



# Pemodelan 3D pada Stabilitas Lereng Menggunakan Perkuatan Bronjong Dengan Plaxis 3D Berbasis Elemen Hingga

\*Indra Noer Hamdhan, Amelia Eliza

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional, Bandung

Received: 21 Februari 2022 Revised: 25 Agustus 2023 Accepted: 11 September 2023

## Abstract

*The slope is a surface that lies at an angle to the horizontal. If the driving force at the slope is bigger than the resisting force, it can inflict a landslide. Gabions are one of the slope reinforcements structures that can be used to prevent landslides. Gabion has woven wire and has tensile strength. This study aims to examine the effect of modeling of tensile strength on gabion wire using Plaxis 3D, as well as the effectiveness of variations in height, variations in tensile strength, variations in gabion reinforcement patterns on slopes. The soil is modeled as homogeneous loamy sand with a geometry of 10m high and 1:1 slope. Modeling the tensile strength of gabions can increase the value of the safety factor by 9.5% compared to without modeling the tensile strength of gabions. The optimal gabion height that increasing the safety factor is 6m. The value of the tensile strength of gabion wire does not have a significant effect on the safety factor of the slope. The placement of gabions with a zigzag and lined pattern and a gentle slope will more increase the safety factor.*

**Keywords :** Gabion wire tensile strength, gabion, safety factor, slope.

## Abstrak

*Lereng merupakan permukaan tanah yang miring dengan sudut tertentu terhadap bidang horizontal. Apabila gaya yang mendorong pada lereng lebih besar dari gaya yang menahan, maka dapat menimbulkan kelongsoran lereng. Bronjong merupakan salah satu struktur perkuatan lereng yang dapat digunakan untuk menangani kelongsoran. Bronjong memiliki anyaman kawat dan memiliki kekuatan tarik. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh pemodelan kuat tarik pada kawat bronjong menggunakan Plaxis 3D, serta efektivitas dari variasi tinggi, variasi kuat tarik, variasi pola penempatan bronjong pada lereng. Tanah dimodelkan homogen pasir kelepungan dengan geometri tinggi lereng 10m dan kemiringan lereng 1:1. Pemodelan kuat tarik kawat bronjong dapat menaikkan nilai faktor keamanan sebesar 9,5% dibandingkan tanpa pemodelan kuat tarik kawat bronjong. Tinggi bronjong yang optimal meningkatkan faktor keamanan adalah sebesar 6m. Nilai kuat tarik kawat bronjong tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap faktor keamanan lereng. Penempatan bronjong dengan pola zigzag dan berjajar serta kemiringan landai akan lebih meningkatkan faktor keamanan.*

**Kata Kunci :** Kuat tarik kawat bronjong, bronjong, faktor keamanan, lereng.

## Pendahuluan

Indonesia adalah negara kepulauan dan merupakan tempat pertemuan tiga lempeng besar, yaitu: lempeng Indo-Australia yang terletak di bagian Selatan, lempeng Eurasia di bagian Utara, dan lempeng Pasifik di bagian Barat. Relief permukaan bumi terbentuk karena proses dinamika lempeng, seperti pada daerah yang landai memiliki potensi banjir, penurunan tanah, dan tsunami hingga daerah dataran tinggi seperti wilayah pegunungan dengan

lerengnya yang cukup curam memiliki potensi longsoran yang tinggi.

Lereng adalah suatu permukaan tanah yang miring dengan sudut tertentu terhadap bidang horizontal (Das & Sobhan, 2012). Pada lereng memiliki dua gaya utama karena memiliki kondisi dua permukaan tanah dengan elevasi yang berbeda yaitu gaya yang mendorong dan gaya yang menahan, apabila gaya yang mendorong lebih besar dari gaya yang menahan dapat menimbulkan longsor. Gaya yang

mendorong pada lereng berupa gaya berat dan gaya luar seperti akibat beban sendiri, beban lalu lintas, serta beban gempa sedangkan gaya yang menahan pada lereng seperti kuat geser tanah dan kohesi.

Bronjong mampu menstabilkan lereng untuk menambah kuat geser agar tidak terjadi longsor (Murri *et al.*, 2014). Penanggulangan longsor dapat digolongkan menjadi dua kategori (Departemen Pekerjaan Umum, 2005) yaitu: (1) Penanggulangan permanen seperti mengubah geometri lereng, pengendalian air permukaan, membangun bangunan penambat seperti bronjong, tembok penahan. (2) Penanggulangan darurat prinsipnya menangani keadaan sekitar longsor agar fungsionalitas dapat berjalan dengan semestinya seperti bagian yang rusak karena keruntuhan lereng ditimbun kembali, membuat pasangan bronjong di kaki keruntuhan lereng, genangan air dan mata air yang tertimbun atau terbuka di alirkan.

Bronjong merupakan perkuatan struktur untuk penanggulangan darurat, efektif untuk longsor dangkal yang bersifat fleksibel sehingga dapat menahan gaya horizontal atau vertikal, dapat meloloskan air dan jika mengalami keruntuhan materialnya dapat dipergunakan kembali. Kawat bronjong adalah material yang sangat baik digunakan untuk konstruksi perkuatan (AY, 2020). Bronjong memiliki anyaman kawat dan memiliki kekuatan tarik (*tensile strenght*). Ikatan anyaman inilah yang membuat bronjong mampu menahan tanah sehingga tidak terjadi longsor atau erosi (Sari & Gunawan, 2020).

Bronjong termasuk kedalam dinding penahan tanah, jenis ini memiliki konstruksi yang berupa kumpulan blok-blok yang dibuat dari anyaman kawat logam galvanis atau *wiremesh* yang diisi dengan agregat kasar berupa batu batu kerikil yang disusun secara vertikal ke atas dengan step-step menyerupai terasering/tangga (Khuzaifah, 2019). Bronjong biasanya dipasang pada kaki lereng dan berfungsi sebagai penahan longsor, serta mencegah penggerusan, keberhasilan penggunaan bronjong bergantung dari kemampuan bangunan ini menahan geseran pada atau tanah di bawah alasnya, maka dari itu bronjong perlu ditempatkan pada lapisan yang mantap atau kuat geser yang besar di bawah bidang gelincir (Departemen Pekerjaan Umum, 2005).

