

## ANALISIS PERLINDUNGAN TEBING SUNGAI BAH BOLON SUMATERA UTARA MENGUNAKAN BLOK BETON SEGMENTAL DENGAN PERKUATAN GEOSINTETIK

### ANALYSIS OF THE PROTECTION OF THE BAH BOLON RIVER, NORTH SUMATRA USING SEGMENTAL CONCRETE BLOCK WITH GEOSYNTHETIC REINFORCEMENT

**Novdin Manoktong Sianturi**

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Simalungun  
Jl. Sisingamangaraja Barat, Bah Kabul, Siantar Sitalasari, Kota Pematang Siantar, 21142  
Correspondent Email: [msnovdin@gmail.com](mailto:msnovdin@gmail.com)

Diterima: 23 April 2022; Direvisi: 25 April 2022; Disetujui: 07 September 2022

#### ABSTRACT

*The scouring on the riverbed can cause landslides and erosion of riverbanks. Landslides that occur on riverbanks are one type of landslide caused by river flows. Soil retaining construction can be built to protect riverbanks from scouring on rivers and maintain soil stability. For this reason, it is necessary to research the design of retaining walls on riverbanks. The purpose of this study was to design a river bank retaining wall that is safe against internal and external stability. The research method is carried out through the design of retaining soil from segmental concrete blocks with geosynthetic reinforcement based on soil data at the location of river cliffs, cliff heights, and river bank slopes. The research location is in the Bah Bolon River, Simalungun Regency, North Sumatra Province. The time of study was carried out from March 2021 to July 2021. The safety factor of the retaining wall is analyzed, for internal and external stability. The results showed that the value of the shear angle of the soil is an important soil parameter to know in the design of retaining walls. The value of the wall safety factor is getting higher with the increasing value of the soil shear angle. Geosynthetic reinforcement is more economical and retaining walls are more stable on soils with higher shear angle values.*

**Keywords:** Riverbanks, retaining wall, geosynthetic reinforcement, stability, segmental concrete.

#### ABSTRAK

*Gerusan di dasar sungai dapat menyebabkan longsor dan pengikisan pada tebing sungai. Longsor yang terjadi pada tebing sungai merupakan salah satu jenis longsor yang disebabkan oleh derasnya aliran sungai. Konstruksi penahan tanah dapat dibangun guna melindungi tebing sungai dari gerusan pada sungai dan menjaga stabilitas tanah, untuk itu perlu penelitian perancangan dinding penahan pada tebing sungai. Tujuan penelitian ini adalah untuk merencanakan dinding penahan tebing sungai yang aman terhadap stabilitas internal dan stabilitas eksternal. Metode penelitian dilakukan melalui perancangan penahan tanah dari blok beton segmental dengan perkuatan geosintetik berdasarkan data tanah di lokasi tebing sungai, tinggi tebing, dan kemiringan tebing sungai. Lokasi penelitian di Sungai Bah Bolon Kabupaten Simalungun Provinsi Sumatera Utara. Waktu penelitian dilakukan pada Maret 2021 sampai Juli 2021. Faktor keamanan dinding penahan dianalisis, baik terhadap stabilitas internal maupun terhadap eksternal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai sudut geser tanah merupakan parameter tanah yang penting diketahui dalam perancangan dinding penahan. Nilai faktor keamanan dinding semakin tinggi dengan semakin meningkatnya nilai sudut geser tanah. Perkuatan geosintetik semakin ekonomis dan dinding penahan tanah semakin stabil pada tanah yang memiliki nilai sudut geser yang semakin tinggi.*

**Kata Kunci:** Tebing sungai, dinding penahan, perkuatan geosintetik, stabilitas, beton segmental.

## PENDAHULUAN

Sungai merupakan saluran alami yang dapat berfungsi untuk mengalirkan air (Mukhrriansyah, 2018). Air yang mengalir melalui sungai dapat mengakibatkan gerusan pada tanah dasar maupun tebing sungai. Gerusan yang terjadi terus-menerus akan membentuk lubang-lubang gerusan di dasar sungai maupun tebing sungai. Tebing sungai merupakan lokasi rawan akan terjadinya longsor yang bisa diakibatkan oleh gerusan air pada dinding sungai. Aliran sungai dapat menyebabkan erosi, hal ini terjadi sebagai akibat pengikisan tebing sungai oleh terjangan aliran sungai yang kuat terutama pada belokan sungai. Jika batuan penyusun tebing sungai tidak kuat, maka pengikisan tanah sangat mudah terjadi dan dalam jangka yang panjang dapat mengakibatkan kelongsoran. Longsor tebing sungai sendiri merupakan salah satu jenis longsor yang disebabkan oleh aliran sungai.

Proses kelongsoran tebing ini terjadi akibat adanya proses gerusan di dasar tebing, hal ini mengakibatkan pengikisan pada dinding sungai. Kelongsoran ini dapat mengakibatkan penurunan permukaan tanah dan meningkatkan sedimen di dasar sungai (Sianturi et al., 2021). Semakin tinggi sedimen, debit aliran sungai semakin rendah, untuk itu perlu upaya peningkatan kesadaran dan partisipasi masyarakat untuk konservasi sungai (Sianturi et al., 2019).

Longsor merupakan salah satu jenis gerakan tanah yang mengakibatkan terganggunya kestabilan lereng dan menimbulkan bencana alam lainnya (Sianturi et al., 2012). Tanah longsor secara garis besar bisa terjadi karena dua faktor yaitu faktor pendorong dan faktor pemicu. Faktor pendorong merupakan faktor yang mempengaruhi kondisi material sendiri, sedangkan faktor pemicu adalah faktor penyebab Bergeraknya tanah tersebut. Secara umum faktor yang memicu dan menyebabkan longsor pada tebing sungai adalah tinggi muka air sungai, kemiringan dasar sungai, debit aliran sungai, jenis butiran dasar sungai, dan penampang basah sungai (Mukhrriansyah, 2018).

Aliran sungai yang terganggu dapat berdampak pada distribusi air bersih untuk kebutuhan masyarakat (Damanik & Sianturi, 2018). Longsor tebing sungai dapat dicegah dengan pelindung tebing berupa riprap, bronjong, dinding penahan beton, dan penahan lainnya (Mukhrriansyah, 2018). Perlu penataan sungai yang lebih baik untuk meningkatkan kebutuhan air bersih dan kesejahteraan masyarakatnya (Sianturi, 2014).

Perkuatan lereng seperti konstruksi penahan tanah dibangun guna melindungi tebing sungai

akibat erosi atau gerusan pada sungai dan menjaga stabilitas tanah terhadap guling dan geser pada tanah di lokasi sungai itu sendiri. Peningkatan akumulasi curah hujan di daerah aliran sungai memiliki potensi dalam meruntuhkan tebing sungai (Sukatja et al., 2021). Dinding penahan tanah konvensional umumnya berupa dinding gravitasi atau dinding kantilever yang terbuat dari pasangan beton dapat dipertimbangkan untuk penahan pada tebing sungai. Dinding penahan tanah merupakan konstruksi penting pada pekerjaan sipil yang mempengaruhi pekerjaan-pekerjaan lainnya, dinding penahan berupa struktur yang dirancang untuk menahan tekanan lateral (Ishak & Ruwiyo, 2018). Konsep tanah bertulang dengan tanah urug yang diperkuat dengan tulangan lajur-lajur baja atau lembaran-lembaran geosintetik (geotekstil dan geogrid). Grid-grid ini dapat berupa grid bambu yang terbukti memberikan dampak yang baik pada perkuatan tanah (Waruwu et al., 2018, Waruwu, et al., 2019a; Waruwu et al., 2020). Perkuatan dalam arah vertikal dapat menggunakan sistem pelat terpaku dari beton dan tiang dari material bambu (Waruwu et al., 2016; Waruwu et al., 2019a; Waruwu et al., 2019b; Maulana et al., 2019).

Suatu konstruksi dinding penahan tanah yang terdiri dari lapisan-lapisan tanah timbunan yang dipadatkan dan memiliki *facing* yang terbuat dari beton precast dengan akurasi tinggi, diperkuat menggunakan sabuk atau disebut *friction tie*. Konstruksi semacam ini dinamakan *Geoforce Segmental Retaining Wall* (GSRW). Dinding penahan tanah yang didesain dan dipelihara dengan baik dapat mencegah terjadinya erosi pada tebing dan dasar sungai saat terjadi hujan, sehingga dampak bencana alam seperti banjir dan tanah longsor pada daerah pemukiman dapat dicegah (Rosihun & Endaryanta, 2011).

Tipe konstruksi penahan tanah dapat berupa dinding gravitasi, semi gravitasi, kantilever, dinding *counterfort*, dan dinding tanah bertulang atau dinding tanah diperkuat (Rosihun & Endaryanta, 2011). Penahan tebing sungai dapat menggunakan bronjong untuk mengatur arah arus sungai, mengurangi kecepatan aliran, dan mengamankan tebing sungai (Benyamin et al., 2017). Sedangkan untuk penahan tanah dapat menggunakan dinding tanah bertulang yang diberi perkuatan dari bahan geosintetik maupun dari bahan metal. Pemilihan dinding blok beton segmental yang diperkuat dengan tulangan-tulangan geosintetik yang merupakan material komposit yang terdiri dari blok-blok beton dinding penahan segmental tanah dan tulangan geosintetik (Sholeh & Yunaefi, 2016).

