



## Analisis Rembesan Terhadap Kestabilan Lereng Pada Tanggul Kolam Retensi

Gabriel K. Tirayoh<sup>#a</sup>, Roski R. I. Legrans<sup>#b</sup>, Lanny D. K. Manaroinsong<sup>#c</sup>

<sup>#</sup>Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

<sup>a</sup>friendlyhosang021@student.unsrat.ac.id, <sup>b</sup>legransroski@unsrat.ac.id, <sup>c</sup>lanny.manaroinsong@unsrat.ac.id

### Abstrak

Banjir bandang yang melanda Kota Manado pada tahun 2020 mendorong pemerintah merencanakan pembangunan kolam retensi di kawasan Kleak, dekat Stadion Klabat, sebagai upaya mitigasi struktural untuk mengendalikan limpasan air perkotaan. Kolam retensi tersebut dirancang dengan tanggul tanah setinggi 5 meter dan muka air rencana 4 meter. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan lereng tanggul pada berbagai kondisi kritis, meliputi kondisi tanpa air, steady state, rapid drawdown, serta pengaruh beban gempa. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi efektivitas penanganan struktural berupa toe drain dan filter drain dalam meningkatkan faktor keamanan lereng. Analisis kestabilan dilakukan menggunakan Metode Bishop Simplified secara manual dan diverifikasi dengan perangkat lunak Geostudio (modul SLOPE/W). Garis freaktik pada kondisi steady state ditentukan melalui metode Kozeny untuk menghasilkan flownet, sedangkan analisis rapid drawdown dan gempa dilakukan berdasarkan prinsip tegangan efektif. Geometri tanggul memiliki kemiringan lereng hulu 1:3 dan hilir 1:2,5, serta dilengkapi dengan filter drain dan toe drain sebagai elemen perkuatan. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan faktor keamanan antara perhitungan manual Bishop Simplified (FK = 2,28) dan Geostudio (FK = 2,53) sebesar 0,3. Pada kondisi steady state, faktor keamanan tertinggi sebesar 2,04 diperoleh dengan penggunaan filter drain. Pada kondisi rapid drawdown, faktor keamanan tertinggi sebesar 3,48 dicapai dengan toe drain. Sementara itu, pada kondisi gempa steady state, faktor keamanan sebesar 1,21 masih memenuhi kriteria minimum stabilitas. Kesimpulannya, tanggul kolam retensi dengan penanganan struktural filter drain memenuhi seluruh kriteria stabilitas pada kondisi statis, rapid drawdown, maupun gempa. Oleh karena itu, filter drain direkomendasikan sebagai penanganan struktural utama untuk menjamin kestabilan dan keamanan tanggul kolam retensi di lokasi penelitian.

*Kata kunci:* kestabilan lereng tanggul, Geostudio, filter drain, toe drain, rapid drawdown, steady state

### 1. Pendahuluan

Pemerintah Kota Manado merencanakan pembangunan Kolam Retensi Stadion Klabat sebagai upaya preventif terhadap banjir bandang yang terjadi pada tahun 2020. Kolam retensi ini dirancang untuk menampung limpasan (*runoff*) air dan mengalirkannya sesuai sistem perencanaan yang aman. Dalam perencanaan kolam retensi, diperlukan desain tanggul yang memadai dan efisien agar mampu menahan beban air serta mencegah kegagalan struktur akibat longsor.

Penelitian ini membahas perencanaan tanggul kolam retensi dengan penerapan penanganan struktural berupa toe drain dan filter drain, serta membandingkannya dengan kondisi tanpa penanganan, dalam rangka meningkatkan faktor keamanan tanggul. Geometri tanggul direncanakan dengan kemiringan lereng sisi dalam 1:3 dan sisi luar 1:2,5, serta tinggi tanggul 5 meter. Analisis kestabilan lereng dilakukan menggunakan Metode Bishop Simplified secara manual, kemudian diverifikasi dengan perangkat lunak Geostudio (modul SLOPE/W dan SEEP/W).

Hasil penelitian diharapkan memberikan gambaran mengenai efektivitas penggunaan toe drain dan filter drain dalam meningkatkan stabilitas tanggul kolam retensi, sekaligus menjadi rekomendasi teknis bagi perencanaan infrastruktur pengendali banjir di Kota Manado.

