

Struktur Beronjong Dengan Material Pengisi Recycling Bangunan Untuk Rehabilitas Longsor di Kabupaten Buleleng-Bali

Muhammad Abdul Majid Al Hakam^{1*}, Chaterina Kurniasari², Abiem Yoeke Rigiarta³, Danang Setiya Raharja⁴

^{1,2,3,4} Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Wijaya Kusuma Surabaya, Jl. Dukuh Kupang XXV No.54, Surabaya, Jawa Timur 60225

Email: ¹mamah024@mhs.uwks.ac.id, ²ck003@mhs.uwks.ac.id, ³ayr002@mhs.uwks.ac.id, ⁴raharja.ds@uwks.ac.id
*Penulis Korespondensi

Abstrak

Secara geologis Indonesia merupakan titik pertemuan tiga lempeng tektonik, yang mengakibatkan tingkat risiko bencana longsor yang relatif tinggi. Penanggulangan longsor memerlukan solusi yang efektif dan berkelanjutan seperti penggunaan material *recycling* bangunan sebagai bahan pengganti material konvensional batu kali pada perkuatan lereng struktur beronjong. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi Teknis stabilitas dan estimasi efisiensi biaya terkait substitusi batu pecah dengan material *recycling* bangunan. Penelitian ini menggunakan metode perhitungan matematis dan metode kesetimbangan batas Bishop dengan program bantu Geo5. Hasil analisis perbandingan stabilitas global struktur beronjong yang menggunakan material pengisi batu kali dan material *recycling* bangunan menunjukkan perbedaan faktor keamanan yang tidak signifikan dan masih memenuhi kriteria teknis sesuai SNI 8460:2017. Inovasi pemanfaatan limbah bangunan untuk pengisi struktur beronjong dapat menghasilkan efisiensi biaya sekitar 62,69 % dibanding jika menggunakan material batu pecah. Dapat disimpulkan perkuatan lereng dengan struktur beronjong menggunakan material *recycling* bangunan dapat menjadi alternatif yang lebih efisien dan berkelanjutan sesuai dengan SDGs nomor 9 dan 11.

Kata kunci: Efisien Biaya, Faktor Keamanan, Metode Bishop, Perkuatan Lereng, Recycling Bangunan.

Abstract

Geologically, Indonesia is a meeting point of three tectonic plates, which results in a relatively high risk of landslides. Landslide mitigation requires effective and sustainable solutions such as the use of recycled building materials as a substitute for conventional river stone materials in the slope reinforcement of gabion structures. This study aims to conduct a technical evaluation of stability and estimate cost efficiency related to the substitution of crushed stone with recycled building materials. This study uses mathematical calculation methods and the Bishop limit equilibrium method with the Geo5 assistance program. The results of the comparative analysis of the global stability of gabion structures using river stone fillers and recycled building materials show insignificant differences in safety factors and still meet the technical criteria according to SNI 8460:2017. Innovation in utilizing building waste to fill gabion structures can produce cost efficiency of around 62.69% compared to using crushed stone materials. It can be concluded that slope reinforcement with gabion structures using recycled building materials can be a more efficient and sustainable alternative in accordance with SDGs numbers 9 and 11.

Keywords: Cost Efficient, Safety Factor, Bishop Method, Slope Reinforcement, Building Recycling.

I. PENDAHULUAN

Indonesia secara geologis berada pada posisi yang sangat kompleks, yaitu di pertemuan tiga lempeng tektonik utama dunia: Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Selain itu, wilayah ini juga termasuk dalam dua jalur pegunungan muda dunia, yaitu Sirkum Mediterania dan Sirkum Pasifik, serta dilalui oleh jalur cincin api (Ring of Fire) yang membuat Indonesia memiliki banyak gunung berapi aktif dan rawan gempa bumi. Dengan kondisi geologis yang aktif serta iklim tropis yang ekstrem, Indonesia menjadi salah satu negara dengan tingkat risiko bencana alam tertinggi di dunia (BNPB, 2021; Detiktravel, 2020).

Indonesia yang merupakan salah satu negara dengan tingkat risiko bencana alam tertinggi di dunia akibatnya banyak sekali peristiwa atau serangkaian peristiwa yang disebabkan oleh alam, yang mengakibatkan dampak besar bagi manusia. Korban dapat berupa perorangan, keluarga atau kelompok masyarakat yang menderita baik secara fisik, mental, maupun sosial ekonomi. Bencana alam itu antara lain: berupa banjir, tanah longsor, gempa bumi, tsunami, gunung meletus, dan kekeringan.