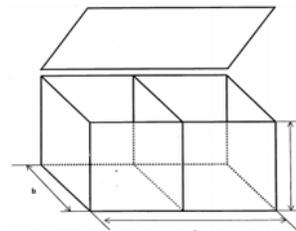
Menurut Asadpour & Akhlaghi (2017) dinding bronjong dapat dirancang dengan pola penempatan bronjong seperti tangga di sisi muka (*stepped front face*) atau di sisi dalam. Umumnya bronjong yang sering digunakan berukuran 2 m × 1 m × 0,5 m (Departemen Pekerjaan Umum, 2005). Komponen material bronjong seperti bentuk dan ukuran kawat

bronjong seperti Gambar 1, merupakan bronjong kawat-1 setelah dibuat menjadi kotak. Ukuran kawat dan jumlah sekat bronjong disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ukuran bronjong kawat bentuk 1

Kode	Ukuran			Jumlah sekat	Kapasitas (m <sup>3</sup> )
	A	B	C		
A	2	1	1	1	2
B	3	1	1	2	3
C	4	1	1	3	4
D	2	1	0,5	1	1
E	3	1	0,5	2	1,5
F	4	1	0,5	3	2

Sumber: SNI 03-0090-1999



Gambar 1. Bronjong kawat-1 setelah dibuat menjadi kotak (SNI-03-0090-1999)

Batu merupakan bahan material pengisi bronjong dan perlu memiliki ukuran yang lebih besar dibandingkan dengan ukuran dari lubang daripada kawat bronjong, karena jika material pengisi bronjong lebih kecil daripada ukuran kawat bronjong akan mudah lolos dan bronjong akan mengalami kekosongan ruang dan dapat menyebabkan bronjong tersebut menjadi goyang.

Bronjong pada umumnya terbuat dari anyaman kawat, dan memiliki nilai kuat tarik (*tensile strength*). Pendekatan material yang sesuai dengan kawat bronjong adalah material geogrid karena material ini memiliki sifat elastis sama seperti material kawat bronjong (Prayitno *et al.*, 2017) dan parameter penginputan pada pemodelannya sama yaitu hanya memasukan nilai kuat tarik pada material tersebut. Parameter yang dibutuhkan dalam penginputan material geogrid adalah parameter *normal stiffness* yang dapat dihitung pada Persamaan 1.

$$EA = \frac{TS}{\epsilon} \quad (1)$$

dimana *EA* merupakan *normal stiffness*, dan *TS* merupakan kuat tarik izin,  $\epsilon$  merupakan elongasi.

Kombinasi menggunakan geogrid dengan bronjong memberikan peningkatan kekuatan tanah atau mendukung untuk dinding muka bronjong (Chen *et al.*, 2011). Keuntungan dari penggunaan bronjong adalah karena bronjong merupakan struktur yang

tahan lama, memiliki sifat yang *flexible*, ekonomis dan *eco-friendly*, mengingat bronjong juga dapat divariasikan dengan vegetasi (Yang *et al.*, 2009).

Analisis stabilitas lereng dengan geometrik dan longsoran yang kompleks dapat dilakukan dengan pendekatan metode numerik, dimana kondisi regangan tegangan yang ada pada lereng dapat diperhitungkan, berbagai macam kriteria keruntuhan dapat digunakan, dan dengan mudah dapat memasukkan efek perkuatan pada lereng (Hamdhan & Santi Pratiwi, 2018)

Salah satu pendekatan metode numerik untuk analisis stabilitas lereng adalah menggunakan metode elemen hingga. Dalam metode ini, bidang gelincir tidak perlu diasumsikan di awal analisis, namun bidang gelincir ini merupakan hasil analisis. Pendekatan yang digunakan pada metode elemen hingga (*finite element method*) adalah metode *shear strength reduction* atau sering disebut juga *phi-c reduction*. Dalam metode ini, parameter kuat geser tanah yaitu kohesi (*c*) dan sudut geser tanah ( $\phi$ ) akan direduksi secara bertahap hingga membentuk mekanisme keruntuhan tanah pada lereng (Brinkgreve *et al.*, 2016) dimana nilai faktor keamanan lereng akan setara dengan nilai reduksinya (*Msf*).

$$\Sigma Msf = \frac{\tan \phi \text{ available}}{\tan \phi \text{ failure}} = \frac{c \text{ available}}{c \text{ failure}} \quad (2)$$

Dalam analisis stabilitas lereng menggunakan pendekatan elemen hingga ini, tanah dimodelkan dengan material model mohr-coulomb atau plastis sempurna yang menggunakan prinsip parameter kekakuan tanah atau perbandingan antara tegangan dan regangan. Secara umum Model mohr-coulomb membutuhkan lima parameter yaitu *modulus young* (*E*), *posision ratio* ( $\nu$ ), kohesi (*c*), sudut geser ( $\Phi$ ), sudut *dilatancy* ( $\psi$ ) (Hamdhan, 2013).

Pada Gambar 2, daerah plastis berbentuk garis yang konstan dimana ketika tegangannya bernilai konstan maka nilai regangan akan semakin besar dan tidak akan kembali pada kondisi awal. Parameter sudut geser ( $\phi$ ) dan kohesi (*c*) merupakan parameter model plastis dan akan muncul sebagai fungsi leleh. Menurut (Coulomb, 1776) persamaan dari keruntuhan mohr-coulomb adalah:

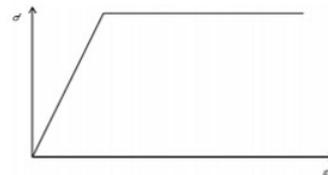
$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (3)$$

dimana  $\tau_f$  adalah kuat geser tanah, *c* adalah kohesi tanah,  $\sigma$  adalah tegangan normal pada bidang runtuh,  $\tan \phi$  adalah koefisien geser.