## 2. Landasan Teori

### 2.1. Kolam Retensi sebagai Bangunan Pengendali Banjir

Kolam retensi merupakan salah satu bentuk bangunan pengendali banjir yang dirancang untuk menampung limpasan air hujan (runoff) secara sementara sebelum dialirkan kembali ke saluran utama atau dibiarkan meresap ke dalam tanah. Fungsi utama kolam retensi adalah mengurangi debit puncak aliran permukaan, sehingga dapat menekan risiko genangan maupun banjir di kawasan hilir. Dengan demikian, kolam retensi berperan sebagai elemen penting dalam sistem drainase perkotaan yang berkelanjutan.

Keberadaan kolam retensi menjadi sangat krusial di daerah perkotaan yang memiliki tingkat impermeabilitas lahan tinggi akibat dominasi permukaan kedap air seperti jalan, bangunan, dan perkerasan. Kondisi tersebut menyebabkan berkurangnya kapasitas infiltrasi tanah dan meningkatnya volume limpasan permukaan. Tanpa adanya fasilitas pengendali, limpasan yang besar dapat membebani saluran drainase dan menimbulkan banjir lokal maupun banjir bandang.

Selain fungsi hidrologis, kolam retensi juga memiliki manfaat tambahan, antara lain:

- Konservasi air, melalui peningkatan infiltrasi ke dalam tanah;
- Pengendalian kualitas air, dengan memungkinkan sedimentasi dan penyaringan alami sebelum air dialirkan ke badan air;
- Manfaat ekologis dan sosial, seperti penyediaan ruang terbuka hijau, habitat mikro, serta potensi pemanfaatan sebagai sarana rekreasi.

Dengan peran multifungsi tersebut, kolam retensi menjadi salah satu strategi mitigasi struktural yang direkomendasikan dalam perencanaan tata ruang dan pengelolaan banjir perkotaan.

### 2.2. Metode Kesetimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method / LEM*)

Metode kesetimbangan batas atau Limit Equilibrium Method (LEM) merupakan salah satu pendekatan klasik yang digunakan dalam analisis kestabilan lereng. Prinsip dasar metode ini adalah membagi massa tanah di atas bidang gelincir menjadi sejumlah irisan vertikal (slices), kemudian menganalisis keseimbangan gaya dan momen pada setiap irisan untuk menentukan kondisi stabilitas lereng secara keseluruhan.

Dalam penerapannya, LEM menggunakan kriteria kekuatan geser tanah Mohr–Coulomb, dengan asumsi bahwa bidang runtuh berbentuk busur lingkaran. Kriteria Mohr–Coulomb menyatakan bahwa kekuatan geser tanah ( $\tau$ ) merupakan fungsi dari kohesi ( $c'$ ), tegangan normal efektif ( $\sigma'$ ), dan sudut geser dalam ( $\phi'$ ):

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$$

Tujuan utama analisis dengan metode ini adalah untuk memperoleh faktor keamanan (FK), yaitu rasio antara kekuatan geser tanah yang tersedia terhadap tegangan geser yang bekerja pada bidang gelincir:

$$FK = \frac{\text{Kekuatan geser tanah yang tersedia}}{\text{Tegangan geser yang bekerja}}$$

Nilai FK digunakan sebagai indikator kestabilan lereng. Lereng dianggap stabil apabila nilai FK lebih besar dari 1, sedangkan nilai FK mendekati atau lebih kecil dari 1 menunjukkan kondisi kritis atau tidak stabil.

Metode LEM memiliki beberapa variasi, seperti Bishop Simplified, Janbu, dan Morgenstern–Price, yang berbeda dalam asumsi keseimbangan gaya antar irisan. Namun, secara umum, metode Bishop Simplified banyak digunakan karena memberikan hasil yang cukup akurat untuk bidang gelincir berbentuk lingkaran dengan kompleksitas perhitungan yang relatif sederhana. Berikut ini adalah persamaan metode Bishop Simplified:

$$FS = \frac{\Sigma(c'.b_n + (W_n \cdot \tan\phi). \tan\phi'i)/ \cos\alpha i}{\Sigma W_n \cdot \sin\alpha i}$$