Dari berbagai jenis bencana alam yang kerap melanda wilayah Indonesia, tanah longsor merupakan salah satu yang paling sering terjadi, terutama di daerah-daerah dengan topografi perbukitan dan pegunungan. Secara geologis, tanah longsor atau gerakan tanah didefinisikan sebagai peristiwa pergerakan massa tanah, batuan, atau campuran keduanya dari suatu lereng ke bawah, yang dipicu oleh gaya gravitasi bumi.

Faktor-faktor yang mempercepat terjadinya longsor antara lain curah hujan yang tinggi, struktur tanah yang labil, kemiringan lereng yang curam, serta ulah manusia seperti penggundulan hutan atau penggunaan lahan yang tidak sesuai dengan daya dukung lingkungan. Menurut para ahli, longsor adalah bagian dari proses alam yang kompleks, yang sangat dipengaruhi oleh keseimbangan antara gaya penahan dan gaya pendorong material pada lereng (PVMBG, 2020; BNPB, 2021).

Bencana ini menjadi persoalan serius karena sering kali terjadi secara tiba-tiba dan menimbulkan kerugian besar, baik dari segi materi maupun korban jiwa. Karena longsor sangat berdampak pada kerusakan fisik, termasuk kerusakan infrastruktur (jalan, jembatan, bangunan) sehingga membuat banyak sekali kepingan atau sisa reruntuhan bangunan yang sudah tidak bisa diperbaiki

Oleh karena itu, inovasi beronjong dengan material *recycling* bangunan ini hadir untuk menjadi solusi bagi masyarakat yang tinggal di daerah dengan lereng yang curam, seperti di daerah perbukitan, lereng gunung, atau tebing sungai.

Spesifikasi Beronjong

Beronjong merupakan struktur bangunan teknik sipil yang umumnya dibuat dari anyaman kawat baja galvanis berbentuk kotak atau silinder yang kemudian diisi dengan batu pecah berukuran besar. Spesifikasi teknis dari beronjong diatur dalam standar tertentu agar memenuhi ketahanan struktural dan fungsi perlindungan terhadap erosi atau longsor.

Menurut Kementerian Pekerjaan Umum (2006), kawat beronjong biasanya terbuat dari baja berlapis seng (galvanis) dengan diameter kawat inti antara 2,7 mm hingga 3,0 mm dan kawat tepi sekitar 3,4 mm, dengan ukuran lubang anyaman berbentuk heksagonal sekitar 8×10 cm. Untuk memastikan kekuatan terhadap tekanan dan tarikan, beronjong juga dilengkapi dengan diafragma atau sekat dalam setiap satu meter panjang, guna mempertahankan bentuk dan distribusi beban isi batu secara merata.

Dimensi beronjong sendiri bervariasi, umumnya tersedia dalam ukuran $2 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ atau $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$, tergantung pada kebutuhan desain lapangan. Material batu isi harus berupa batu keras, bersudut tajam, dan tahan terhadap pelapukan, biasanya berdiameter antara 10 cm hingga 20 cm. Konstruksi beronjong sangat bergantung pada spesifikasi ini untuk menjamin daya tahan terhadap tekanan lateral tanah maupun arus air yang kuat (Kementerian PU, 2006; SNI 8404:2016).

Beronjong dari Recycling Bangunan

Pemanfaatan sisa-sisa material bangunan sebagai bahan pengisi beronjong merupakan salah satu inovasi dalam bidang teknik sipil yang mendukung prinsip konstruksi berkelanjutan. Material bekas seperti pecahan beton, bata merah, kerikil, atau puing bangunan lain yang telah rusak akibat bencana seperti longsor, sering kali hanya dianggap sebagai limbah dan dibuang. Padahal, material ini memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan kembali, terutama sebagai isi beronjong yang berfungsi sebagai penahan tanah dan pengendali erosi.

a) Mengurangi Limbah Konstruksi

Penggunaan kembali material bangunan bekas seperti puing beton, batu bata, dan kerikil dari bangunan yang rusak dapat mengurangi volume limbah konstruksi yang biasanya hanya dibuang ke tempat

- pembuangan akhir. Hal ini membantu mengurangi beban pencemaran lingkungan dan memperpanjang umur layanan tempat penampungan sampah.
- b) Meningkatkan Ketersediaan Material Lokal
 Sisa-sisa bangunan yang umumnya tersedia di sekitar lokasi bencana atau pembongkaran konstruksi dapat dimanfaatkan secara langsung, tanpa harus mengangkut batu dari tempat lain, sehingga mempercepat proses pekerjaan dan mengurangi emisi karbon dari transportasi material.
 - c) Mendorong Prinsip Konstruksi Berkelanjutan
 Inovasi ini mendukung konsep *recycling* dan reuse dalam konstruksi, sejalan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan (*sustainable development*). Pendekatan ini mengurangi eksploitasi terhadap sumber daya alam baru seperti batuan alam yang diambil dari sungai atau gunung.
 - d) Fungsi Teknis Tetap Terpenuhi
 Selama material sisa bangunan tersebut memenuhi syarat kekuatan, ketahanan terhadap pelapukan, dan ukuran minimum, maka fungsi teknis berjong sebagai penahan tanah, pengaman tebing, atau peredam energi arus air tetap dapat dijalankan secara optimal.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* Geo5, dimulai dengan mengumpulkan data berupa data properties tanah dan data topografi tanah pada Lokasi Study kasus di Ruas BTS. Kota Singaraja-Pegayaman KM 59+100, Desa pegayaman, Kecamatan Sukasada, Kabupaten Buleleng-Bali (Gambar 1).