Grodecki & Urbański (2018) melakukan penelitian terkait analisis stabilitas lereng dengan perkuatan bronjong menggunakan *ZSoil v16 code* yang juga menggunakan metode *phi-c reduction*. Bronjong

digunakan sebagai perkuatan di tepi sungai dan sebagai dinding penahan tanah, Kondisi tanah pada daerah ini berdasarkan data geoteknik merupakan tanah lempung dan ketinggian lereng adalah 7,5 m.

Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan bronjong ini dilakukan dengan dua variasi ketinggian dimana total bronjong yang digunakan adalah sama. Hasil analisis stabilitas dengan dua variasi ketinggian ini tidak membuat lereng menjadi stabil sehingga perlu ditambahkan *anchors* sebagai tambahan perkuatan.



Gambar 2. Diagram tegangan regangan dari elastis-plastis sempurna (Brinkgreve, 2016)

Sagita *et al.* (2017) melakukan analisis stabilitas lereng dengan perkuatan bronjong kemiringan 60° dan dengan variasi pemasangan pada bronjong. Dari beberapa variasi pemasangan bronjong ini, lereng menjadi lebih stabil dan variasi ini memberikan pengaruh yang signifikan terhadap faktor keamanan lerengnya. Samanta *et al.* (2019) juga melakukan analisis stabilitas lereng dengan perkuatan dua level bronjong dengan tinggi 6m sampai dengan 8m menggunakan metode *limit equilibrium* dan kawat bronjong dimodelkan. Perkuatan lereng dengan dua level bronjong ini meningkatkan faktor keamanan lereng yang cukup signifikan.

Dalam penelitian terkait stabilitas lereng menggunakan perkuatan bronjong, masih belum banyak dilakukan analisis yang memperhitungkan kuat tarik dari kawat bronjong tersebut secara tiga dimensi. Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji pengaruh perkuatan bronjong meliputi, pengaruh pemodelan kuat tarik pada kawat bronjong, efektivitas dari variasi tinggi pada bronjong terhadap nilai faktor keamanan, efektivitas variasi pola penempatan bronjong terhadap nilai faktor keamanan menggunakan Plaxis 3D.

## Metode

Penelitian ini dilakukan menggunakan program Plaxis 3D, dengan ketinggian lereng model 10 m, kemiringan pada lereng sebesar 1:1, variasi ketinggian pada bronjong yang dianalisis yaitu 2 m, 4 m, 6 m, 8 m dan 10 m. Material tanah yang digunakan yaitu pasir kelempungan, pendekatan pemodelan material kawat bronjong menggunakan geogrid dan hanya memodelkan kuat tariknya saja,

tanpa bukaan kawat pada bronjong, ukuran bronjong kawat yaitu  $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0,5\text{ m}$  dengan kode D sesuai SNI 03-0090-1999. Dalam penelitian ini tidak memperhitungkan pengaruh muka air tanah, pengaruh beban lalu lintas, dan pengaruh gempa.

Parameter tanah dan pengisi bronjong

Sebagai pengisi bronjong pada penelitian ini adalah material batu kali dan dimodelkan Mohr Coulomb. Parameter dan nilai materil pengisi bronjong disajikan pada Tabel 2. Data parameter tanah yang digunakan adalah pasir kelepungan dengan parameter sudut geser efektif ( $\phi'$ ) dan kohesi efektif ( $c'$ ) yang tersajikan dalam Tabel 3.

**Tabel 2. Data parameter pengisi bronjong (Suryajaya et al., 2019)**

Parameter	Nilai
$\gamma_{\text{unsat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	20
$\gamma_{\text{sat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	20
E [kN/m <sup>2</sup> ]	100.000
$\nu$	0,30
$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	27
$\phi'$ [°]	39
$\omega$ [°]	9

**Tabel 3. Data parameter tanah**

Parameter	Nilai
$\gamma_{\text{unsat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	17
$\gamma_{\text{sat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	18
E [kN/m <sup>2</sup> ]	25.760
$\nu$	0,40
$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	8,4
$\phi'$ [°]	28,5

Pada penelitian ini kawat bronjong dimodelkan dengan geogrid dalam Plaxis 3D karena kawat bronjong memiliki perilaku dan kemampuan deformasi yang sama dengan geogrid. Parameter yang digunakan adalah nilai *EA* (*normal stiffness*) dimana nilai tersebut didapat dari kuat tarik ijin ( $P_{ijin}$ ) dibagi dengan nilai elongasi ( $\epsilon$ ).

Elongasi merupakan kondisi dimana ketika material geogrid tertarik dan akan mengalami perpanjangan. Parameter kuat tarik geogrid seperti ditunjukkan dalam Tabel 4 (Maccaferri, 2012).

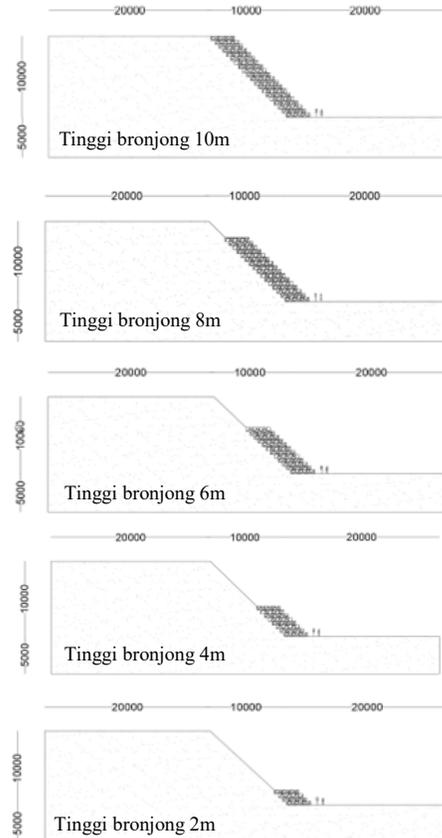
**Tabel 4. Data parameter kuat tarik geogrid (Maccaferri, 2012)**