### 2.3. Rembesan pada Struktur Tanggul

Rembesan (*seepage*) adalah pergerakan air melalui media berpori seperti tanah akibat adanya perbedaan tekanan hidraulik antara dua titik. Pada struktur tanggul, fenomena ini terjadi apabila terdapat perbedaan tinggi muka air di kedua sisi tanggul, sehingga mendorong air meresap ke dalam tubuh tanah. Analisis rembesan penting dilakukan untuk menilai stabilitas tanggul, karena aliran air dapat menimbulkan peningkatan tekanan pori, mengurangi tegangan efektif, dan berpotensi menyebabkan kegagalan struktur.

Untuk memodelkan rembesan, digunakan flownet, yaitu kombinasi garis aliran (*flow lines*) dan garis equipotensial (*equipotential lines*) yang menggambarkan distribusi tekanan air dalam tubuh tanah. Rumus Kozeny digunakan untuk menghitung debit rembesan melalui flownet, dimana rumus debit adalah:

$$q = k(-L + \sqrt{L^2 + h_u^2})$$

dengan:

$q$  = debit rembesan ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$k$  = koefisien permeabilitas tanah ( $\text{m}/\text{s}$ )

$L$  = panjang lintasan aliran (m)

$h_u$  = tinggi muka air (m)

Langkah perhitungan flownet adalah sebagai berikut:

- Menentukan nilai outflow per panjang OB

$$Se = \frac{q}{2k}$$

- Menentukan jumlah *flow channel* ( $n_f$ )

$$\Delta\Psi = \frac{q}{n_f}$$

- Menentukan perbedaan tinggi tiap garis equipotensial

$$\Delta h = \frac{\Delta\Phi}{k}$$

- Menentukan jumlah garis equipotensial ( $\eta_E$ )

$$\eta_E = \frac{h_w}{\Delta h}$$

## 3. Metodologi Penelitian

### 3.1. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan studi analisis numerik yang dilakukan untuk mengevaluasi pola aliran rembesan serta kestabilan lereng tanggul kolam retensi. Analisis dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu perhitungan manual menggunakan metode Bishop Simplified dan perhitungan numerik berbasis Finite Element Method (FEM) melalui aplikasi Geostudio. Tujuan utama penelitian adalah membandingkan hasil kedua metode dalam menentukan nilai faktor keamanan lereng. Fokus penelitian diarahkan pada satu potongan tanggul kolam retensi serta satu titik sondir yang dianggap kritis, sehingga dapat merepresentasikan kondisi keseluruhan tanggul kolam retensi.

### 3.2. Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder, meliputi data tanah, geometri tanggul, serta kondisi muka air.

#### a. Data Tanah

Pemodelan tanah dilakukan dengan menggunakan Mohr-Coulomb Model, yang merepresentasikan perilaku elastis-plastis dengan parameter kekuatan geser internal. Seluruh material tanah dimodelkan dalam kondisi drained, sehingga perubahan tekanan pori dan respons parameter tanah diperhitungkan sesuai kondisi jenuh. Parameter tanah yang digunakan adalah sebagai berikut:

##### 1. Tanah Timbunan

- o Berat isi jenuh ( $\gamma_{sat}$ ) = 18 kN/m<sup>2</sup>

- Sudut geser dalam ( $\phi$ ) =  $25^\circ$
  - Permeabilitas tanah ( $k$ ) =  $0,0001 \text{ m/s}$
  - Kohesi ( $c'$ ) =  $7 \text{ kN/m}^2$
  - 2. Tanah Dasar (Medium Sand)
    - Berat isi jenuh ( $\gamma_{sat}$ ) =  $20,84 \text{ kN/m}^2$
    - Sudut geser dalam ( $\phi$ ) =  $34^\circ$
  - 3. Material Toe Drain dan Filter Drain
    - Kohesi ( $c$ ) = 0
    - Sudut geser dalam ( $\phi$ ) =  $40^\circ$
- Pemilihan Mohr-Coulomb Model didasarkan pada kesederhanaannya serta kemampuannya merepresentasikan perilaku tanah dengan cukup baik untuk analisis kestabilan lereng.
- b. Geometri Tanggul
- Geometri tanggul kolam retensi yang digunakan dalam pemodelan adalah sebagai berikut:
- Lebar bawah ( $B$ ) =  $29,5 \text{ m}$
  - Tinggi ( $H$ ) =  $5 \text{ m}$
  - Lebar atas ( $L$ ) =  $2 \text{ m}$
  - Rasio sisi hilir =  $1 : 2,5$
  - Rasio sisi hulu =  $1 : 3$
- c. Kondisi Hidrogeologi
- Tinggi muka air yang digunakan dalam analisis adalah 4 meter, sesuai dengan rencana operasional kolam retensi.