Faktor keamanan tanpa perkuatan didapatkan antara 1,2-1,4 sedangkan faktor aman terhadap gaya guling dengan perkuatan didapatkan sekitar 3,5 (Mina et al., 2019). Faktor keamanan stabilitas penahan tanah dipengaruhi oleh jenis dan tipe penahan tanah. Dengan demikian nilai faktor keamanan tidak selalu berlaku umum, tetapi sesuai dengan kondisi tertentu.

Dinding penahan tipe gravitasi memberikan faktor keamanan yang tinggi terhadap guling dan daya dukung, karena memiliki berat yang signifikan dan lebar dasar yang cukup besar. Kondisi aman untuk perancangan tebing dikatakan memuaskan untuk potongan dan timbunan apabila memiliki faktor keamanan 1,3-1,4, sedangkan faktor keamanan 1,5-1,7 tebing dikatakan mantap untuk tebing dari lereng tubuh bendungan (Yuliana et al., 2018).

Lokasi penelitian diambil di daerah Simalungun, karena Pematang Siantar dan beberapa lokasi lainnya di Simalungun, sering terjadi longsor. Hal ini disebabkan oleh curah hujan yang cukup tinggi di daerah ini (Sianturi et al., 2012). Tujuan penelitian ini adalah melakukan pengujian tanah pada tebing sungai, merencanakan penahan tanah, menganalisis faktor keamanan terhadap stabilitas internal baik ketahanan tarik maupun terhadap cabut, dan stabilitas eksternal pada tebing sungai khususnya terhadap geser dan guling.

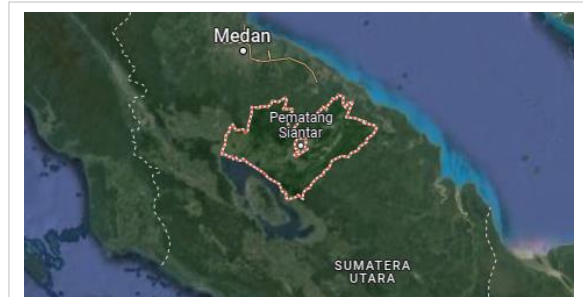
**METODOLOGI**

Bahan penelitian diambil dari lokasi pinggir tebing sungai Bah Bolon di Kabupaten Simalungun Provinsi Sumatera Utara. Daerah aliran sungai (DAS) Sungai Bahbolon melewati kota dan daerah perkebunan di daerah Simalungun. Perkembangan pembangunan yang begitu pesat memicu peningkatan erosi maupun sedimen dan semakin mengurangi infiltrasi, hal ini dapat berpengaruh pada morfologi Sungai Bahbolon seperti terlihat pada peta di **Gambar 1.a** dan denah rencana tanggul seperti terlihat pada **Gambar 1.b**.

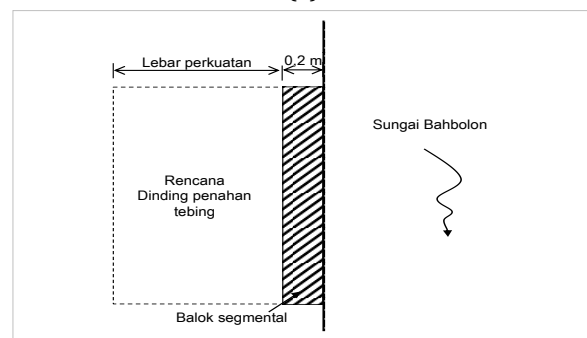
Tebing sungai yang dianalisis terlihat pada **Gambar 2.a**. Dinding penahan segmental tanah bertulang dengan elemen Segmental Dengan Diperkuat Geosintetik seperti terlihat pada **Gambar 2.b**.

Sampel tanah diambil di 3 (tiga) titik yang mewakili kondisi tebing dilihat dari ketinggian dan kemiringannya, yang terdiri atas titik BH-1, BH-2, dan BH-3 seperti pada **Gambar 1.a**. dan dari setiap lubang bor diambil sampel terganggu (*disturbed*) dan tidak terganggu (*undisturbed*) pada interval kedalaman 2-2,5 m. Masing-masing titik diambil sampel tanah untuk diuji di laboratorium Mekanika

Tanah Universitas Simalungun. Sifat-sifat fisik diketahui melalui uji *density*, kadar air, *Atterberg limit*, analisa ayak, dan hidrometer, sedangkan sifat teknis diketahui melalui uji kuat geser. Uji kuat geser tanah pada penelitian ini ditentukan dengan menggunakan alat uji geser langsung (*Direct Shear Test*) tipe CD. Data-data tanah yang didapatkan dari hasil uji geser langsung di antaranya kohesi (*c'*) dan sudut geser tanah ( $\phi'$ ). Uji ini relevan dengan parameter tanah yang digunakan pada analisis dinding penahan tebing.



(a)



(b)

**Gambar 1** (a) DAS Sungai Bahbolon; (b) Denah rencana dinding penahan



(a)

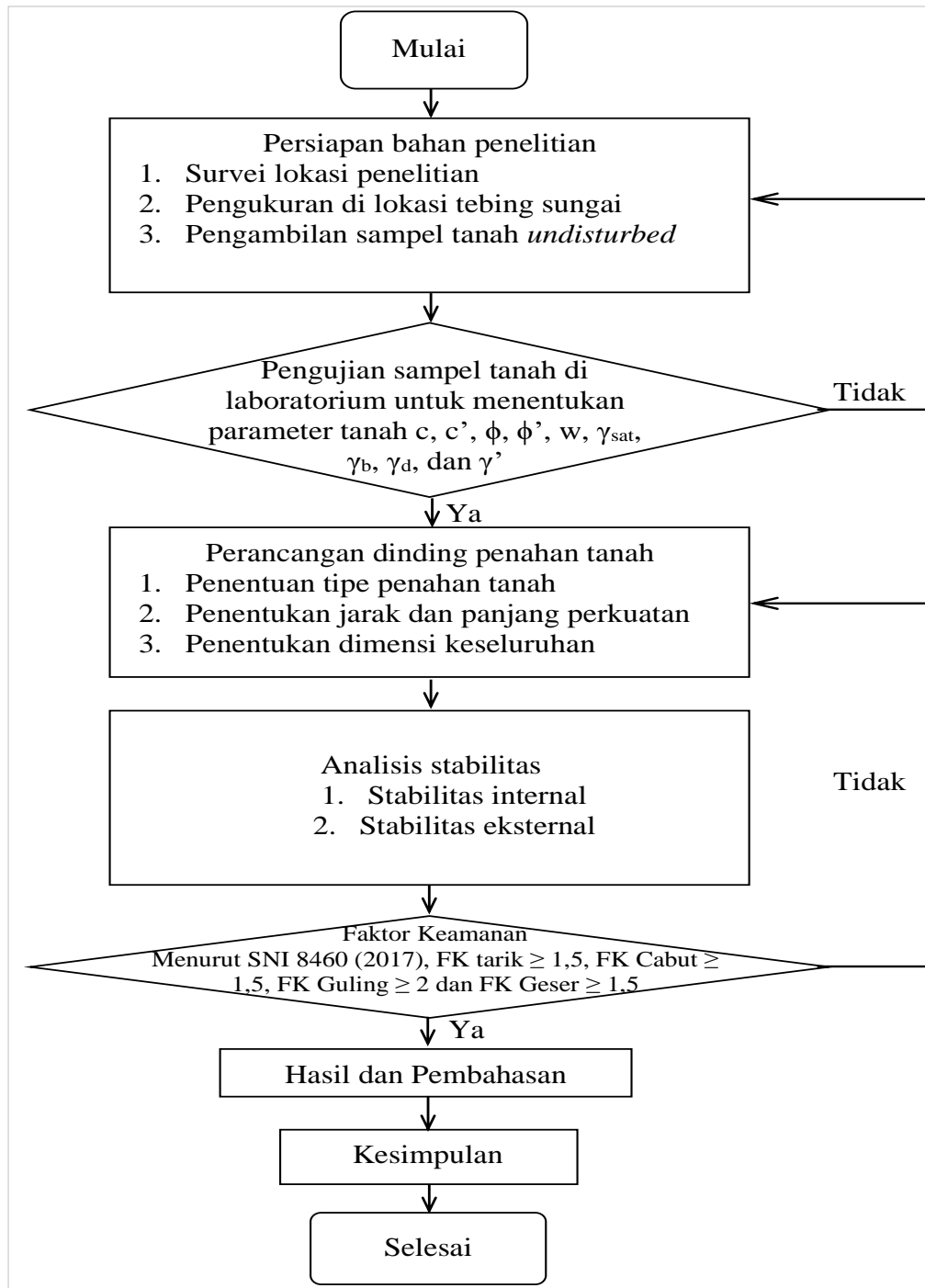
(b)

**Gambar 2** (a) Lokasi Penelitian Bentuk Tebing Sungai (b) Dinding penahan segmental tanah bertulang dengan elemen Segmental Dengan Diperkuat Geosintetik

Pengujian sampel tanah untuk setiap titik pengujian masing-masing 1 (satu) tabung contoh. Jumlah benda uji terdiri dari 3 (tiga) sampel tanah yang diuji dengan serangkaian uji di laboratorium. Titik-titik uji Bor hole (BH-1, BH-2, dan BH-3) seperti terlihat pada **Gambar 1.a**. Masing-masing lubang bor diambil sampel tak terganggu dalam tabung contoh sebanyak 1 (satu) tabung. Berdasarkan pengujian ini dilakukan analisis hasil untuk mendapatkan parameter tanah yang

diperlukan pada analisis kestabilan dinding penahan tanah yang akan direncanakan.