Gambar 1. Detail lokasi dan dokumentasi longsor di titik jalan Singaraja-Mengwitani, Bali

Pada Lokasi study kasus dilakukan pengujian SPT (*Standard Penetration Test*), Berdasarkan sampel tanah yang didapat setelah melalui pengujian parameter di laloratorium didapatkan material *properties* tanah, Untuk tanah urug Kembali dengan *geometry* 0-7m didapatkan nilai γ tanah sebesar 18 kN/m³, c tanah sebesar 18 kN/m² dan nilai ϕ tanah sebesar 30°. Untuk tanah asli didapatkan nilai γ tanah sebesar 15 kN/m³, c tanah sebesar 20 kN/m² dan nilai ϕ tanah sebesar 12° seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data longsoran di titik jalan Singaraja-Mengwitani,Bali

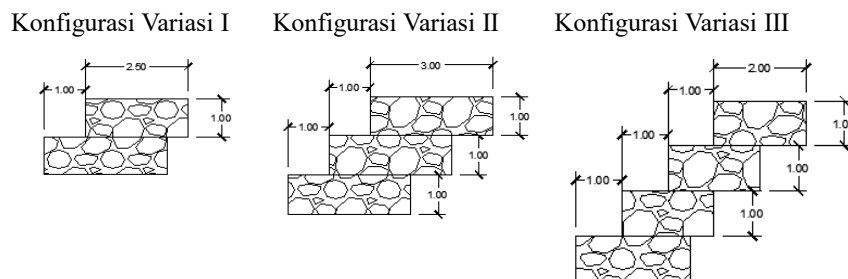
Parameter tanah	Satuan	Backfill	Tanah Asli
γ	kN/m ³	18	15
c	kN/m ²	5	20
ϕ	°	30	12

Pada longsor di lokasi study kasus dilakukan pengukuran *geometry* tanah, dari hasil pengukuran didapat kelongsoran dengan tinggi lereng 7m dan Panjang tebing yang mengalami kelongsoran sepanjang 15m dengan sudut lereng 60° dan masuk pada klasifikasi keruntuhan. Untuk detail potongan longsor ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Geometry longsor di titik jalan Singaraja-Mengwitani, Bali

Untuk memitigasi kelongsoran agar tidak Kembali terjadi diperlukan perkuatan yang tepat dan efisien, salah satunya dengan penggunaan material *recycling* bangunan sebagai perkuatan lereng *study* kasus, Pada analisis kali ini menggunakan 3 konfigurasi variasi, yang pertama pada elevasi *geometry* 0-3m konfigurasi variasi I digunakan lebar beronjong 3m dan tinggi 1m disusun sebanyak 3 susunan dengan offset 1m, kedua pada elevasi *geometry* 3-4m konfigurasi variasi II digunakan lebar beronjong 2,5m dan tinggi 1m disusun sebanyak 1 susunan dengan *offset* 1m, ketiga pada elevasi *geometry* 4-7m konfigurasi variasi III digunakan lebar beronjong 2m dan tinggi 1m disusun sebanyak 3 susunan dengan *offset* 1m. Seperti ditunjukkan pada Gambar 3 dan Tabel 2:



Gambar 3. Variasi Konfigurasi Beronjong

Tabel 2. Variasi Konfigurasi Beronjong

N0.	Variasi	Jumlah Beronjong	Konfigurasi Beronjong (Undakan)	Lebar Beronjong (meter)	Tinggi Beronjong (meter)	Total Tinggi (meter)
1	I	3	3	3	1	3
2	II	1	4	2,5	1	4

3	111	3	7	2	1	7
---	-----	---	---	---	---	---

Berdasarkan Panduan Geoteknik 4 Desain dan Konstruksi, pembebanan lalu lintas dibagi berdasarkan fungsinya. Seperti ditunjukkan pada Tabel 3:

Tabel 3. Beban Lalu Lintas untuk Analisis Stabilitas

Fungsi	Sistem Jaringan	Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR)	Beban Lalu Lintas (kN/m ²)
Primer	Arteri	Semua	15
	Kolektor	>10.000	15
		<10.000	12
Sekunder	Arteri	>20.000	15
		<20.000	12
	Kolektor	>6.000	12
		<6.000	10
	Lokal	>5.00	10
		<5.00	10

Sumber: Panduan Geoteknik 4 No. Pt T-10-2002-B (DPU, 2002b)

*data beban hidup yang digunakan untuk analisis stabilitas lereng di titik jalan Singaraja-Mengwitani, Bali=15 kN/m².