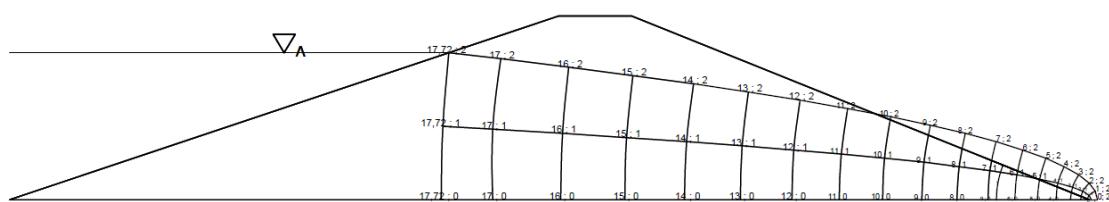
## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1. Analisis Garis Freatik dan Flownet

#### 1. Kondisi Tanpa Penanganan

- Debit rembesan:  $q = 0,000045 \text{ m}^3/\text{s}$
- Nilai  $S_e = 0,22 \text{ m}$
- Nilai  $y_0 = 0,451 \text{ m}$
- Jumlah garis equipotensial:  $\eta_E = 17,72$
- Koordinat hasil perhitungan:  $x = -0,23 \text{ m}, y = 0$
- Perbaikan garis freatik menghasilkan koreksi  $\Delta S_e = 2,49 \text{ m}$

Interpretasi: tanpa penanganan, garis freatik relatif tinggi sehingga potensi rembesan cukup besar.



**Gambar 1.** Garis Freatik dan Flownet pada Tanggul Kolam Retensi – Tanpa Penanganan

#### 2. Kondisi dengan Toe Drain

- Debit rembesan:  $q = 0,000056 \text{ m}^3/\text{s}$
- Nilai  $S_e = 0,28 \text{ m}$
- Nilai  $y_0 = 0,560 \text{ m}$
- Jumlah garis equipotensial:  $\eta_E = 14,28$
- Koordinat hasil perhitungan:  $x = -0,28 \text{ m}, y = 0$
- Karena  $S_e < 0,5 \text{ m}$ , perbaikan garis freatik tidak diperlukan.

Interpretasi: toe drain menurunkan jumlah garis equipotensial dan menstabilkan garis freatik, sehingga rembesan lebih terkendali.

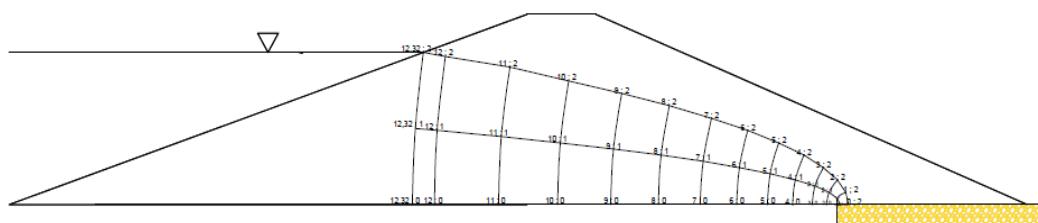


**Gambar 2.** Garis Freatik dan Flownet pada Tanggul Kolam Retensi – Dengan Toe Drain

### 3. Kondisi dengan Filter Drain

- Debit rembesan:  $q = 0,000065 \text{ m}^3/\text{s}$
- Nilai  $S_e = 0,32 \text{ m}$
- Nilai  $y_0 = 0,649 \text{ m}$
- Jumlah garis equipotensial:  $\eta_E = 12,32$
- Koordinat hasil perhitungan:  $x = -0,32 \text{ m}, y = 0$
- Karena  $S_e < 0,5 \text{ m}$ , perbaikan garis freatik tidak diperlukan.