Tahapan penelitian dimulai dari pengamatan lokasi, pengukuran tebing, pengambilan sampel tanah *disturbed* dan *undisturbed*, uji sampel tanah, kemudian dilanjutkan dengan perancangan penahan tanah, dan analisis stabilitas. Prosedur penelitian selengkapnya dapat dilihat pada diagram alir penelitian seperti ditunjukkan pada **Gambar 3**.



**Gambar 3** Bagan Alir Penelitian

**Tekanan Lateral Tanah**

Tekanan lateral dibedakan berdasarkan keadaan tanah di sekitar konstruksi, di antaranya tekanan tanah lateral aktif, tekanan tanah lateral pasif, dan tekanan tanah diam (Ishak & Ruwiyo, 2018). Nilai tekanan lateral merupakan perkalian antara tekanan vertikal dengan koefisien tekanan tanah.

**Tekanan Tanah Lateral Aktif**

Koefisien tekanan tanah aktif menurut Rankine dan Coulomb seperti diuraikan pada Persamaan (1) dan Persamaan (3), sedangkan tekanan tanah aktif menurut Rankine dan Coulomb ditunjukkan pada Persamaan (2) dan Persamaan (4). Persamaan (2) terjadi pada kondisi khusus, dimana sudut  $\delta = 0^\circ$  dan  $\alpha = 90^\circ$ , dengan menggunakan koefisien tekanan lateral aktif ( $K_a$ ) dari Persamaan (1). Sebaliknya apabila memperhitungkan sudut  $\delta$  dan  $\alpha$ , maka Persamaan (4) menggunakan nilai  $K_a$  dari Persamaan (3). Teori Rankine dan Coulomb dapat digunakan untuk menganalisis faktor keamanan pada analisis stabilitas dinding penahan untuk perkuatan tebing (Mina et al., 2019).

$$K_a = \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma \cdot H^2 + q \cdot H \cdot K_a \dots\dots\dots (2)$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \theta)}{\cos^2 \theta \cdot \cos(\delta + \theta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\sigma + \varphi) \cdot \sin(\varphi - \alpha)^2}{\cos(\delta + \theta) \cdot \cos(\theta - \alpha)}} \right]} \dots\dots\dots (3)$$

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma \cdot H^2 \dots\dots\dots (4)$$

Dimana:

- $K_a$  : Koefisien tekanan lateral aktif
- $P_a$  : Tekanan tanah lateral aktif
- $\varphi$  : Sudut gesek dalam tanah
- $\gamma$  : Berat isi tanah

**Tekanan Tanah Lateral Pasif**

Koefisien tekanan tanah lateral pasif menurut Rankine dan Coulomb seperti diuraikan pada Persamaan (6) dan Persamaan (7), sedangkan tekanan tanah lateral pasif menurut Rankine dan Coulomb ditunjukkan pada Persamaan (6) dan Persamaan (8). Persamaan (6) terjadi pada kondisi khusus, dimana sudut  $\delta = 0^\circ$  dan  $\alpha = 90^\circ$ , dengan menggunakan koefisien tekanan lateral pasif ( $K_p$ ) dari Persamaan (5). Sedangkan apabila memperhitungkan sudut  $\delta$  dan  $\alpha$ , maka Persamaan (8) menggunakan nilai  $K_p$  dari Persamaan (7).

$$K_p = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$P_p = \frac{1}{2} \cdot K_p \cdot \gamma \cdot H^2 + q \cdot H \cdot K_p \dots\dots\dots (6)$$

$$K_p = \frac{\cos^2(\varphi + \theta)}{\cos^2 \theta \cdot \cos(\delta - \theta) \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi - \delta) \cdot \sin(\varphi + \alpha)}{\cos(\delta - \theta) \cdot \cos(\alpha - \theta)}} \right]^2} \dots\dots\dots (7)$$

$$P_p = \frac{1}{2} \cdot K_p \cdot \gamma \cdot H^2 \dots\dots\dots (8)$$

Dimana:

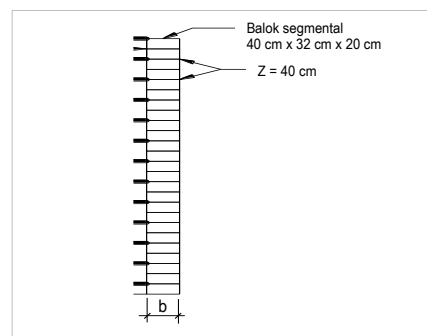
- $K_p$  : Koefisien tekanan lateral pasif
- $P_p$  : Tekanan tanah lateral pasif
- $\varphi$  : Sudut gesek dalam tanah
- $\gamma$  : Berat isi tanah

**Stabilitas Internal**

Stabilitas internal berkaitan dengan dimensi perkuatan pada penahan tanah yang direncanakan. Stabilitas internal yang ditinjau terdiri dari tinjauan terhadap gaya tarik dan gaya cabut perkuatan atau tulangan.

**Tinjauan Terhadap Gaya Tarik**

Gaya tarik memerlukan parameter koefisien tekanan tanah aktif menurut Rankine dan Coulomb yang dapat dihitung dari Persamaan (1) dan Persamaan (3). Gaya tarik (T) dapat dihitung dengan Persamaan (9) dan faktor keamanan terhadap gaya tarik seperti pada Persamaan (10), dimana tebal balok segmental (z) dan lebar balok horizontal (b), seperti terlihat pada **Gambar 4**.



**Gambar 4** Balok Segmental

$$T = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot b \dots\dots\dots (9)$$

Dimana:

- T : Gaya tarik
- $K_a$  : Koefisien tekanan lateral aktif
- $\gamma$  : Berat isi tanah
- H : Tinggi tekanan
- b : Lebar balok horizontal

$$SF = \frac{T}{K_a \cdot \gamma \cdot H \cdot dz} \dots\dots\dots(10)$$

Dimana:

- SF : Faktor keamanan
- K<sub>a</sub> : Koefisien tekanan lateral aktif
- T : Gaya tarik
- φ : Sudut gesek dalam tanah
- γ : Berat isi tanah

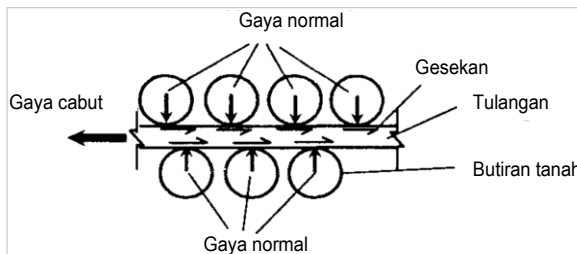
**Tinjauan Terhadap Gaya Cabut Tulangan**

Koefisien tekanan tanah lateral aktif yang digunakan dalam perhitungan gaya cabut menurut Rankine dan Coulomb seperti diuraikan pada Persamaan (1) dan Persamaan (3). Mekanisme terjadi gaya cabut tulangan dapat dilihat pada **Gambar 5**. Gaya tahanan (DF<sub>R</sub>) dapat dicari menggunakan Persamaan (11). Dimana L<sub>o</sub> = ketebalan overlap (m), μ<sub>f</sub> = koefisien geser bahan dengan bahan = tan φ, μ<sub>s</sub> = koefisien geser bahan dengan tanah = tan δ, dan gaya maksimum (DF<sub>max</sub>) seperti pada Persamaan (12). Nilai φ didekati dari sudut geser tanah hasil uji kuat geser, sedangkan nilai δ ditentukan dari sudut geser antara dinding dengan tanah (secara praktis biasanya diambil = 1/3 φ). Faktor keamanan terhadap gaya cabut tulangan dicari dengan menggunakan Persamaan (13).

$$DF_R = L_o \cdot \gamma \cdot (H - dz) (\mu_f + \mu_s) \dots\dots\dots(11)$$

$$DF_{max} = K_a \cdot \gamma \cdot H \cdot dz \dots\dots\dots(12)$$

$$SF = \frac{DF_R}{DF_{max}} \dots\dots\dots(13)$$



**Gambar 5** Mekanisme Gaya Cabut Tulangan

Dimana:

- SF : Faktor keamanan
- DF<sub>R</sub> : Gaya tahanan
- DF<sub>max</sub> : Gaya maksimum
- L<sub>o</sub> : Ketebalan overlap
- H : Tinggi tekanan
- γ : Berat isi tanah
- μ<sub>f</sub> : Koefisien geser bahan dengan bahan
- μ<sub>s</sub> : Koefisien geser bahan dengan tanah

**Stabilitas Eksternal**

Stabilitas eksternal yang ditinjau pada penelitian ini dibatasi pada akibat gaya-gaya luar yang mengakibatkan guling dan geser. Menurut SNI 8460 (2017), faktor keamanan minimum untuk setiap dinding penahan tanah adalah minimum 2 untuk faktor keamanan terhadap guling dan minimum 1,5 untuk faktor keamanan terhadap geser lateral. Tekanan tanah lateral aktif (Pa) dihitung menggunakan Persamaan (2) untuk metode Rankine dan Persamaan (4) untuk metode Coulomb. Faktor keamanan terhadap bahaya guling lebih besar dari 2 (SNI 8460, 2017).