Berdasarkan SNI 8460-2017, faktor keamanan untuk Setiap dinding penahan tanah harus diperiksa stabilitasnya terhadap guling, geser lateral, dan daya dukung. Pada SNI 8460-2017 untuk guling dipakai nilai FK guling 2, FK geser 1.5, FK daya dukung 3, FK jaringan kawat 1.5 dan FK stabilitas lereng 1.5 seperti ditunjukkan pada Tabel 4:

Tabel 4. Rekapitulasi nilai factor keamanan Faktor keamanan Yang digunakan

Faktor Keamanan Terhadap Guling:	=	2.00
Faktor Keamanan Terhadap Geser:	=	1.50
Faktor Keamanan Daya Dukung:	=	3.00
Faktor Keamanan Stabilitas Global:	=	1.50

III.HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Beronjong

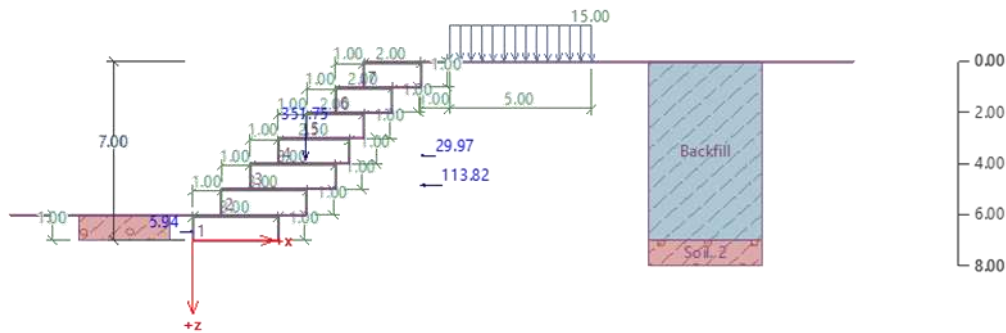
Pada *software* Geo5 untuk analisis perkuatan lereng beronjong digunakan metodologi verifikasi keselamatan struktur berdasarkan Faktor Keamanan secara historis merupakan pendekatan tertua dan paling banyak digunakan. Keuntungan utamanya adalah kesederhanaan dan kejelasannya. Secara umum, keselamatan dibuktikan dengan menggunakan faktor keamanan seperti ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$FS = \frac{X_{pas}}{X_{act}} > FS_{req} \quad [1]$$

Dimana:

- FS = Faktor keamanan yang dihitung
- X_{PAS} = Variabel yang menahan kegagalan (kekuatan, kapasitas, daya tahan)
- X_{ACT} = Variabel yang menyebabkan kegagalan (gaya geser, tegangan)
- FS_{REQ} = Faktor keamanan yang diperlukan

Berdasarkan hasil riset material *recycling* bangunan memiliki nilai γ : 20,10 kN/m³, ϕ : 35° dan c : 0 kN/m², material batu kali memiliki nilai γ : 25 kN/m³, ϕ : 40° dan c : 0 kN/m². Dengan data material tersebut dan dipakai *geometry* struktur beronjong yang sama, hasil analisis perkuatan lereng beronjong menggunakan bantuan *software* Geo5 didapatkan FK guling 4,05 > 2 (Aman) dan FK geser 1,58 > 1,5 (Aman) untuk pemakaian material *recycling* bangunan, sedangkan untuk pemakaian material batu kali didapatkan FK guling 5,03 > 2 (Aman) dan FK geser 1,94 > 1,5 (Aman), (Gambar 4) (Tabel 5).



Gambar 4. Pemodelan *geometry* pada *software* Geo5

Tabel 5. Data material

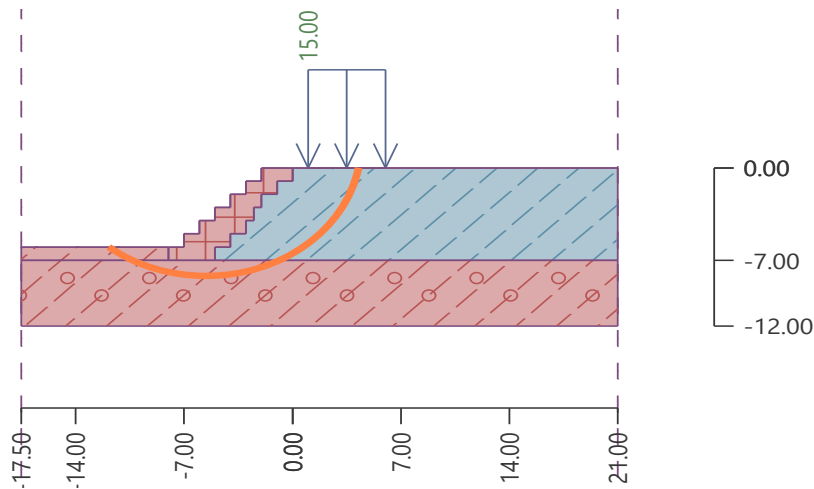
No.	Nama	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kN/m ²)
1	Recycling Bangunan	20.10	35.00	0.00
2	Batu Kali	25	40	0.00