Interpretasi: filter drain menghasilkan jumlah garis equipotensial paling sedikit, menunjukkan efektivitas tinggi dalam menurunkan garis freatik dan mengurangi tekanan air pori.



**Gambar 3.** Garis Freatik dan Flownet pada Tanggul Kolam Retensi – Dengan Filter Drain

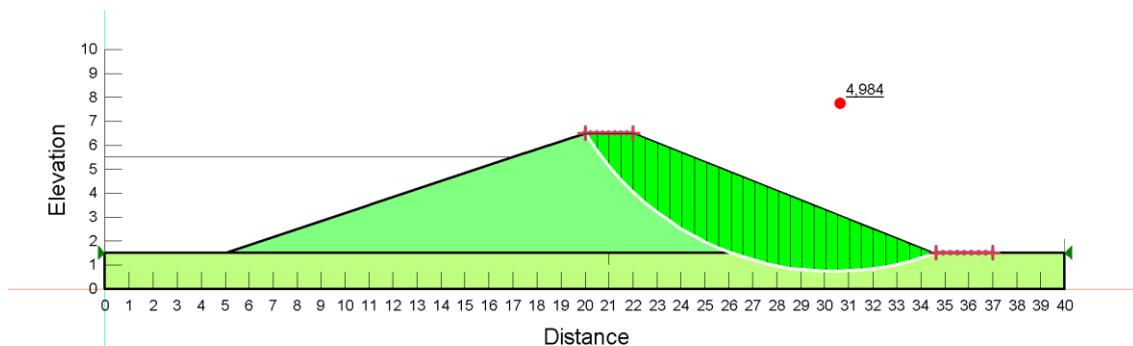
Ketiga hasil analisis memberikan kesimpulan yakni:

- Tanpa penanganan, garis freatik tinggi dan debit rembesan relatif besar, berpotensi mengurangi stabilitas tanggul.
- Toe drain menurunkan garis freatik dan mengurangi jumlah garis equipotensial, sehingga rembesan lebih terkendali.
- Filter drain memberikan hasil paling efektif dengan jumlah garis equipotensial terendah, menunjukkan kemampuan terbaik dalam mengendalikan rembesan dan meningkatkan stabilitas tanggul.

## 4.2. Analisis Stabilitas Lereng Tanggul

### 4.2.1 Analisis Tegangan Total (TSA)

Analisis tegangan total digunakan untuk memodelkan kondisi jangka pendek, ketika material lempung jenuh belum sempat mengalami disipasi tekanan air pori akibat pembebaan. Parameter kuat geser yang digunakan adalah undrained shear strength dengan nilai  $c_u = 50 \text{ kN/m}^2$  dan  $\phi = 0^\circ$ . Hasil perhitungan Geostudio menunjukkan kondisi stabil dengan nilai faktor keamanan sesuai asumsi jangka pendek.



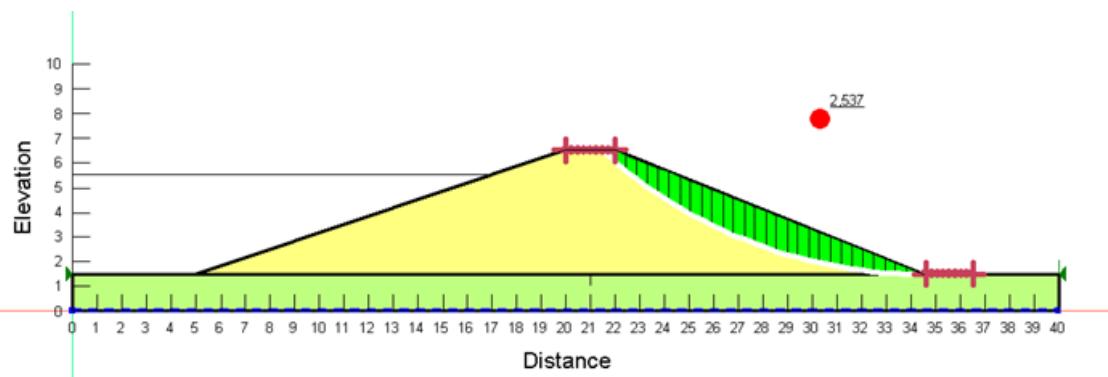
**Gambar 4.** Kestabilan Lereng Tanggul Kolam Retensi – Kondisi TSA

#### 4.2.2 Analisis Tegangan Efektif (ESA)

Analisis tegangan efektif digunakan untuk memodelkan kondisi jangka panjang, ketika air pori telah mencapai kesetimbangan hidrolik. Parameter kuat geser yang digunakan adalah drained shear strength ( $c'$  dan  $\phi'$ ).