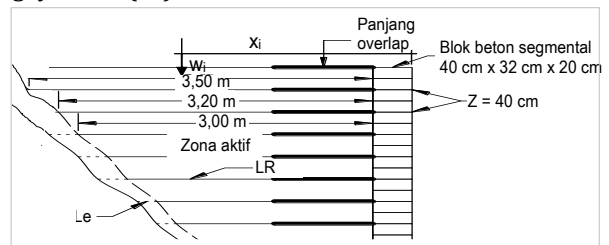
Stabilitas guling ditentukan berdasarkan perbandingan momen pasif (M<sub>R</sub>) dengan momen aktif pada 1/3 tinggi penahan tanah (M<sub>D</sub>). Gaya berat dan momen pasif dapat ditentukan dengan menggunakan **Gambar 6**.

$$SF = \frac{W_1 \cdot X_1 + W_2 \cdot X_2 + W_{segmental} + P_a \cdot \sin \delta \cdot L}{P_a \cdot \cos \delta \cdot H/3} \dots\dots\dots(14)$$

Dimana:

- SF : Faktor keamanan
- W : Gaya berat
- x : Jarak horizontal
- P<sub>a</sub> : Tekanan tanah lateral aktif
- H : Tinggi tekanan

Tekanan tanah lateral aktif (Pa) yang digunakan pada analisis faktor keamanan terhadap gaya geser sama dengan yang digunakan pada analisis faktor keamanan terhadap gaya guling. Faktor keamanan terhadap bahaya geser lebih besar dari 1,5 (SNI 8460, 2017). Stabilitas geser ditentukan berdasarkan perbandingan gaya pasif (F<sub>R</sub>) dengan gaya aktif (F<sub>D</sub>).



**Gambar 6** Sketsa Dinding Penahan Tanah

$$SF = \frac{[C + \frac{(W_1 + W_2 + W_{segmental} + P_a \cdot \sin \delta)}{L} \cdot \tan \delta] \times L}{P_a \cdot \cos \delta} \dots\dots\dots(15)$$

Dimana:

- SF : Faktor keamanan
- W : Gaya berat
- x : Jarak horizontal
- P<sub>a</sub> : Tekanan tanah lateral aktif
- H : Tinggi tekanan

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pembahasan yang digunakan pada penelitian ini dibatasi pada hasil analisis yang dilakukan berdasarkan Persamaan 1 sampai Persamaan 15 dan tidak membahas hasil analisis menggunakan *software* tertentu. Hasil Analisis penahan tanah pada tebing sungai dilakukan dalam 3 (tiga) tahap di antaranya analisis tekanan tanah lateral, stabilitas internal, dan stabilitas eksternal untuk masing-masing titik perancangan dinding penahan di lokasi BH-1, BH-2, dan BH-3. Analisis tekanan tanah lateral dimaksudkan untuk mendapatkan nilai koefisien dalam keadaan diam ( $K_o$ ), koefisien tekanan tanah lateral aktif ( $K_a$ ), dan koefisien tekanan tanah lateral pasif ( $K_p$ ) seperti terlihat pada Persamaan (1), Persamaan (3), Persamaan (5), dan Persamaan (7). Secara terperinci dapat dilihat dalam buku-buku referensi terkait.

Koefisien-koefisien ini didapatkan dengan menggunakan metode Rankine dan metode Coulomb. Berdasarkan koefisien ini didapatkan tekanan tanah lateral dalam keadaan aktif dan pasif. Analisis stabilitas internal mengasumsikan penggunaan bidang keruntuhan Rankine dan Coulomb. Faktor keamanan untuk stabilitas internal yang ditinjau adalah faktor aman terhadap gaya tarik dan gaya cabut tulangan. Analisis stabilitas eksternal atau disebut juga analisis stabilitas global. Analisis ini dilakukan untuk mengecek bahaya guling dan geser.

Data-data tanah dari hasil uji laboratorium dan data perancangan penahan tanah yang akan dianalisis diperlihatkan pada **Tabel 2**. Titik 1 direncanakan pada lokasi BH-1, titik 2 direncanakan pada lokasi BH-2, dan titik 3 direncanakan pada lokasi BH-3 (**Gambar 1**). Penahan tanah dari blok beton segmental dengan perkuatan geosintetik direncanakan di tiga titik pada lokasi penelitian. Hal ini dibedakan berdasarkan tinggi tebing sungai dan data tanah.

**Tabel 2** Data Tanah dan Parameter Penahan Tanah

| Parameter   | Satuan             | Lokasi Penahan Tanah |         |         |
|---|--------------------|----------------------|---------|---------|
|   |                    | Titik 1              | Titik 2 | Titik 3 |
| Berat isi tanah, $\gamma$                             | t/m <sup>3</sup>   | 2,163                | 1,947   | 1,983   |
| Kohesi, c   | kg/cm <sup>2</sup> | 0,320                | 0,267   | 0,267   |
| Sudut geser, $\phi$                                   | °                  | 9,72                 | 14,00   | 26,50   |
| Tinggi tebing sungai, H                               | m                  | 5                    | 5,7     | 6       |
| Sudut geser antara tanah dan dinding, $\delta$        | °                  | 6,18                 | 9,33    | 17,67   |
| Sudut kemiringan permukaan tanah urug, $\beta$        | °                  | 0                    | 0       | 0       |
| Sudut longsor terhadap horizontal, $\alpha$           | °                  | 26,56                | 26,56   | 26,56   |
| Kemiringan muka dinding terhadap horizontal, $\theta$ |                    | 1,80                 | 1,80    | 1,80    |
| Sudut kemiringan tumpukan dinding segmental, $\psi$   | °                  | 90                   | 90      | 90      |

**Faktor Keamanan Terhadap Gaya Tarik**

Faktor keamanan terhadap gaya tarik dianalisis menggunakan Persamaan (10). Hasil analisis dapat dilihat pada **Tabel 1**. Faktor keamanan terhadap gaya tarik dari metode Rankine dan Coulomb tidak memberikan perbedaan yang berarti. Faktor keamanan terlihat dipengaruhi oleh nilai sudut geser dalam tanah. Nilai sudut geser dalam yang semakin tinggi memperlihatkan faktor keamanan yang semakin baik.

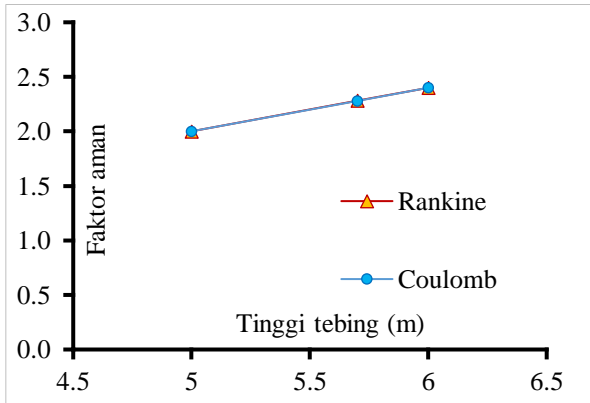
**Tabel 1** Faktor Keamanan terhadap Gaya Tarik

| Tinggi (m) | Sudut geser ( $\phi$ ) | Faktor keamanan |         |
|------------|------------------------|-----------------|---------|
|            |                        | Rankine         | Coulomb |
| 5          | 9,72                   | 2,00            | 2,00    |
| 5,7        | 14,00                  | 2,28            | 2,28    |
| 6          | 26,50                  | 2,399           | 2,40    |

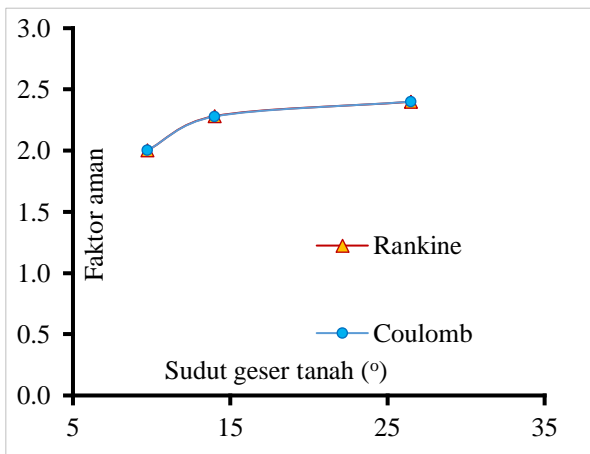
Salah satu contoh perhitungan faktor keamanan terhadap gaya tarik pada tinggi lereng H = 6 m, lebar balok horizontal b = 0,32 m,  $K_a$  metode Rankine = 0,383, dan berat volume tanah ( $\gamma$ ) = 19,16 kN/m<sup>3</sup>.

$$\begin{aligned}
 T \text{ Rankine} &= \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot b \\
 &= \frac{1}{2} \times 0,383 \times 19,16 \times 6^2 \times 0,32 \\
 &= 42,25 \text{ kN} \\
 SF \text{ Rankine} &= \frac{T}{K_a \cdot \gamma \cdot H \cdot dz} \\
 &= \frac{42,25}{0,383 \times 19,16 \times 6 \times 0,40} \\
 &= \frac{42,25}{17,61} \\
 &= 2,399 > 1,5
 \end{aligned}$$

Hubungan tinggi tebing sungai dengan faktor keamanan terhadap gaya tarik ditunjukkan pada **Gambar 7**. Faktor keamanan yang dihitung dari dua metode terlihat hampir berimpit satu sama lainnya. Ini menunjukkan parameter yang diperlukan dalam menentukan gaya tarik antara dua metode tidak jauh berbeda satu sama lainnya. Faktor keamanan yang semakin tinggi seiring dengan semakin tinggi tebing menunjukkan hubungan linier. Tinggi tebing sama dengan tinggi penahan tanah.