Analisis Stabilitas Lereng

Analisis stabilitas lereng dengan Geo5 dapat menghemat waktu dan efektif dalam proses analisis. Metode Bishop dalam Geo5 digunakan karena perhitungannya yang sederhana, cepat dan memberikan hasil perhitungan faktor keamanan yang cukup teliti. Metode ini cocok digunakan untuk pencarian secara otomatis bidang runtuh kritis yang berbentuk busur lingkaran untuk mencari faktor keamanan minimum, sehingga metode ini sangat cocok digunakan dalam penelitian ini karena hasilnya dapat segera diketahui. Berdasarkan latar belakang diatas, penulis bertujuan untuk melakukan penelitian mengenai analisis stabilitas lereng dengan menggunakan Metode Bishop pada Study kasus longsor di Ruas BTS. Kota Singaraja-Pegayaman KM 59+100, Desa pegayaman, Kecamatan Sukasada, Kabupaten Buleleng-Bali.

a) Analisis Stabilitas Lereng Beronjong Dengan Menggunakan Material *Recycling* Bangunan

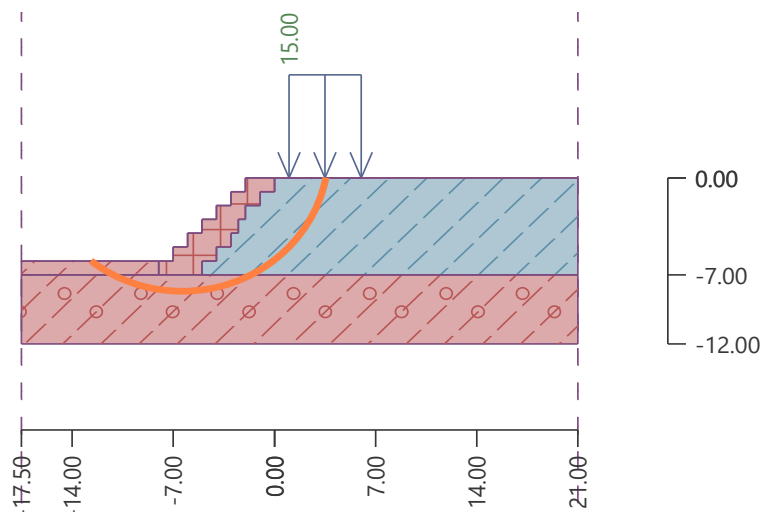
Dari analisis stabilitas lereng dengan material *recycling* bangunan menggunakan bantuan *software* Geo5 didapat kondisi terkritik titik awal *slip surface* berada pada sekitar 3m dari batas muka atas struktur beronjong dan berakhir pada sekitar 4m dari dari batas muka bawah beronjong dengan nilai FK 1,7 > 1,5 (Aman). Kondisi terkritik tersebut diperoleh dengan percobaan sebanyak 842 kali (Gambar 5).



Gambar 5. Hasil analisis Stabilitas Lereng Beronjong material Recycling Bangunan

b) Analisis Stabilitas Lereng Beronjong Dengan Menggunakan Material Batu Kali

Dengan menggunakan material batu kali dan *geometry* yang sama didapatkan kondisi terkritik titik awal *slip surface* berada pada sekitar 4m dari batas muka atas struktur beronjong dan berakhir pada sekitar 6m dari batas muka bawah beronjong dengan nilai FK 1,68 > 1,5 (Aman). Kondisi terkritik tersebut diperoleh dengan percobaan sebanyak 797 kali (Gambar 6).