Tipe	Kuat tarik [kN/m]	Elongasi [%]
MacGrid HDPE	55	10
MacGrid HDPE	80	10
MacGrid HDPE	110	10

## Pemodelan stabilitas lereng

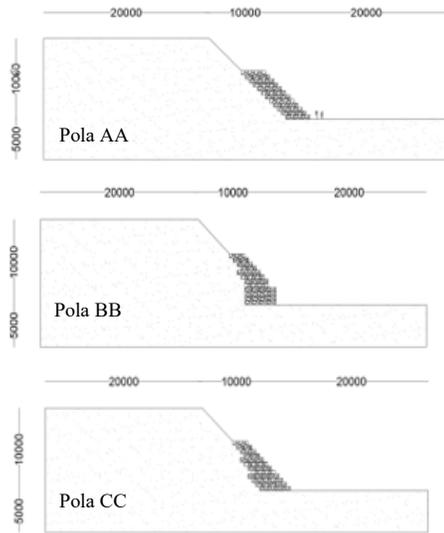
Pemodelan stabilitas lereng diawali dengan kondisi lereng tanpa perkuatan, dengan kondisi kritis yaitu nilai faktor keamanan,  $FK < 1,5$ . Selanjutnya pemodelan stabilitas lereng dengan perkuatan bronjong dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu kuat tarik kawat bronjong dimodelkan dan tidak dimodelkan. Kedua pendekatan ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemodelan kuat tarik bronjong terhadap faktor keamanan lereng.

Pemodelan stabilitas lereng dengan perkuatan bronjong yang memperhitungkan kuat tarik kawat dilakukan lima variasi ketinggian bronjong yaitu sebesar 2m, 4m, 6m, 8m dan 10m, seperti ditunjukkan dalam Gambar 3. Dari kelima variasi ketinggian ini akan dipilih satu ketinggian bronjong optimal yang menghasilkan faktor keamanan  $FK > 1,5$  yang sesuai dengan kriteria SNI 8460: 2017. Selanjutnya dilakukan optimalisasi ketinggian bronjong, kemudian dilakukan pemodelan stabilitas lereng dengan tiga variasi nilai kuat tarik kawat bronjong, yaitu sebesar 55 kN/m, 80 kN/m dan 110 kN/m. Variasi ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh nilai kuat tarik kawat bronjong terhadap faktor keamanan lereng.



**Gambar 3. Variasi ketinggian bronjong**

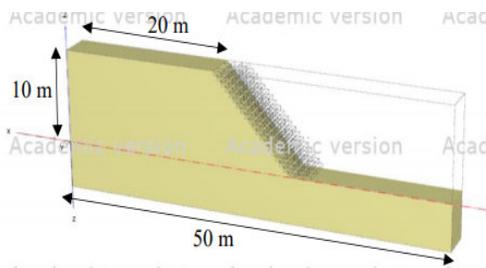
Dari hasil analisis stabilitas lereng dengan memvariasikan nilai kuat tarik kawat bronjong akan dipilih satu nilai kuat tarik kawat bronjong yang menghasilkan faktor keamanan yang memenuhi syarat yaitu  $FK > 1,5$  dan juga ekonomis. Setelah dilakukan variasi tinggi bronjong dan variasi nilai kuat tarik kawat bronjong, kemudian dilakukan analisis stabilitas lereng dengan memvariasikan pola penempatan bronjong. Tiga variasi pola penempatan bronjong dengan Pola AA, Pola BB dan pola CC ditunjukkan dalam Gambar 4. Variasi ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh pola penempatan bronjong terhadap faktor keamanan lereng.



Gambar 4. Variasi pola penempatan bronjong dengan ketinggian 6 meter

#### Pemodelan geometri lereng dengan Plaxis 3D

Lereng dimodelkan dengan tanah homogen pasir kelepungan. Geometri lereng yang dimodelkan adalah sebagai: tinggi lereng 10 m, kemiringan lereng 1:1, dengan areal model adalah 50m panjang x 15m tinggi x 4m lebar, seperti ditunjukkan dalam Gambar 5.



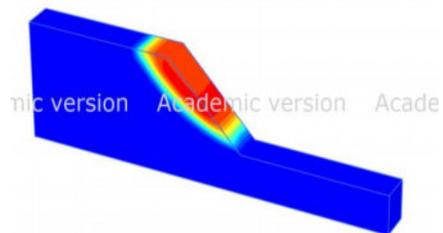
Gambar 5. Model geometri lereng dengan Plaxis 3D

#### Penentuan jenis mesh

Pemilihan jenis *mesh* adalah menentukan pembagian elemen-elemen serta menghubungkan *node - node* pada model yang dibuat. Semakin rapat elemen, hasil perhitungan akan semakin akurat (Hamdhan *et al.*, 2020) Setiap jenis *mesh* yang digunakan dalam pemodelan akan mempengaruhi jumlah elemen yang terbagi dan hasil akhir perhitungan salah satunya adalah nilai faktor keamanan. Pada penelitian ini, jenis *mesh* yang digunakan adalah *very fine* karena pembagian elemen-elemennya lebih banyak yang otomatis lebih rapat jika dibandingkan dengan jenis lainnya serta tingkat keakuratan pada saat kalkulasi lebih tinggi. Dalam model geometri lereng yang digunakan, menghasilkan jumlah elemen sebesar 14.602 dan jumlah node sebesar 23.252 apabila menggunakan *mesh very fine*.