**Gambar 7** Faktor keamanan terhadap Gaya Tarik Berdasarkan Tinggi Tebing



**Gambar 8** Faktor Keamanan terhadap Gaya Tarik Berdasarkan Sudut Geser Tanah

### Faktor Keamanan Terhadap Gaya Cabut Tulangan

Faktor keamanan terhadap gaya cabut tulangan dihitung menggunakan Persamaan (13). Hasil analisisnya pada masing-masing titik diperlihatkan pada **Tabel 3**. Faktor keamanan menunjukkan nilai yang lebih tinggi pada sudut geser tanah yang tinggi. Faktor keamanan yang menggunakan koefisien tanah lateral aktif dari metode Rankine sedikit lebih tinggi dari pada metode Coulomb.

**Tabel 3** Faktor Keamanan terhadap Gaya Cabut Tulangan

| Tinggi (m) | Sudut geser (φ) | Faktor keamanan |         |
|------------|-----------------|-----------------|---------|
|            |                 | Rankine         | Coulomb |
| 5          | 9,72            | 2,26            | 1,91    |
| 5,7        | 14,00           | 3,90            | 3,47    |
| 6          | 26,50           | 4,99            | 4,19    |

Hubungan tinggi tebing dengan faktor keamanan terhadap gaya cabut tulangan ditunjukkan pada **Gambar 9**. Tinggi dinding penahan mengikuti tinggi tebing sungai. Pada umumnya tinggi total dinding penahan dari dasar hingga puncak adalah lebih tinggi dari tinggi tebing sungai karena sebagian konstruksi dinding penahan tertanam pada tepi sungai hingga mencapai kedalaman yang lebih rendah dari elevasi dasar sungai yang tergerus. Kondisi seperti ini agar dipertimbangkan.

Faktor keamanan semakin tinggi seiring dengan tinggi dinding penahan, hal ini dapat disebabkan karena pada tebing yang lebih tinggi pada penelitian ini didapatkan nilai sudut geser tanah yang tinggi pula. Hal ini, jika yang dilihat dari nilai faktor sudut geser, faktor lain yang dapat mempengaruhi faktor keamanan masih dapat ditinjau dari muka air tanah, nilai kohesi, nilai permeabilitas dari material yang mempengaruhi kestabilan dinding penahan tanah. Ini terlihat jelas pada hubungan sudut geser tanah dengan faktor keamanan terhadap gaya cabut tulangan pada **Gambar 10**. Peningkatan nilai sudut geser dari 9,72° ke 14° menunjukkan peningkatan faktor keamanan yang cukup signifikan dan sedikit meningkat pada sudut geser 26,50°. Parameter kuat geser yang digunakan pada analisis ini terdiri dari nilai sudut geser tanah dan nilai kohesi.

Salah satu contoh perhitungan faktor keamanan terhadap gaya cabut tulangan pada tinggi lereng H = 6 m, lebar balok horizontal b = 0,32 m, Ka metode Rankine = 0,383, Ka metode Coulomb = 0,870, dan berat volume tanah (γ) = 19,16 kN/m<sup>3</sup>.

Gaya tahanan DFR

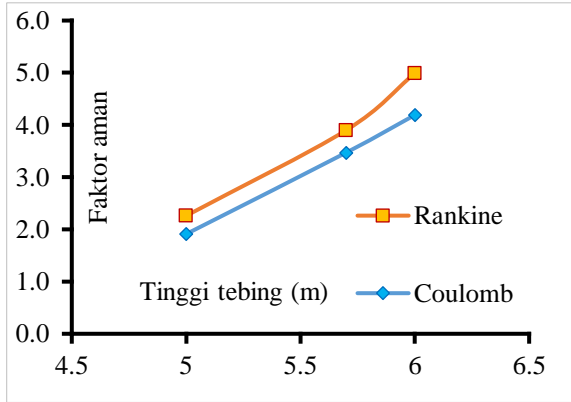
$$\begin{aligned}
 &= L_o \cdot \gamma \cdot (H - dz) \cdot (\mu_F + \mu_S) \\
 &= 1 \times 19,16 \times (6 - 0,40) \times (0,50 + 0,32) \\
 &= 87,98 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Gaya maksimum pada dasar pada kedalaman Z = H  
DF<sub>max</sub> Rankine

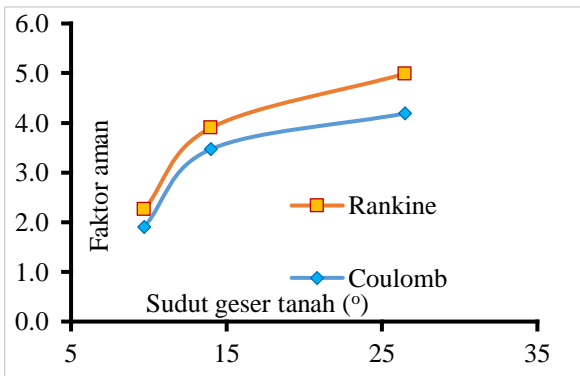
$$\begin{aligned}
 &= K_a \cdot \gamma \cdot H \cdot dz \\
 &= 0,383 \times 19,16 \times 6 \times 0,40 \\
 &= 17,61 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$$\text{SF Rankine} = \frac{DF_R}{DF_{max}} = \frac{87,98}{17,61} = 4,99 > 1,5$$





Gambar 9 Faktor Keamanan terhadap Gaya Cabut Tulangan Berdasarkan Tinggi Tebing



Gambar 10 Faktor Keamanan Terhadap Gaya Cabut Tulangan Berdasarkan Sudut Geser Tanah

**Faktor Keamanan Terhadap Guling**

Analisis faktor keamanan terhadap guling menggunakan Persamaan (14). Hasil analisis selengkapnya diuraikan pada Tabel 4. Faktor keamanan dari kedua metode terlihat tidak jauh berbeda satu sama lainnya. Tinggi rendahnya faktor keamanan dipengaruhi oleh nilai sudut geser tanah.

Salah satu contoh perhitungan faktor keamanan terhadap gaya guling pada tinggi lereng H = 6 m, lebar balok horizontal b = 0,32 m, Ka metode Rankine = 0,383, Ka metode Coulomb = 0,870, dan berat volume tanah (γ) = 19,16 kN/m<sup>3</sup>. Contoh kaktor keamanan untuk metode Rankine.

$$SF = \frac{\sum MR}{\sum MD} > 2$$

Ditinjau 1/3 dari panjang keseluruhan 3,8 m

$$SF = \frac{W_1 \cdot X_1 + W_2 \cdot X_2 + W_{segmental} + P_a \cdot \sin \delta \cdot L}{P_a \cdot \cos \delta \cdot H/3}$$

$$= \frac{(1,95 \times 6 \times 2,5 \times 1,25) + (1,95 \times 4 \times 1,3 \times 3,15) + 4,6 + (15,76 \times 0,30 \times 3,8)}{15,76 \times 0,95 \times 6/3}$$

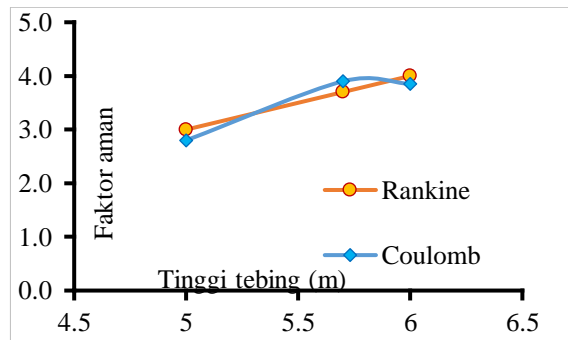
$$= \frac{36,56 + 31,94 + 4,6 + 17,96}{29,94}$$

$$= 3,00 > 2$$

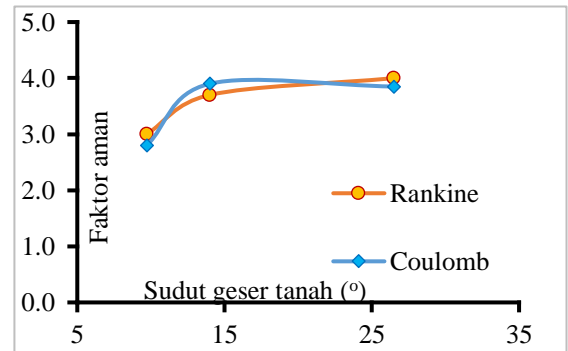
**Tabel 4** Faktor Keamanan terhadap Gaya Guling

| Tinggi (m) | Sudut geser (φ) | Faktor keamanan |         |
|------------|-----------------|-----------------|---------|
|            |                 | Rankine         | Coulomb |
| 5          | 9,72            | 3,00            | 2,80    |
| 5,7        | 14,00           | 3,70            | 3,90    |
| 6          | 26,50           | 4,00            | 3,85    |