Gambar 6. Hasil analisis Stabilitas Lereng Beronjong material Batu Kali

Analisis Bearing Capacity

a) Analisis *Bearing Capacity* Lereng Beronjong Dengan Menggunakan Material *Recycling* Bangunan

Analisis *bearing capacity* dengan bantuan *software* Geo5 diperlukan perhitungan *quilt* secara manual sebelum di input ke dalam *software*.

$$e = 0,333$$

$$q_{hell} = \frac{\sum V}{B} \left(1 - \frac{6e}{B}\right) = \frac{218,08}{3} \left(1 - \frac{6 \times 0,333}{3}\right) = 29,79 \quad [2]$$

$$q_{toe} = \frac{\sum V}{B} \left(1 + \frac{6e}{B}\right) = \frac{218,08}{3} \left(1 + \frac{6 \times 0,333}{3}\right) = 148,6 \quad [3]$$

$$N_c = 9,28$$

$$N_q = 2,97$$

$$N_\gamma = 1,69$$

$$q_u = C' 2 N_c F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma 2 B' N_\gamma F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad [4]$$

$$q = \gamma_2 D = 15 \times 1 = 15 \text{ kN} / \text{m}^2 \quad [5]$$

$$B' = B - 2e = 3 - 2 \times 0,333 = 2,334 \quad [6]$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi'_2 (1 - \sin \phi'_2)^2 \left(\frac{D}{B}\right) = 1 + 2 \times \tan 12 (1 - \sin 12)^2 \left(\frac{1}{3}\right) = 0,2980 \quad [7]$$

$$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan \phi'_2} = 0,2980 - \frac{1 - 0,2980}{9,28 \times \tan 12} = -0,05783 \quad [8]$$

$$F_{\gamma d} = 1 \quad [9]$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{P_a \cos a}{\sum V} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{1389,41 \times \cos 0}{1389,41} \right) = 89,9382 \quad [10]$$

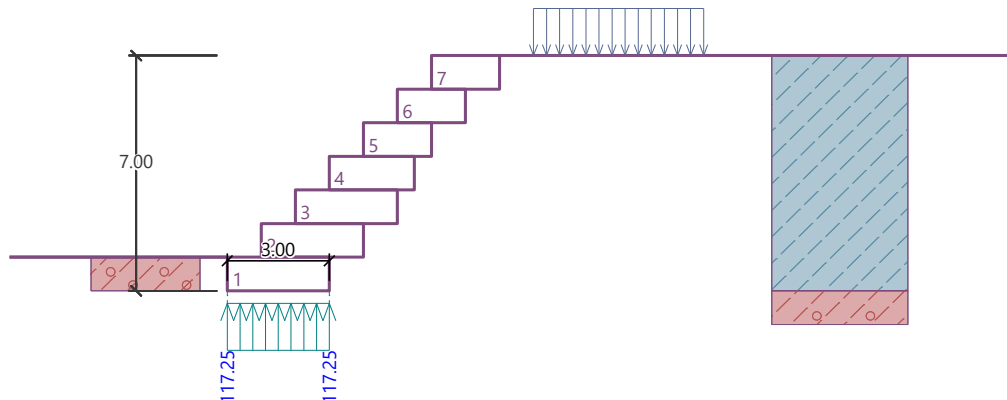
$$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{\psi^\circ}{90^\circ}\right) = \left(1 - \frac{89,9382^\circ}{90^\circ}\right) = 0,0013 \quad [11]$$

$$F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\psi}{\phi'_2}\right)^2 = \left(1 - \frac{89,9382}{12}\right) = 42,1831 \quad [12]$$

$$q_u = 0 \times 9,28 \times -0,0578 \times 0,001371 + 15 \times 2,97 \times 0,2980 \times 0,001371 + 0,5 \times 15 \times 2,33 \times 1,69 \times 1 \times 42,1831 \quad [13]$$

$$= 1248 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Setelah didapatkan hasil q_{ult} 1248kN/m² diinput kedalam *software* Geo5, dengan material *recycling* bangunan maka didapat nilai FK *bearing capacity* sebesar 10,64 > 3,00 (Aman), (Gambar 7).



Gambar 7. Hasil analisis *Bearing Capacity* Lereng Beronjong material *Recycling* Bangunan

b) Analisis *Bearing Capacity* Lereng Beronjong Dengan Menggunakan Material *Recycling* Bangunan

Untuk menentukan *bearing capacity* diperlukan perhitungan q ult secara manual.

$$e = 0,333$$

$$q_{hell} = \frac{\sum V}{B} \left(1 - \frac{6e}{B}\right) = \frac{218,08}{3} \left(1 - \frac{6 \times 0,333}{3}\right) = 29,79 \quad [14]$$

$$q_{toe} = \frac{\sum V}{B} \left(1 + \frac{6e}{B}\right) = \frac{218,08}{3} \left(1 + \frac{6 \times 0,333}{3}\right) = 148,6 \quad [15]$$

$$N_c = 9,28$$

$$N_q = 2,97$$

$$N_\gamma = 1,69$$

$$q_u = C'2N_cF_{cd}F_{ci} + qN_qF_{qd}F_{qi} + \frac{1}{2}\gamma_2B'N_\gamma F_{\gamma d}F_{\gamma i} \quad [16]$$

