$

$$F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\Psi}{\phi_3} \right)^2 = 0,634$$

Selanjutnya mencari N_c , yaitu faktor-faktor daya dukung akibat kohesi tanah, N_γ adalah faktor-faktor daya dukung akibat berat tanah, dan N_q adalah faktor-faktor daya dukung akibat beban merata. Nilai-nilai daya dukung tanah ini dapat dilihat pada Tabel 5 dan diperoleh nilai N_c , N_γ , dan N_q untuk $\phi = 42,5$, yaitu $N_c = 99,410$, $N_q = 92,200$, dan $N_\gamma = 171,045$ dengan menggunakan interpolasi.

Tabel 5. Faktor Daya Dukung Tanah.

ϕ	N_c	N_q	N_γ
42	93,71	85,38	155,55
43	105,11	99,02	186,54

Sehingga tegangan ultimatnya adalah

$$q_u = c_3' N_c F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma_3' B' N_\gamma F_{\gamma d} F_{\gamma i} = 628927,635 \text{ kg/m}^2$$

Faktor keamanan stabilitas terhadap daya dukung tanah adalah

$$FS_{\text{daya dukung tanah}} = \frac{q_u}{q_{\text{toe}}} = 79,896$$

Hasil ini memperlihatkan $3 \leq FS_{\text{daya dukung tanah}} = 79,896$, artinya stabilitas struktur terhadap daya dukung tanah tercapai.

Hasil perhitungan kestabilan struktur pelindung pantai dengan batu bronjong dapat dilihat pada Tabel 6. Faktor keamanan stabilitas terhadap guling, geser, dan daya dukung tanah dalam kondisi stabil.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Faktor Keamanan.

Faktor Keamanan	Kondisi
$2 \leq FS_{guling(normal)} = 3,890$	Stabil
$2 \leq FS_{guling(PG)} = 3,456$	Stabil
$1,5 \leq FS_{geser(normal)} = 1,555$	Stabil
$1,5 \leq FS_{geser(PG)} = 1,501$	Stabil
$3 \leq FS_{daya\ dukung\ tanah} = 79,896$	Stabil

5. SIMPULAN

Hasil analisis kestabilan struktur pelindung pantai batu bronjong adalah sebagai berikut:

1. Faktor Keamanan untuk stabilitas terhadap guling pada saat muka air normal $2 \leq FS_{guling(normal)} = 3,890$, dan faktor Keamanan untuk stabilitas terhadap guling akibat kenaikan muka air laut $2 \leq FS_{guling(PG)} = 3,456$
2. Faktor Keamanan untuk stabilitas terhadap geser pada saat muka air normal $1,5 \leq FS_{geser(normal)} = 1,555$, dan faktor Keamanan untuk stabilitas terhadap geser akibat pemanasan global $1,5 \leq FS_{geser(PG)} = 1,501$
3. Faktor Keamanan untuk stabilitas terhadap daya dukung tanah $3 \leq FS_{daya\ dukung\ tanah} = 79,896$

Hasil dari tiga faktor keamanan yang telah dianalisis dapat disimpulkan bahwa struktur pelindung pantai dalam kondisi stabil dan aman dari bahaya erosi dan abrasi akibat kenaikan permukaan air laut. Penelitian lanjutan untuk stabilitas struktur pelindung pantai batu bronjong adalah dengan memasukkan faktor gempa dan tsunami, penambahan geotextile di belakang dan di bawah struktur pelindung pantai agar tanah tidak masuk kedalam rongga struktur pelindung pantai batu

bronjong, dan beban kendaraan di atas tanah struktur pelindung pantai dimasukkan untuk mengetahui kestabilan struktur.

UCAPAN TERIMAKASIH

DIPA Kopertis Wilayah IV, Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan, sesuai dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Hibah Penelitian Nomor: 0251/K4/KL/2012, tanggal 06 Februari 2012

DAFTAR PUSTAKA

1. Bindoff, N.L. et. al. (2007). Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA.: Cambridge University Press.
2. Das, B.M., (2006). Principles of Geotechnical Engineering Fifth Edition, Nelson, Canada.
3. Pond, S. dan G.L Pickard. 1983. Introductory dynamical Oceanography. Second edition. Pergamon Press. New York.
4. PUSLITBANG AIR, Balai Pantai, 2008.
5. Shore Protection Manual, Departement of The Army, Coastal Engineering Reseach Center (1984).
6. SNI 03-0090-1999 (1999). Spesifikasi Bronjong Kawat.
7. Triadmojo, Bambang. 1999. Teknik Pantai Edisi kedua. Beta offset . Yogyakarta.