Hubungan tinggi tebing sungai dengan faktor keamanan terhadap guling ditunjukkan pada Gambar 11. Sama seperti faktor keamanan terhadap gaya tarik dan gaya cabut tulangan, faktor keamanan terhadap guling menunjukkan hubungan yang linier jika ditinjau terhadap tinggi tebing. Faktor keamanan yang ditentukan berdasarkan koefisien tanah lateral aktif metode Rankine tidak jauh berbeda dengan metode Coulomb. Apabila ditinjau dari perbedaan dari sudut geser, maka terlihat faktor keamanan yang meningkat cukup tinggi pada nilai sudut geser 14°, sedangkan pada nilai sudut geser 26,50° tidak menunjukkan perubahan faktor keamanan yang berarti (Gambar 12). Hal ini menunjukkan bahwa faktor keamanan terhadap guling meningkat signifikan pada nilai sudut geser sampai 14°. Peningkatan sudut geser di atas 14°, tidak signifikan karena pengaruh dari tinggi dinding penahan tanah yang menyebabkan gaya guling semakin tinggi dan faktor keamanan semakin berkurang.



Gambar 11 Faktor Keamanan terhadap Guling Berdasarkan Tinggi Tebing



Gambar 12 Faktor Keamanan terhadap Guling Berdasarkan Sudut Geser Tanah

**Faktor Keamanan Terhadap Geser**

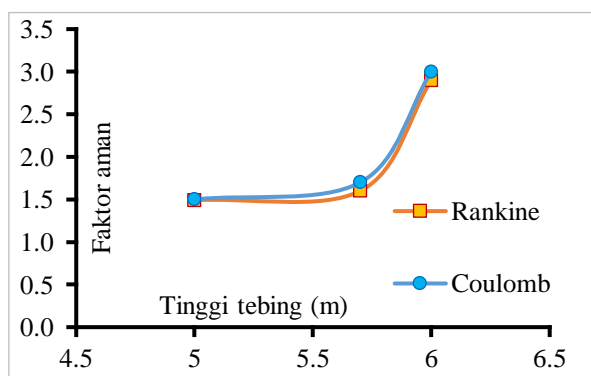
Nilai faktor keamanan terhadap geser dihitung dengan menggunakan Persamaan (15). Hasil analisis yang ditunjukkan pada **Tabel 5**, merupakan hasil analisis dalam kondisi keamanan. Panjang perkuatan 8,3 m untuk dinding penahan dengan tinggi 5 m didapatkan faktor keamanan terhadap gaya geser masing-masing 1,49 untuk Rankine dan 1,50 untuk Coulomb. Dinding penahan dengan tinggi 5,7 m memerlukan panjang perkuatan 7,7 m mencapai faktor keamanan di atas 1,5, sedangkan untuk dinding penahan dengan tinggi 6 m memerlukan panjang perkuatan 6 m. Ini menunjukkan bahwa nilai sudut geser tanah memberikan pengaruh pada perancangan penahan tanah.

**Tabel 5** Faktor Keamanan terhadap Gaya Geser

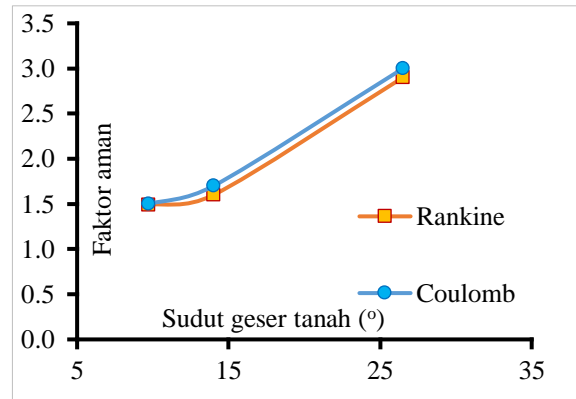
| Tinggi (m) | Sudut geser ( $\phi$ ) | Faktor keamanan |         |
|------------|------------------------|-----------------|---------|
|            |                        | Rankine         | Coulomb |
| 5          | 9,72                   | 1,49            | 1,50    |
| 5,7        | 14,00                  | 1,60            | 1,70    |
| 6          | 26,50                  | 2,90            | 3,00    |

Hubungan tinggi tebing dengan faktor keamanan terhadap gaya geser terlihat berbeda dengan tinjauan lainnya (**Gambar 13**). Faktor keamanan terhadap gaya geser menunjukkan hubungan non-linier dengan tinggi tebing.

Tinggi dinding penahan direncanakan sama dengan tinggi tebing, Semakin tinggi dinding penahan maka gaya berat semakin tinggi juga, sehingga gaya perlawanan terhadap geser semakin tinggi. Hal ini dapat menjadi penyebab semakin tinggi faktor keamanan pada dinding penahan yang tinggi. Faktor keamanan terhadap geser erat kaitannya dengan nilai sudut geser dalam tanah. Peningkatan faktor keamanan terhadap geser memiliki hubungan linier dengan nilai sudut geser dalam tanah (**Gambar 14**).



**Gambar 13** Faktor Keamanan terhadap Geser Berdasarkan Tinggi Tebing



**Gambar 14** Faktor Keamanan terhadap Geser Berdasarkan Sudut Geser Tanah

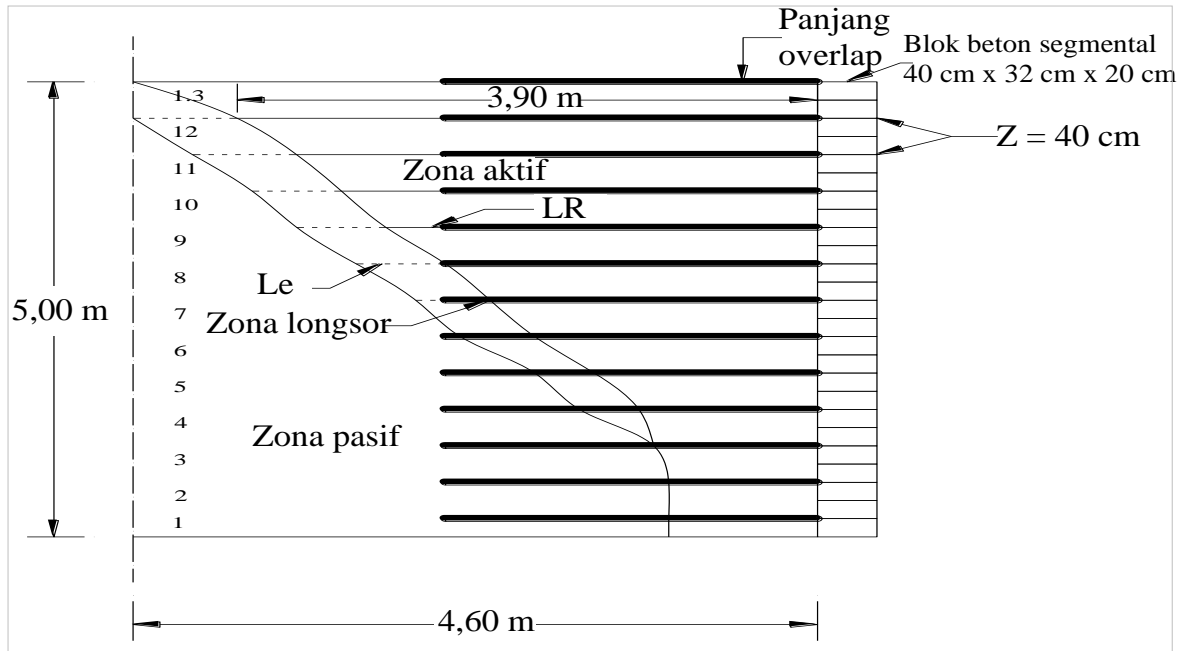
**Hasil Perancangan Dinding Penahan Tanah**

Hasil perancangan penahan tanah yang memenuhi syarat keamanan dapat menjaga kestabilan tebing sungai. Dinding penahan tanah dikatakan aman apabila faktor keamanan di atas 1,5 untuk gaya geser dan di atas 2 untuk gaya guling (SNI 8460, 2017). Tinggi penahan tanah harus proporsional dan mudah diaplikasikan pada kaki tebing (Hamidi & Sadisun, 2021). Perancangan penahan tanah pada tebing sungai dilakukan pada 3 (tiga) titik dibedakan berdasarkan tinggi tebing dan kemiringan lerengnya.