$$q = \gamma_2 D = 15 \times 1 = 15 \text{ kN} / \text{m}^2 \quad [17]$$

$$B' = B - 2e = 3 - 2 \times 0,333 = 2,334 \quad [18]$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi'_2 (1 - \sin \phi'_2)^2 \left(\frac{D}{B}\right) = 1 + 2 \times \tan 12 (1 - \sin 12)^2 \left(\frac{1}{3}\right) = 0,2980 \quad [19]$$

$$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan \phi'_2} = 0,2980 - \frac{1 - 0,2980}{9,28 \times \tan 12} = -0,05783 \quad [20]$$

$$F_{\gamma d} = 1 \quad [21]$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{P_a \cos a}{\sum V} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{1389,41 \times \cos 0}{1389,41} \right) = 89,9382 \quad [22]$$

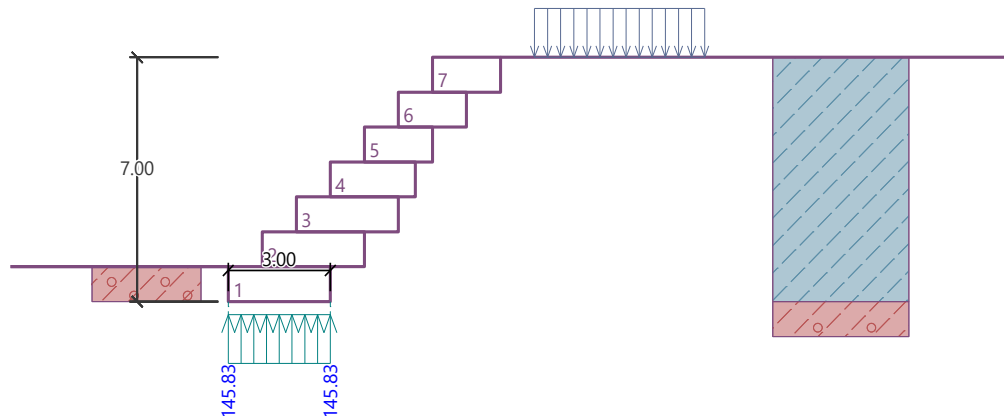
$$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{\psi^\circ}{90^\circ}\right) = \left(1 - \frac{89,9382^\circ}{90^\circ}\right) = 0,0013 \quad [23]$$

$$F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\psi}{\phi'_2}\right)^2 = \left(1 - \frac{89,9382}{12}\right) = 42,1831 \quad [24]$$

$$q_u = 0 \times 9,28 \times -0,0578 \times 0,001371 + 15 \times 2,97 \times 0,2980 \times 0,001371 + 0,5 \times 15 \times 2,33 \times 1,69 \times 1 \times 42,1831 \quad [25]$$

$$= 1248 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Setelah didapatkan hasil q ult 1248 kN/m² diinput ke dalam *software* Geo5, dengan material batu kali maka didapat nilai *FK bearing capacity* sebesar 8,56 > 3,00 (Aman), (Gambar 8).



Gambar 8. Hasil analisis *Bearing Capacity* Lereng Beronjong material Batu Kali

Dari hasil analisis kekuatan lereng, stabilitas lereng dan *bearing capacity* maka didapat nilai faktor keamanan, FK guling, FK geser, FK stabilitas lereng, FK *bearing capacity* seperti ditunjukkan pada Tabel 6:

Tabel 6. Hasil Faktor Keamanan

Material	FK Guling	FK Geser	FK stabilitas lereng	FK <i>Bearing Capacity</i>
Recycling Bangunan	4,05	1,58	1,7	10,64
Batu Kali	5,03	1,94	1,68	8,56

Efisiensi Biaya

Berdasarkan hasil riset harga batu kali berada pada kisaran Rp.180.000 per m³, dibandingkan dengan harga material *recycling* yang berkisar pada Rp.107.000 per m³. Dengan ini penggunaan material *recycling* bangunan terdapat perbandingan nilai presentase sekitar 62,69% lebih efisien dibandingkan menggunakan material batu kali. Penggunaan material *recycling* bangunan dapat menjadi alternatif yang lebih efisien dan berkelanjutan sesuai dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs) nomor 9 (Membangun infrastruktur yang tangguh, mendorong industrialisasi yang inklusif dan berkelanjutan, serta mendorong inovasi) dan 11(Menjadikan kota dan pemukiman manusia inklusif, aman, tangguh dan berkelanjutan).