#### Hasil dan Pembahasan

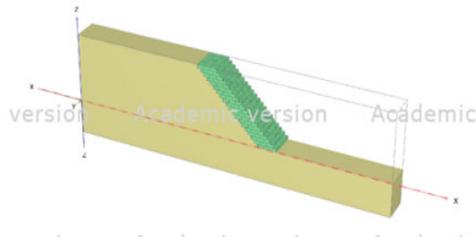
Analisis stabilitas lereng kondisi tanpa perkuatan dilakukan untuk mengetahui nilai faktor keamanan lereng tanpa perkuatan. Dengan menggunakan parameter tanah dan geometri lereng yang telah dijelaskan sebelumnya, hasil analisis stabilitas lereng kondisi tanpa perkuatan menghasilkan faktor keamanan sebesar 1,164 dengan bidang gelincir kritis yang ditunjukkan dalam Gambar 6 dan apabila mengacu pada SNI 8460:2017, maka nilai faktor keamanan ini termasuk kategori tidak aman, karena nilai faktor keamanannya  $< 1.5$ . Data parameter tanah yang menghasilkan faktor keamanan lereng tanpa perkuatan sebesar 1,164 ini akan digunakan untuk analisis stabilitas lereng menggunakan perkuatan bronjong.



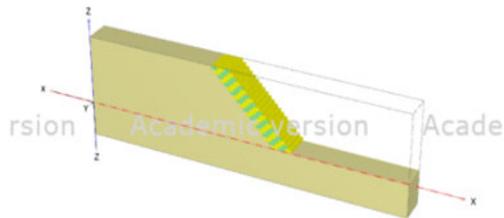
Gambar 6. Bidang gelincir lereng tanpa perkuatan

Sebelum dilakukan beberapa variasi pada bronjong, baik ketinggian bronjong, kuat tarik kawat bronjong dan pola penempatan bronjong dalam analisis stabilitas lerengnya, dilakukan analisis stabilitas lereng dengan perkuatan bronjong dengan dan tanpa memodelkan kawat bronjong. Geometri lereng dengan perkuatan bronjong tanpa memodelkan kawat bronjong ditunjukkan dalam Gambar 7, sedangkan geometri lereng dengan perkuatan

bronjong dengan memodelkan kawat bronjong ditunjukkan dalam Gambar 8.

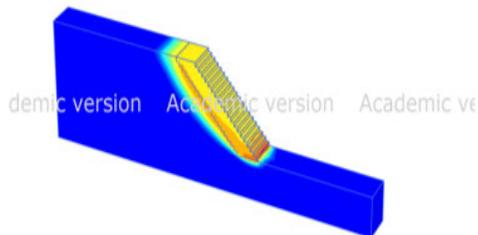


**Gambar 7. Geometri lereng dengan perkuatan bronjong tanpa memodelkan kawat bronjong**

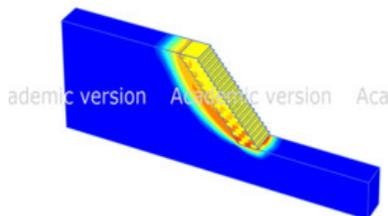


**Gambar 8. Geometri lereng dengan perkuatan bronjong dengan memodelkan kawat bronjong**

Pemodelan stabilitas lereng dengan perkuatan bronjong tanpa dan dengan memodelkan kawat bronjong berupa bidang gelincir disajikan dalam Gambar 9 dan Gambar 10. Faktor keamanan lereng dengan perkuatan bronjong tanpa memodelkan kawat bronjong adalah sebesar 1,232, sedangkan faktor keamanan lereng dengan memodelkan kawat bronjong adalah sebesar 1,349.



**Gambar 9. Bidang gelincir pada lereng diperkuat bronjong tanpa memodelkan kawat bronjong**



**Gambar 10. Bidang gelincir pada lereng diperkuat bronjong dengan memodelkan kawat bronjong**

Dari kedua hasil ini menunjukkan bahwa kawat bronjong berpengaruh terhadap faktor keamanan lereng yang diperkuat bronjong, dimana lereng dengan perkuatan bronjong yang memodelkan kawat bronjong mempunyai faktor keamanan 9,5% lebih besar dibandingkan dengan lereng dengan perkuatan bronjong yang tidak memodelkan kawat bronjong. Apabila dibandingkan dengan tipe keruntuhan berupa bidang gelincir kritis dari lereng dengan perkuatan bronjong tanpa dan dengan memodelkan kawat bronjong terlihat tidak jauh berbeda, tipe keruntuhnya sama-sama keruntuhan kaki (*toe failure*). Dalam analisis stabilitas lereng selanjutnya, kawat bronjong dimodelkan dalam perkuatan lereng dengan melakukan variasi tinggi bronjong, variasi kuat tarik kawat bronjong dan variasi pola penempatan bronjong.

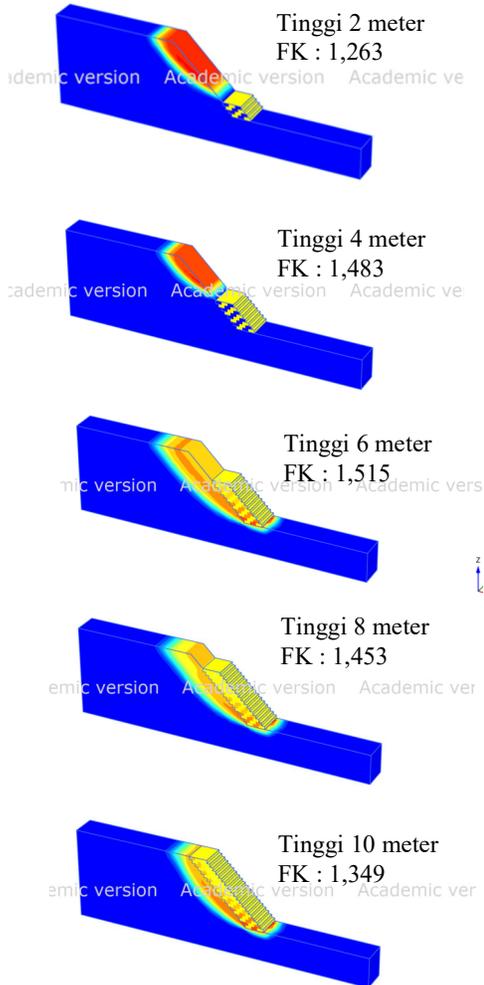
### Variasi tinggi bronjong

Variasi tinggi bronjong dilakukan dalam analisis stabilitas lereng dengan perkuatan bronjong untuk mengetahui pengaruhnya terhadap faktor keamanan. Variasi tinggi bronjong yang dimodelkan adalah 2m, 4m, 6m, 8m, dan 10m. Kuat tarik kawat bronjong yang digunakan adalah sebesar 110 kN/m dan pola penempatan bronjong yang digunakan adalah pola AA.