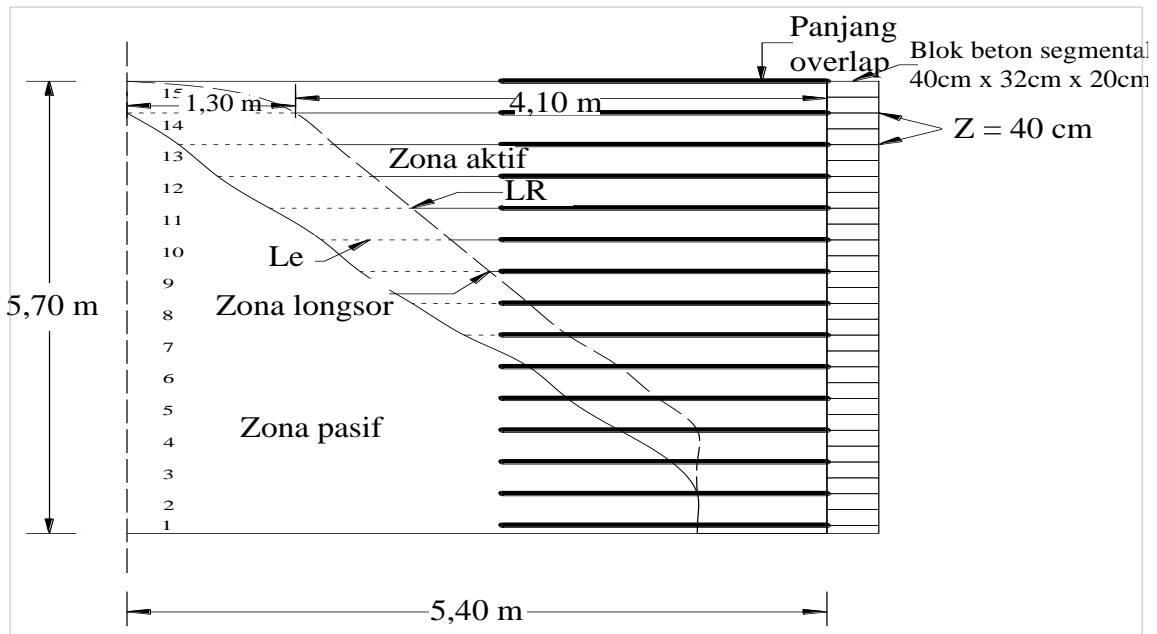
Hasil perancangan penahan tanah yang memenuhi syarat keamanan pada titik satu dengan tinggi penahan 5 m ditunjukkan pada **Gambar 15**. Panjang perkuatan yang aman adalah 8,3 m dengan jarak antar lapis sebesar 0,4 m. **Gambar 16** menunjukkan hasil perancangan penahan tanah pada titik dua dengan tinggi penahan 5,7 m, panjang perkuatan yang memenuhi syarat keamanan adalah 7,7 m, dan jarak antar lapis sebesar 0,4 m.

Penampang penahan tanah pada titik tiga diperlihatkan pada **Gambar 17**. Disain penahan tanah yang aman dan memenuhi syarat didapatkan pada ketinggian dinding penahan 6 m, Panjang perkuatan 6 m, dan jarak antar lapis perkuatan sebesar 0,4 m.

Dinding penahan direncanakan dari blok beton segmental yang diperkuat dengan tulangan-tulangan geosintetik. Blok beton segmental berukuran 40 cm x 32 cm x 20 cm. Tulangan atau perkuatan dari bahan geosintetik direncanakan dengan jarak spasi 40 cm. Panjang perkuatan menyesuaikan dengan hasil perencanaan yang dipengaruhi oleh tinggi tebing, kemiringan lereng, dan nilai sudut geser tanah. Perkuatan geosintetik didapatkan semakin panjang pada nilai sudut geser tanah yang semakin rendah.



Gambar 15 Hasil Perancangan Penahan Tanah pada Titik 1

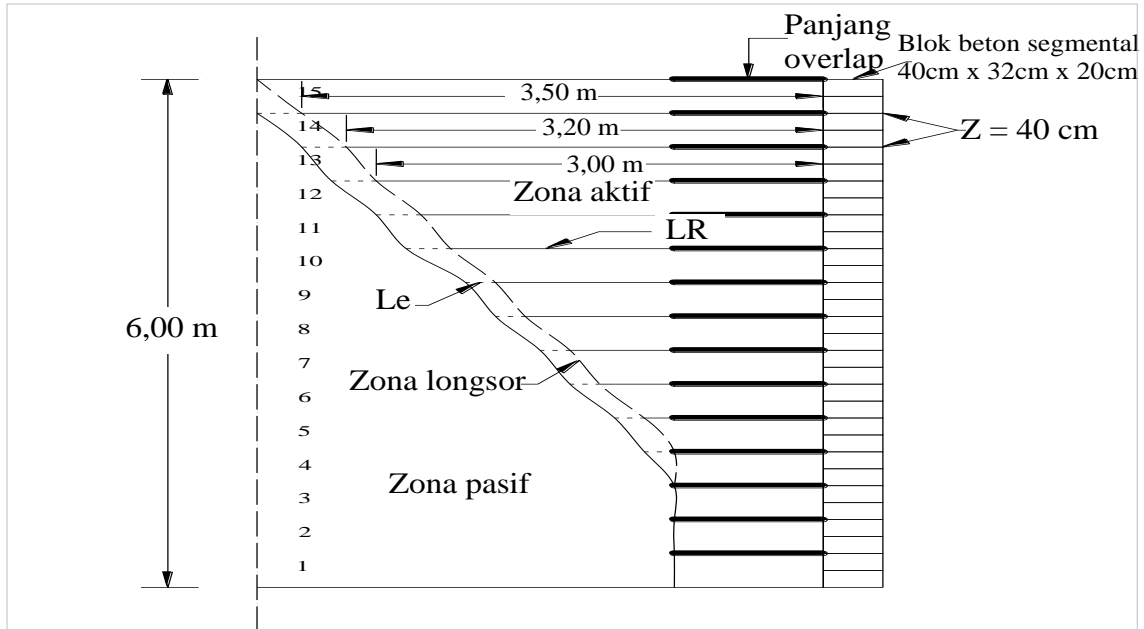


Gambar 16 Hasil Perancangan Penahan Tanah pada Titik 2

Selain model dinding penahan yang digunakan pada penelitian ini, beberapa tipe penahan tanah lainnya didapatkan cukup memberikan dampak pada stabilitas tebing sungai. Dinding penahan jenis *gravity wall* menunjukkan kinerja yang baik yang tergantung dari berat sendiri dinding (Sari et al., 2020). Pemodelan dinding penahan dapat menggunakan jenis *retained flexible barriers* yang menyesuaikan kondisi lapangan dan ditinggikan sesuai tinggi tebing (Hamidi & Sadisun, 2021). Dinding penahan tanah dapat dirancang dengan

dinding kantilever dan turap sebagai metode perkuatan tebing sungai, hal ini pernah diterapkan pada sungai di Kabupaten Balangan, Provinsi Kalimantan Selatan (Widhiarsari & Prasetia, 2018).

Hasil perancangan dinding penahan yang didapatkan merupakan dinding penahan yang stabil terhadap bahaya guling dan geser. Menurut Amran & Kurniawan (2017), dinding penahan tanah yang aman terhadap guling dan geser apabila faktor keamanan yang didapatkan > 1,5.



Gambar 17 Hasil Perancangan Penahan Tanah pada Titik 3

Dinding penahan tebing sungai yang stabil dapat mengantisipasi tergerusnya tanah di sepanjang tebing sungai. Dinding penahan saja tidak cukup baik untuk mengantisipasi tergerusnya dasar dan tebing sungai sebaiknya menggunakan kombinasi dinding penahan (jika tebing relatif rendah < 8 meter dan turap jika tebing > 8m), kemudian dikombinasi dengan pengarah arus atau krib. Hal ini dapat mencegah aliran debris dan mengendalikan sedimen di dasar sungai, sehingga bermanfaat pada penanggulangan bencana (Sukatja et al., 2021). Dinding penahan sungai yang aman terhadap pergeseran, penggulingan, dan keruntuhan kapasitas dukung tanah dapat berkontribusi pada pengendalian banjir (Ishak & Ruwiyo, 2018).

**KESIMPULAN**

Uji tanah yang diperlukan untuk menentukan parameter tanah dapat menggunakan uji geser langsung atau uji triaksial. Urugan tanah di belakang dinding penahan diasumsi dalam keadaan terdrainase, sehingga lebih relevan menggunakan hasil uji geser langsung dalam kondisi terdrainase. Berdasarkan uji ini didapatkan nilai sudut geser yang berbeda satu sama lainnya. Nilai sudut geser pada penelitian ini cukup tinggi pada tebing sungai yang lebih rendah. Nilai sudut geser tanah merupakan parameter tanah yang sangat penting diketahui pada perancangan dinding penahan tanah. Parameter lain yang tidak kalah penting seperti nilai kohesi dan pengaruh besarnya tegangan air pori akibat adanya muka air baik akibat adanya M.A.T, pengaruh hujan maupun fluktuasi muka air sungai.