IV. KESIMPULAN

Hasil penelitian penggunaan material *recycling* bangunan sebagai pengganti aterial batu kali pada struktur beronjong menunjukkan perbedaan nilai faktor keamanan yang tidak signifikan dan masih memenuhi kriteria teknis sesuai SNI 8460:2017. Dapat disimpulkan penggunaan material *recycling* bangunan pada material struktur beronjong lebih efisien dan berkelanjutan dari pada penggunaan material batu kali. Penggunaan material *recycling* bangunan juga merupakan salah satu dukungan untuk mewujudkan SDGs nomor 9 (Membangun infrastruktur yang tangguh, mendorong industrialisasi yang inklusif dan berkelanjutan, serta mendorong inovasi) dan 11(Menjadikan kota dan pemukiman manusia inklusif, aman, tangguh dan berkelanjutan).

REFERENSI

- [1] BSN, "SNI 03-0090-1999 Bronjong Kawat," Jakarta, 1999.
- [2] BSN, "SNI 8460:2017 Persyaratan perancangan geoteknik," Jakarta, 2017.

- [3] W. A. Wibawana, "Apa itu Ring of Fire? Penyebab Indonesia Rawan Dilanda Gempa," 2022. [Online]. Available: <https://news.detik.com/berita/d-6444291/apa-itu-ring-of-fire-penyebab-indonesia-rawan-dilanda-gempa>. [Accessed 13 April 2025].
- [4] J. D. Aningsih, "Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan bronjong," Universitas Tunas Pembangunan, Surakarta, 2022.
- [5] Abadi, Aneka Alam;, "Berat volume," 2020. [Online]. Available: <https://jualbuisbeton.com/berat-volume/>. [Accessed 11 April 2025].
- [6] A. W. Adi, O. Shalih, F. Z. Shabrina, A. Rizqi, A. S. Putra, R. Karimah, F. Eveline, A. Alfian, S. R. T. Septian, Y. Widiastomo, Y. Bagaskoro, A. N. Dewi, I. Rahmawati, S. H. A. Suryaningrum, D. I. Purnamaswi and D. J. Puspasari, IRBI indeks risiko bencana indonesia tahun 2022, 1 ed., Jakarta: Badan Nasional Penanggulangan Bencana, 2022.
- [7] A. Triarso and B. Dwipurwanto, "Analisis stabilitas pada proyek pasangan bronjong untuk tanggul pantai di area permukiman kenjeran," *Jurnal "MITSU" Media Informasi Teknik Sipil UNIIA*, vol. 9, no. 2, pp. 73-82, 2021.
- [8] A. Virlyani, M. Mustakim and A. Sulfanita, "Penerapan bronjong sebagai perkuatan tebing pada sungai pappa," *Jurnal "MITSU" Media Informasi Teknik Sipil UNIIA*, vol. 12, no. 2, pp. 85-92, 2024.
- [9] B. M. Das and N. Sivakugan, Principles of foundation engineering, SI Edition ed., United Stage: Cengage Learning, 2019.
- [10] D. Abiezer and A. Prihatiningsih, "Analisis desain dinding penahan tanah dengan waste material," *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, vol. 5, no. 4, pp. 767-780, 2022.
- [11] D. Saputra, "Harga batu kali per meter kubik buat fondasi rumah 2023," 2023. [Online]. Available: <https://www.detik.com/properti/tips-dan-panduan/d-6926397/harga-batu-kali-per-meter-kubik-buat-fondasi-rumah-2023>. [Accessed 13 April 2025].
- [12] A. Pribadi, "Pengelolaan mitigasi bencana oleh badan geologi kementerian ESDM, terbaik di dunia," 2018. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/news-archives/pengelolaan-mitigasi-bencana-oleh-badan-geologi-kementerian-esdm-terbaik-di-dunia#:~:text=Pusat%20Vulkanologi%20Dan%20Mitigasi%20Bencana%20Geologi%20biasa%20disingkat%20PVMBG%20merupakan,terkait%20mitig.> [Accessed 11 April 2025].
- [13] S. Purnama, "BNPB catat 5.402 kejadian bencana terjadi di Indonesia sepanjang 2021," 2022. [Online]. Available: <https://www.antarane.ws.com/berita/2711121/bnpb-catat-5402-kejadian-bencana-terjadi-di-indonesia-sepanjang-2021#:~:text=Lima%20provinsi%20tertinggi%20kejadian%20bencana,%20Dluka%2C%20dan%2060.505%20mengungsi.&text=Kemudian%20ada%20bencana%20Siklon%20Seroja,>. [Accessed 11 April 2025].
- [14] M. M. Murri, N. S. Surjandari and S. As'ad, "Analisis stabilitas lereng dengan pemasangan bronjong," *e-Jurnal MATRIKS TEKNIK SIPIL*, vol. II, no. 1, pp. 162-169, 2014.
- [15] E. F. Sagita, N. S. Surjandari and Y. M. Purwana, "Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan bronjong," *e-Jurnal MATRIKS TEKNIK SIPIL*, vol. V, no. 1, pp. 118-123, 2017.