- Bishop Simplified (manual):  $FS = 2,28$
- Geostudio (SLOPE/W):  $FS = 2,537$

Perbedaan hasil sebesar 0,3 menunjukkan konsistensi antara perhitungan manual dan numerik.



**Gambar 5.** Kestabilan Lereng Tanggul Kolam Retensi – Kondisi ESA

##### a. Steady State Condition

Pada kondisi *steady state*, muka air stabil di sisi hulu tanggul. Analisis flownet digunakan untuk menentukan garis freaktik, kemudian dimasukkan ke Geostudio.

- Tanpa penanganan: faktor keamanan relatif rendah.
- Toe drain: meningkatkan kestabilan dengan penurunan garis freaktik.
- Filter drain: memberikan faktor keamanan tertinggi, menunjukkan efektivitas paling baik dalam mengendalikan rembesan.

##### b. Rapid Drawdown Condition

Kondisi *rapid drawdown* terjadi ketika muka air turun secara cepat dalam hitungan hari, sehingga tekanan air pori berubah drastis dan kestabilan lereng menurun. Analisis dilakukan dengan Geostudio (SEEP/W dan SLOPE/W).

- Hari ke-1 dan ke-3: faktor keamanan menurun, namun penggunaan toe drain dan filter drain mampu menjaga kestabilan lebih baik dibandingkan tanpa penanganan.
- Filter drain tetap menunjukkan performa paling efektif dalam mengurangi risiko longsor akibat penurunan muka air mendadak.

##### c. Steady State dengan Pengaruh Gempa

Lokasi penelitian memiliki  $PGA = 0,4726$ . Dengan koefisien gempa  $k_h = 0,2363$ , hasil analisis Geostudio menunjukkan:

- Tanpa penanganan:  $FK = 0,961$  (tidak memenuhi kriteria stabilitas).
- Toe drain:  $FK = 1,001$  (mendekati batas aman).
- Filter drain:  $FK = 1,213$  (memenuhi kriteria stabilitas).

**Tabel 1.** Faktor Keamanan dalam Kondisi *Rapid Drawdown*

	Faktor Keamanan (FK)		
	tanpa penanganan	Filter drain	toe drain
keadaan awal	5,01	5,04	5,07
12 jam	4,63	4,64	4,68
1 hari	4,31	4,32	4,35
2 hari	3,84	3,84	3,87
3 hari	3,53	3,52	3,56
5 hari	3,45	3,44	3,48
8 hari	3,51	3,49	3,54
11 hari	3,54	3,5	3,55
15 hari	3,56	3,51	3,56
22 hari	3,55	3,52	3,57
30 hari	3,57	3,52	3,57

**Tabel 2.** Perbandingan Faktor Keamanan Lereng Tanggul

Kondisi Analisis	Metode/Software	Tanpa Penanganan	Toe Drain	Filter Drain
Tegangan Total (TSA)	Geostudio	Stabil ( $c_u = 50$ , $\phi = 0$ )	—	—
Tegangan Efektif (ESA)	Bishop Simplified (manual)	FK = 2,28	—	—
	Geostudio (SLOPE/W)	FK = 2,537	—	—
Steady State	Geostudio (SLOPE/W)	FK < 2,0	FK ↑ (lebih stabil)	FK = 2,04 (tertinggi)
Rapid Drawdown	Geostudio (SEEP/W + SLOPE/W)	FK menurun signifikan	FK ↑ (lebih aman)	FK = 3,48 (tertinggi)
Steady State + Gempa	Geostudio (SLOPE/W)	FK = 0,961 (tidak stabil)	FK = 1,001 (mendekati batas aman)	FK = 1,213 (memenuhi kriteria stabilitas)

#### 4.3. Pembahasan

Analisis Tegangan Total (TSA) menunjukkan bahwa kondisi jangka pendek tanggul kolam retensi relatif stabil dengan asumsi undrained, di mana tanah lempung jenuh belum mengalami disipasi tekanan air pori. Hal ini menegaskan bahwa pada tahap awal pembebanan, tanggul masih mampu menahan gaya geser meskipun parameter yang digunakan terbatas pada kuat geser undrained.