Perancangan dinding penahan menyesuaikan tinggi tebing sungai dan kemiringan lereng. Tipe dinding penahan yang digunakan pada penelitian ini merupakan penahan tanah dari blok beton segmental yang diperkuat dengan tulangan-tulangan geosintetik. Panjang perkuatan geosintetik dipengaruhi oleh tinggi tebing, kemiringan lereng, dan nilai sudut geser tanah. Nilai sudut geser tanah didapatkan lebih dominan mempengaruhi panjang perkuatan geosintetik. Sudut geser tanah yang lebih rendah memperlihatkan perkuatan geosintetik yang lebih panjang. Tipe geosintetik yang digunakan adalah bahan lembaran *polymeric* yang mempunyai kuat tarik yang tinggi. Ujung depan tulangan-tulangan geosintetik ini ditindih di antara elemen-elemen segmental.

Faktor keamanan secara keseluruhan semakin tinggi pada tebing sungai yang memiliki nilai sudut geser tanah yang lebih tinggi. Terutama pada faktor keamanan terhadap gaya cabut tulangan dan gaya geser, sedangkan faktor keamanan terhadap gaya tarik dan gaya guling menunjukkan peningkatan pada nilai sudut geser sampai 14°.

Faktor keamanan erat kaitannya dengan koefisien tanah lateral aktif yang dapat ditentukan dengan menggunakan metode Rankine dan Coulomb. Faktor keamanan yang menggunakan koefisien tanah dari metode Rankine umumnya lebih tinggi dari metode Coulomb. Nilai  $K_a$  metode Coulomb lebih tinggi daripada  $K_a$  metode Rankine, hal ini berpengaruh pada gaya lateral aktif yang semakin tinggi, sehingga faktor keamanan semakin rendah.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Tim penulis memberikan apresiasi dan mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penyelesaian penelitian ini, baik laboran di Laboratorium Mekanika Tanah Teknik Sipil maupun staf pengajar lainnya di Universitas Simalungan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Amran, Y., & Kurniawan, D. (2017). Perencanaan Dinding Penahan Tanah Sungai Way Batanghari Kota Metro dengan Metode Revetment Retaining Wall. *Tapak*, 6(2), 157–165.
- Benyamin, E. A., Udiana, I. M., & Utomo, S. (2017). Perkuatan Tebing Menggunakan Bronjong Di Sungai Manikin. *Jurnal Teknik Sipil*, 6(2), 187–198.
- Damanik, D. R. S., & Sianturi, N. M. (2018). Evaluasi Kegunaan Ilmu Teknik dan Manajemen Dalam Kebutuhan Air Bersih Pada Masyarakat di Wilayah Kota Raya Kabupaten Simalungun. *Jurnal Stindo Profesional*, 4(4), 112–128.
- Hamidi, M. I., & Sadisun, I. A. (2021). Analisis Bahaya, Lintasan, dan Sistem Proteksi terhadap Potensi Longsoran Tipe Jatuhan Batu pada Lereng Bangunan Pelimpah Bendungan Tugu, Jawa Timur. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 12(2), 65–78. <https://doi.org/10.32679/jth.v12i2.663>
- Ishak, I., & Ruwiyo, R. (2018). Kajian Dinding Penahan Tanah Pada Tebing Sungai Untuk Pengendalian Banjir. *Rang Teknik Journal*, 1(2), 287–294. <https://doi.org/10.31869/rtj.v1i2.773>
- Maulana, M., Hanova, Y., Waruwu, A., & Putra, E. R. (2019). Simplified Method for Prediction of Settlement in Bamboo Piles-Reinforced Peat under Embankment. *Journal of Applied Engineering Science*, 17(1), 35–42. <https://doi.org/10.5937/jaes17-18793>
- Mina, E., Fathonah, W., & Sari, F. D. C. (2019). Analisis Stabilitas Dinding Penahan Tanah Untuk Perkuatan Tebing Badan Jalan Suradita - Kranggan. *Jurnal Fondasi*, 8(1), 12–21. <https://doi.org/10.36055/jft.v8i1.5397>
- Mukhriansyah. (2018). Analisa Stabilitas Perkuatan Tebing Sungai Pada Hulu Sungai Amandit. *Buletin Profesi Insinyur*, 1(2), 67–69. <https://doi.org/10.20527/bpi.v1i2.23>
- Rosihun, M., & Endaryanta. (2011). Analisis Stabilitas Talud Bronjong Uin Sunan Kalijaga Yogyakarta. *Inersia*, 7(2), 182–201.
- Sari, U. C., Sholeh, M. N., & Hermanto, I. (2020). The Stability Analysis Study of Conventional Retaining Walls Variation Design in Vertical Slope. *Journal of Physics: Conference Series*, 1444(1), 1–10. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1444/1/012053>
- Sholeh, M., & Yunaefi. (2016). Penggunaan Blok Beton Segmental Sebagai Dinding Penahan Dengan Diperkuat Geosintetik. *Prokons: Jurnal Teknik Sipil*, 10(2), 120-126. <http://dx.doi.org/10.33795/prokons.v10i2.117>
- Sianturi, N. M. (2014). Performance of Clean Water Reservoir in Pematangsiantar, Indonesia, Affected by Earthquake. *Journal of Civil Engineering Research*, 4(3A), 237–244. <http://article.sapub.org/10.5923.c.jce.201402.41.html>
- Sianturi, N. M, Kamarudin, K. M, Demanik, D.R.S Damanik, Purba, V.E, Saragih, D.S. (2022). Perilaku Mekanis Tanah Lunak yang Distabilisasi dengan Kapur dan Abu Vulkanik, *Jurnal Media Komunikasi Teknik Sipil*, 28(1), 118-127, <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/mkts/isue/view/3320>
- Sianturi, N. M, Kamarudin, K. M., Amri, Sudianto, S., Khalit, S. I., & Umar, R. (2021). Analysis of the Impact of Surface Volume Reduction on River Height Sedimentation Around Pangurusan District, Samosir Regency, North Sumatra, Indonesia. *London Journal of Research in Science: Natural and Formal*, 21(2), 79–91. <https://journalspress.com/wp-content/uploads/2021/03/Analysis-of-the-Impact-of-Surface-Volume-Reduction-on-River-Height-Sedimentation-Around-Pangurusan-District-Samosir-Regency-North-Sumatra-Indonesia.pdf>
- Sianturi, N. M., Saragih, D. S., Purba, V. E., & Damanik, D. R. S. (2021). Bahaya Longsor dan Pencegahan Di Kelurahan Sukadame Kecamatan Siantar Utara Kota Pematangsiantar. *Jurnal Publikasi Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(2), 49–62.
- Sianturi, N. M., Kamarudin, M. K. A., Wahab, N. A., & Mohd Saudi, A. S. (2019). The Hydraulic Modelling on Sediments Ponds in Binanga Aron River, North Sumatera Indonesia. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2), 392–404, <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v8i2/B1497078219.pdf>
- Sholeh, M, Yunaefi, (2016), Penggunaan Blok Beton Segmental Sebagai Dinding Penahan Dengan Perkuatan Geosintetik, *Jurnal Teknik Sipil Vol 10, No 2*, 120-126. <http://prokons.polinema.ac.id/index.php/PROKONS/article/view/117/115>

- SNI 8460 (2017). Persyaratan Perancangan Geoteknik. *Badan Standardisasi Nasional*. Jakarta. <https://doi.org/10.14710/mkts.v25i2.21018>
- Sukatja, C. B., Banata, W. R., & Bahri, P. (2021). Mitigasi dan Penanggulangan Bencana Banjir Debris Pasca Gempa Palu 2018. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 12(1), 25–38. <https://doi.org/10.32679/jth.v12i1.648>
- Waruwu, A., Halim, H., Nasution, T., & Hanova, Y. (2018). Bamboo Grid Reinforcement on Peat Soil under Repeated Loading. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(8), 2190–2196.
- Waruwu, A., Hardiyatmo, H. C., & Rifa'i, A. (2019a). The Performance of The Nailed Slab System-Supported Embankment on Peat Soil. *International Review of Civil Engineering*, 10(5), 243–248. <https://doi.org/10.15866/irece.v10i5.15757>
- Waruwu, A., Hardiyatmo, H. C., & Rifa'i, A. (2019b). Uji Beban Timbunan yang Diperkuat dengan Sistem Pelat Terpaku pada Tanah Gambut. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 25(2), 152–159.
- Waruwu, A., Hardiyatmo, H. C., & Rifa'i, A. (2016). Studi Eksperimental Pembebanan Pelat yang Diperkuat Tiang pada Tanah Gambut. *Seminar Nasional Geoteknik 2016 HATTI Yogyakarta*, 53–59.
- Waruwu, A., Susanti, R. D., Endriani, D., & Hutagaol, S. (2020). Effect of Loading Stage on Peat Compression and Deflection of Bamboo Grid with Concrete Pile. *International Journal of GEOMATE*, 18(66), 150–155. <https://doi.org/10.21660/2020.66.62072>
- Widhiasari, P., & Prasetya, I. (2018). Risk Analysis of Cantilever Wall and Sheet Pile as River Cliff Reinforcement Methods. *American Journal of Engineering Research*, 7(12), 190–194.
- Yuliana, I., Wahyudi, A. H., & Muttaqien, A. Y. (2018). Analisis Bata Interlock Sebagai Alternatif Bahan Pelindung Tebing Sungai Yang Ramah Lingkungan (Studi Kasus Kali Pepe Surakarta). *Matriks Teknik Sipil*, 6(2), 263–271. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v6i2.36569>