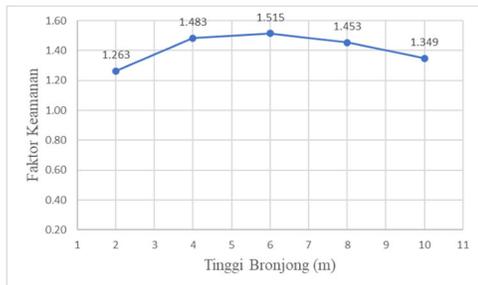
Gambar 11 menunjukkan bidang gelincir paling kritis dan faktor keamanan dari lereng yang diperkuat bronjong dengan variasi ketinggian bronjong. Dalam gambar tersebut menunjukkan bahwa bidang gelincir paling kritis pada variasi tinggi bronjong 2m dan 4m terjadi di bagian atas dari perkuatan bronjongnya, sedangkan pada variasi tinggi bronjong 6m, 8m dan 10m terjadi di sepanjang lerengnya. Hal tersebut menunjukkan pemodelan menggunakan Plaxis 3D yang berbasis elemen hingga akan menghasilkan bidang gelincir pada bidang terlemah sehingga terjadi perubahan bidang gelincir saat kenaikan elevasi bronjong. Bidang gelincir pada bidang terlemah ini akan dipengaruhi oleh gaya yang menahan dan gaya yang menyebabkan longsor akibat berat sendiri dari bronjong ini.

Grafik pengaruh tinggi bronjong terhadap faktor keamanan lereng yang disajikan dalam Gambar 12 menunjukkan tinggi bronjong optimal adalah 6m, dimana menghasilkan faktor keamanan paling besar yaitu 1,515 dan sesuai SNI 8460: 2017 dimana faktor keamanannya melebihi 1,5. Pada umumnya, bronjong merupakan salah satu dinding penahan tanah tipe *gravity*, dimana tingkat stabilitasnya tergantung dari berat konstruksi dan jenis timbunan yang digunakan (Hakam, 2021) Keberhasilan penggunaan bronjong bergantung dari kemampuan bronjong ini meningkatkan gaya yang menahan

longsor akibat berat sendirinya apakah lebih besar dibandingkan gaya yang melongsorkan akibat berat sendirinya juga.



**Gambar 11. Bidang gelincir pada lereng dengan variasi ketinggian bronjong.**



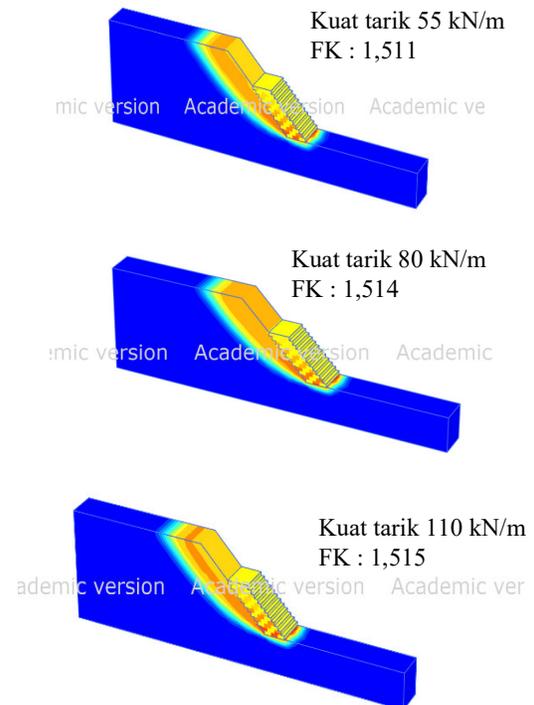
**Gambar 12. Grafik pengaruh tinggi bronjong terhadap faktor keamanan lereng**

Pada Gambar 12 menunjukkan bahwa gaya yang menahan longsor tanah akibat penambahan berat bronjong dengan tinggi bronjong dari 2m sampai

dengan 6m nilainya jauh lebih besar dibandingkan dengan gaya yang melongsorkan akibat penambahan berat bronjong itu sendiri, sehingga faktor keamanannya meningkat. Bila penambahan tinggi bronjong melebihi 6m, gaya yang menahan longsor akibat berat sendiri bronjong akan berkurang dibandingkan dengan gaya yang menyebabkan longsor akibat berat sendiri bronjongnya juga, sehingga faktor keamanannya menurun.

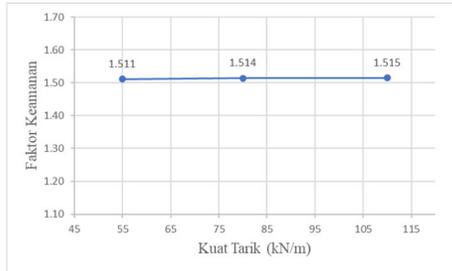
**Variasi kuat tarik kawat bronjong**

Variasi kuat tarik bronjong dilakukan dalam analisis stabilitas lereng dengan perkuatan bronjong untuk mengetahui pengaruhnya terhadap faktor keamanan. Variasi kuat tarik kawat bronjong yang dimodelkan adalah 55 kN/m, 80 kN/m, dan 110 kN/m. Tinggi bronjong yang dimodelkan adalah 6m sesuai hasil optimalisasi tinggi bronjong yang telah dilakukan sebelumnya, sedangkan pola penempatan bronjong yang digunakan adalah pola AA. Gambar 13 menunjukkan bidang gelincir paling kritis dan faktor keamanan dari lereng yang diperkuat bronjong dengan variasi kuat tarik kawat bronjong. Gambar ini menunjukkan bahwa bidang gelincir paling kritis pada variasi kuat tarik kawat bronjong adalah sama, termasuk keruntuhan tipe kaki (*toe failure*).