Sementara itu, analisis Tegangan Efektif (ESA) memberikan hasil yang konsisten antara perhitungan manual menggunakan metode Bishop Simplified dan simulasi numerik dengan Geostudio. Konsistensi ini memperkuat validitas pendekatan yang digunakan, serta menunjukkan bahwa metode manual masih relevan sebagai verifikasi terhadap perangkat lunak numerik dalam analisis kestabilan lereng.

Dari sisi penanganan struktural, filter drain terbukti paling efektif dalam seluruh kondisi analisis, baik *steady state*, *rapid drawdown*, maupun kondisi dengan pengaruh gempa. Faktor keamanan yang dicapai selalu lebih tinggi dibandingkan alternatif lainnya, sehingga filter drain dapat direkomendasikan sebagai solusi utama untuk meningkatkan stabilitas tanggul. Efektivitas filter drain terutama terlihat pada kemampuannya menurunkan garis freatik dan mengendalikan rembesan, sehingga tekanan air pori berkurang dan tegangan efektif tanah meningkat.

Toe drain juga memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan stabilitas, meskipun hasilnya tidak sebaik filter drain. Toe drain mampu menurunkan garis freatik dan mengurangi jumlah garis equipotensial, tetapi peningkatan faktor keamanan yang dicapai relatif lebih rendah. Dengan demikian, toe drain dapat dipertimbangkan sebagai alternatif tambahan, namun bukan sebagai solusi utama.

Sebaliknya, kondisi tanpa penanganan menghasilkan faktor keamanan yang rendah, terutama pada kondisi gempa, di mana nilai FK berada di bawah batas aman. Hal ini menunjukkan bahwa tanggul berisiko mengalami kegagalan lereng apabila tidak dilengkapi dengan sistem drainase yang memadai.

## 5. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis pengaruh rembesan terhadap kestabilan lereng tanggul kolam retensi Stadion Klabat, Kota Manado, dengan menggunakan metode Bishop Simplified secara manual dan perangkat lunak Geostudio (SLOPE/W dan SEEP/W). Hasil analisis menunjukkan bahwa:

1. Analisis Tegangan Total (TSA) memperlihatkan kondisi jangka pendek tanggul relatif stabil dengan asumsi undrained, sehingga tanggul mampu menahan beban awal meskipun tekanan air pori belum terdisipasi.
2. Analisis Tegangan Efektif (ESA) menghasilkan faktor keamanan yang konsisten antara perhitungan manual ( $FK = 2,28$ ) dan Geostudio ( $FK = 2,53$ ), menegaskan validitas metode yang digunakan.
3. Kondisi steady state menunjukkan bahwa penggunaan filter drain memberikan faktor keamanan tertinggi ( $FK = 2,04$ ), lebih efektif dibandingkan toe drain maupun tanpa penanganan.
4. Kondisi rapid drawdown memperlihatkan penurunan kestabilan lereng, namun penerapan toe drain dan filter drain mampu menjaga faktor keamanan, dengan nilai tertinggi dicapai oleh toe drain ( $FK = 3,48$ ).
5. Kondisi gempa steady state menunjukkan bahwa tanpa penanganan tanggul tidak stabil ( $FK = 0,961$ ), sedangkan toe drain hanya mendekati batas aman ( $FK = 1,001$ ). Filter drain kembali memberikan hasil terbaik dengan  $FK = 1,213$ , memenuhi kriteria stabilitas.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa filter drain merupakan penanganan struktural paling efektif dalam mengendalikan rembesan dan meningkatkan faktor keamanan tanggul pada berbagai kondisi kritis. Toe drain tetap memberikan kontribusi positif, namun tidak seoptimal filter drain. Tanpa penanganan, tanggul berisiko tinggi mengalami kegagalan lereng, khususnya pada kondisi gempa dan penurunan muka air mendadak. Oleh karena itu, filter drain direkomendasikan sebagai solusi utama untuk menjamin kestabilan dan keamanan tanggul kolam retensi Stadion Klabat.

## Referensi

- Direktorat Jendral SDA Balai Wilayah Sungai Sulawesi I, Kementerian PU (2020). Desain Kolam Retensi Stadion Klabat. Unit Desain BWS Sulawesi I.
- Departemen Pekerjaan Umum. (1987). Panduan Perencanaan Teknik Bendungan: Nomor 8060/KPTS/1978. Direktorat Jendral Pengairan.
- Amaretna, J., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2016). Soil and rock characterization testing and monitoring. John Wiley & Sons.
- ASTM International. (2012). Standard test method for electronic friction cone and piezocone penetrometers used with electronic piezocone equipment (D5778-12). ASTM Books of Standards.
- Bowles, J. E. (1997). Foundation analysis and design (5th ed.). McGraw-Hill.
- Das, B.M., & Sivakugan, N. (2019). Principles of soil mechanics (10th ed.). Cengage Learning.
- Das, B. M., Nagarathnam, S., & Sivakugan, N. (2019). Fundamentals of soil mechanics and foundations (5th ed.). Cengage Learning.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2018). GeoStudio User's Manual: Seep/W Seepage Analysis, SLOPE/W Slope Stability Analysis, and QUAKE/W Seismic Analysis. GEO-SLOPE International Ltd.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). Mekanika tanah II: Pengenalan jenis-jenis tanah dan sifat-sifat fisis tanah (4th ed.). Gadjah Mada University Press.
- Indonesia, Kementerian Pekerjaan Umum. (2010). Peta Hazard Gempa Indonesia 2010 sebagai acuan dasar perencanaan dan perancangan infrastruktur. Direktorat Jendral Bina Marga
- Mayne, P. W., Christoper, B. R., & DeJong, J. (2010). Manual on subsurface investigations: Geotechnical site characterization by in situ testing. Transportation Research Board National Cooperative Highway Research Program.
- Pedoman Kriteria Desain Embung Kecil. (1994). Departemen pekerjaan umum, Direktorat Jendral Sumber Daya Air. Sekretariat Negara Republik Indonesia
- Republic of Indonesia. (2004). Undang-Undang Nomor 7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air. Sekretariat Negara Republik Indonesia
- Robertson, P.K., & Cabal, G. (2010). Estimation of soil classification from the cone penetration test. Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing.

- Syofyan, I. (2022). Kolam retensi sebagai solusi konservasi air dan mitigasi banjir di Kawasan perkotaan. *Jurnal Hidrologi dan Lingkungan*, 28(1), 45-58
- Terzaghi, K. (1925). Principles of soil mechanics (part1: Phenomena of soil mechanics). *Engineering News-Record*, 95(19), 796-800.
- Terzhagi, K., Peck, R.B., & Mesri, G. (1996). Soil mechanics in engineering practice (3rd ed.). John & Sons
- Undang-undang No.7 Tahun 2004. (2004). Tentang Sumber Daya Air dan Sistem Drainase. Lembaran Negara Republik Indonesia.
- Pangalila, H., Ticoh, J. H., & Legrans, R. R. I. (2025). Desain Dinding Penahan Tanah Konstruksi Basement Hotel Bertingkat. TEKNO UNSRAT.
- Sompie, O. B. A., Rondonuwu, S. G., & Legrans, R. R. I. (2024). Minimalisir Pendangkalan Danau Tondano Melalui Pemanfaatan Material Kerukan Sebagai Bahan Timbunan – Suatu Uji Geoteknik Pada Perbaikan Tanah Lunak Dengan Memanfaatkan Water Hyacinth. TEKNO UNSRAT.
- Wior, W. E. M., Legrans, R. R. I., & Ticoh, J. H. (2025). Studi Kapasitas Fondasi Tiang Pancang Untuk Kelaikan Fungsi Bangunan Gedung Pada Konstruksi Gedung Pusat Perbelanjaan Di Manado. TEKNO UNSRAT