**Gambar 13. Bidang gelincir pada lereng dengan variasi kuat tarik kawat bronjong.**

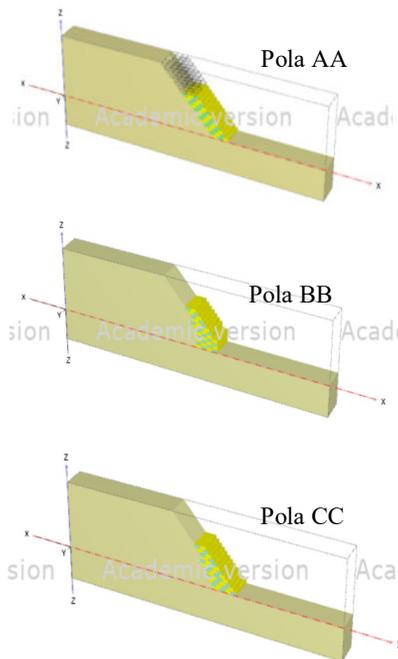
Gambar 14 menunjukkan grafik pengaruh kuat tarik kawat bronjong terhadap faktor keamanan lereng. Dalam gambar ini menunjukkan bahwa nilai kuat tarik kawat bronjong tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap faktor keamanan.



Gambar 14. Grafik pengaruh kuat tarik kawat bronjong terhadap faktor keamanan lereng

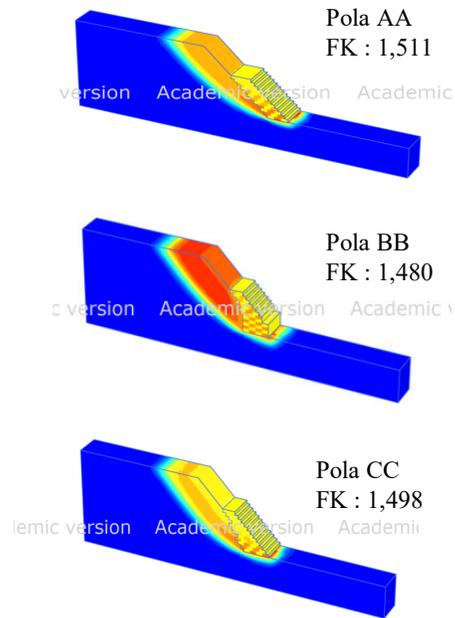
### Variasi pola penempatan bronjong

Variasi pola penempatan bronjong dilakukan dalam analisis stabilitas lereng dengan perkuatan bronjong untuk mengetahui pengaruhnya terhadap faktor keamanan. Variasi pola penempatan bronjong yang dimodelkan adalah Pola AA, Pola BB dan Pola CC seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Tinggi bronjong yang dimodelkan adalah 6m sesuai hasil optimalisasi tinggi bronjong yang telah dilakukan sebelumnya, sedangkan kuat tarik kawat bronjong yang digunakan adalah 55 KN/m sesuai hasil dimana kuat tarik kawat bronjong tidak berpengaruh signifikan terhadap faktor keamanan.



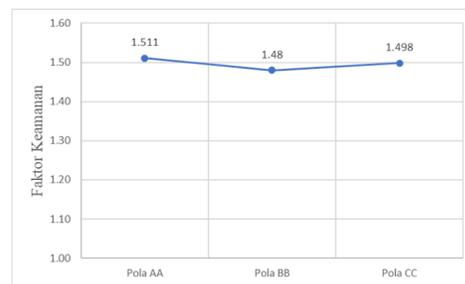
Gambar 15. Model geometri lereng dengan variasi pola penempatan bronjong

Gambar 15 menunjukkan model geometri lereng dengan perkuatan bronjong dengan pola penempatan bronjong Pola AA, Pola BB dan Pola CC, dan Gambar 16 menunjukkan bidang gelincir paling kritis dan faktor keamanan dari lereng yang diperkuat bronjong dengan variasi pola penempatan bronjong. Dalam gambar ini menunjukkan bahwa bidang gelincir paling kritis pada variasi pola penempatan bronjong adalah sama, termasuk keruntuhan tipe kaki (*toe failure*).



Gambar 16. Bidang gelincir pada lereng dengan variasi pola penempatan bronjong.

Gambar 17 menunjukkan grafik pengaruh pola penempatan bronjong terhadap faktor keamanan lereng. Berdasarkan pola yang telah dibuat, dimana pola AA dibuat pola bronjong zigzag serta berjajar dan membuat bronjong lebih masuk kedalam, membuat kemiringan lereng lebih landai, memberikan faktor keamanan yang lebih besar yaitu 1,515 dan memenuhi syarat faktor keamanan sesuai SNI 8460:2017 yaitu  $SF \geq 1,5$ .



Gambar 17. Grafik pengaruh pola penempatan bronjong terhadap faktor keamanan lereng

Pola BB dengan penempatan bronjong dengan bertumpuk dan cenderung lebih tegak kemiringannya menyebabkan pendistribusian beban akibat berat sendiri tidak merata, sehingga mengurangi gaya yang menahan longsoran akibat berat sendiri bronjong tersebut. Pola CC yang penempatan bronjongnya dibuat zigzag serta berjajar, namun penempatan bronjong semakin ke bawah semakin lebar ke arah luar, sehingga gaya yang menahan longsoran akibat berat sendiri dari bronjongpun berkurang, sehingga kurang efektif meningkatkan nilai faktor keamanan.

## Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis stabilitas lereng dengan perkuatan bronjong, dapat ditarik beberapa kesimpulan. Pemodelan stabilitas lereng dengan perkuatan bronjong dengan menggunakan Plaxis 3D dimana pola penempatan bronjong dapat dimodelkan sesuai kondisi di lapangan, seperti model penempatan zigzag. Pemodelan kuat tarik kawat bronjong pada analisis stabilitas lereng dengan perkuatan bronjong memberikan pengaruh yang cukup signifikan dibandingkan dengan tanpa pemodelan kuat tarik kawat bronjong, perbedaan faktor keamanannya adalah sebesar 9,5%. Dari variasi ketinggian bronjong yang dimodelkan, dapat disimpulkan bahwa tinggi 6m merupakan tinggi bronjong yang paling optimal dimana menghasilkan faktor keamanan paling besar yaitu 1,515 dan sesuai SNI 8460: 2017 dimana faktor keamanannya melebihi 1.5, hal ini disebabkan dengan tinggi bronjong sebesar 6m ini, gaya yang menahan longsoran akibat berat sendiri bronjong lebih besar dibandingkan dengan gaya yang melongsorkan akibat berat sendiri bronjong juga. Dari variasi kuat tarik kawat bronjong yang dimodelkan, disimpulkan bahwa kuat tarik kawat bronjong tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap faktor keamanan. Dari variasi pola penempatan bronjong yang dimodelkan, disimpulkan bahwa pola bronjong AA yang dibuat zigzag serta membuat kemiringan lereng lebih landai akan memberikan faktor keamanan yang lebih besar dibandingkan dengan pola bronjong yang bertumpuk tegak.

## Daftar Pustaka

- Asadpour, H., & Akhlaghi, T. (2017). *Civil Engineering Journal Stability Analysis of Gabion wall with Tieback in Seismic Regions* (Vol. 3, Issue 5) (hlm. 320-321).
- AY, Nur. Ikhsani. (2020). Studi Karakteristik Mekanik Kawat Bronjong Untuk Menahan Sedimen. *Jurnal Teknik Sipil Macca*, 5(3) (hlm. 2).
- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Waterman, D., Chesaru, A., Bonnier, P. G., & Haxaire, A. (2016). *PLAXIS 2016* (hlm. 1-16).
- Chen, C.-W., Asce, M., & Tang, A. (2011). *Evaluation of Connection Strength of Geogrid to Gabion Wall* (hlm. 1-8).
- Coulomb, C.A. (1776), *Essai sur une Application des Regles de Maximis et Minimum a quelques Problemes de Statique Relatifs al'Architecture*, *Mem. Acad. Roy. Div. Sav*, Vol. 7, 343-387.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2012). *Principles of geotechnical engineering* (hlm. 577-634).
- Departemen Pekerjaan Umum. (2005). *Pedoman rekayasa penanganan keruntuhan lereng pada tanah residual dan batuan* (hlm. 50-53).
- Fajar Sagita, E., Surjandari, N. S., & Purwana, Y. M. (2017). *Analisis Stabilitas Lereng dengan Perkuatan Bronjong Menggunakan Software Geoslope di Desa Tambakmerang, Girimarto, Wonogiri* (Issue 118) (hlm. 1-6).
- Grodecki, M., & Urbański, A. (2018). Landsliding slope supported by gabions – a case study and the methodology of numerical modelling. *Czasopismo Techniczne*, 12 (hlm. 2-3).
- Hakam, A. (2021). Pengaruh Perubahan Kadar Air Tanah Timbunan Terhadap Stabilitas Dinding Penahan Tanah Jenis Bronjong. *JRS-UNAND*, 17(1) (hlm. 9-12).
- Hamdhan, I. N. (2013). *A Contribution to Slope Stability Analysis with the Finite Element Method — Graz University of Technology*. Technische Universität Graz (hlm 18-21).
- Hamdhan, I. N., & Santi Pratiwi, D. (2018). Analisis Stabilitas pada Lereng Sungai yang Dipengaruhi Pasang Surut. In *Media Komunikasi Teknik Sipil* (Vol. 24, Issue 1) (hlm 6-7).
- Hamdhan, I. N., Santi Pratiwi, D., Adisya, R., & Rahmah, K. (2020). Analisis Stabilitas pada Lereng dengan Perkuatan Tanaman Vetiver Menggunakan Metode Elemen Hingga 3D. In *Media Komunikasi Teknik Sipil* (Vol. 26, Issue 2) (hlm. 1-2).
- Khuzairah, E. (2019). *Studi tentang Dinding Penahan (Retaining Wall)* (hlm. 4).
- Maccaferri. (2012). Retrieved From *Maccaferri Indonesia*, from <https://www.maccaferri.com/id/en/documents/>

- Murri, M. M., Surjandari, N. S., & As, S. (2014). Analisis Stabilitas Lereng dengan Pemasangan Bronjong (Studi Kasus di Sungai Gajah Putih, Surakarta). In *Maret* (Vol. 2, Issue 1) (hlm 2-4).
- Prayitno, R. T., Setiawan, B., & Dananjaya, H. (2017). *Analisis Stabilitas Lereng Bertingkat dengan Perkuatan Gabion* (hlm. 2-4) .
- Samanta, M., Punetha, P., Sarkar, S., Dwivedi, A., & Sharma, M. (2019). Slope stability assessment and design of remedial measures for Tungnath Temple at Uttarakhand, India: a case study. *Natural Hazards*, 96(1), 225–246 (hlm. 13-16).
- Sari, P. S., & Gunawan, R. (2020). Analisa Perbedaan Penggunaan Bronjong Km 11 dan Segmental Blok Km 7 pada Pekerjaan Perbaikan Lereng di Jalan Akses PLTA Musi. *Jurnal Statika*, 6(2) (hlm. 5-11).
- Suryajaya, E., & Suhendra, A. (2019). Analisis Mitigasi Bencana Tanah Longsor dan Metode Pengendaliannya (Studi Kasus Proyek Jalan di Jambi). In *Jurnal Mitra Teknik Sipil* (Vol. 2, Issue 4) (hlm 2-10).
- Yang, G.-L., Liu, Z.-Z., Xu, G.-L., & Huang, X.-J. (2009). *Protection Technology and Applications of Gabion* (hlm. 1-2).