

PENGARUH PERMEABILITAS TERHADAP STABILITAS KEAMANAN BENDUNGAN GUNUNGROWO

Afrizon Kamiruddin ^{[1]*}, Abdul Chalid ^[1], Agus Sulaeman ^[1], Chandra Afriade Siregar ^[1]

^[1] *Departmet of Civil Engineering, Universitas Sangga Buana, Bandung, 40124, Indonesia*

Email: geoafrizon@yahoo.com, * agussulaeman150462@gmail.com, chandra.afriade@usbypkp.ac.id

*) Correspondent Author

Received: 23 March 2022; **Revised:** 31 August 2022; **Accepted:** 01 September 2022

How to cite this article:

Kamiruddin, A., Chalid, A., Sulaeman, A., Siregar, C., A., (2022). Pengaruh Permeabilitas Terhadap Stabilitas Keamanan Bendungan Gunungrowo. *Jurnal Teknik Sipil*, 18(2), 313 - 327. <https://doi.org/10.28932/jts.v18i2.4648>

ABSTRAK

Bendungan Gunungrowo dibangun sejak tahun 1925 terletak pada Sungai Wadi. Bendungan ini mempunyai tipe urugan tanah homogen dan mempunyai tinggi 20,5 m, dengan kapasitas tampungan 5,11 juta m³ untuk mensuplai air irigasi seluas 6.000 ha. Karena masa operasionalnya yang sudah mendekati 100 tahun maka perlu mengevaluasi tingkat stabilitas keamanan bendungannya. Tujuan penelitian ini untuk 1) mengetahui stabilitas keamanan rembesan dari berbagai skenario ketinggian muka air waduk; 2) mengetahui stabilitas keamanan lereng (*Safety Factor*) dari berbagai skenario ketinggian muka air waduk; 3) mengetahui variabel permeabilitas *core* berpengaruh terhadap rembesan ditubuh bendungan, dan 4) mengetahui variabel permeabilitas *core* berpengaruh terhadap stabilitas lereng di tubuh bendungan. Pembahasan utama yang dilakukan dalam penelitian ini adalah melakukan analisis stabilitas keamanan bendungan dengan memanfaatkan *software* GeoStudio-2012 dengan fitur SEEP/W pada debit rembesan dan SLOPE/W pada FK (Faktor Keamanan) lerengnya. Pemodelan pada SEEP/W ini menggunakan konsep *saturated soil mechanics*. Parameter yang diinput untuk analisis stabilitas lereng adalah dimensi bendungan, jenis material, berat isi (γ), kohesi (c), dan sudut geser (ϕ). Kajian dilakukan pada semua nilai debit rembesan dan semua nilai FK pada saat muka air berada pada elevasi minimum, normal, muka air banjir dan surut cepat dengan perhitungan tanpa beban gempa. Hasil kajian diperoleh nilai FK, nilai debit, stabil terhadap bahaya longsor dan bahaya *piping* memenuhi syarat aman. Selanjutnya dari nilai debit rembesan dan nilai FK dikaji bagaimana pengaruh variabel permeabilitas *core* bendungan terhadap bahaya *piping* dan potensi bahaya longsor. Dari hasil analisis disimpulkan bahwa semakin besar nilai permeabilitas semakin besar debit rembesan dan jika semakin besar nilai permeabilitas akan semakin kecil nilai faktor keamanannya.

Kata kunci: Faktor Keamanan, Rembesan, SEEP/W, SLOPE/W, Variabel Permeabilitas Inti.

ABSTRACT. THE EFFECT OF PERMEABILITY ON SAFETY OF GUNUNGROWO DAM STABILITY. *Gunungrowo Dam has been establishing in 1925, it is located on the Wadi River. This dam is a homogeneous earthfill dam with a height of 20.5 m, with a storage capacity of 5.11 million m³ to supply irrigation water for an area of 6,000 Ha. Because the operational period is approaching 100 years, it is necessary to evaluate the level of stability and safety of the dam. The purpose of this study was to 1) determine the stability of the seepage safety in various reservoir water levels; 2) determine the slope safety stability (Safety Factor) of the dam in various reservoir water level conditions; 3) determine the effect of the dam body core permeability variable on seepage, and 4) determine the effect of the dam body core permeability variable on slope stability. The main discussion in this study is to analyze the stability of the dam safety using the GeoStudio-2012 computer program with SEEP/W features on seepage discharge and SLOPE/W on SF (Safety Factor) slopes. The SEEP/W modeling uses the concept of saturated soil mechanics. The input parameters for slope stability analysis are dam dimensions, type of material, bulk density (γ), cohesion (c), and shear angle (ϕ). The study was conducted on all seepage discharge values and all SF values at minimum water level, normal water level, flood water level and fast receding with calculations without earthquake loads. The results of the study obtained that the SF value, discharge value,*

stable against landslide hazards and piping hazards met the safety requirements. Furthermore, from the seepage discharge value and the SF value, it is studied how the influence of the dam core permeability variable on the piping hazard and the potential for landslide hazard. From the results of the analysis, it is concluded that the greater the value of the permeability, the greater the seepage discharge and the greater the value of the permeability, the smaller the value of the safety factor.

Keywords: *Safety Factor, Seepage, SEEP/W, SLOPE/W, Core Permeability Variable.*

1. PENDAHULUAN

Bendungan Gunungrowo dibangun sejak tahun 1925 di Sungai Wadi yang merupakan bendungan urugan tanah homogen dengan tinggi 20,5 m, dengan kapasitas tampungan 5,11 juta m³ untuk keperluan mengairi jaringan irigasi seluas 6.000 Ha. Karena masa operasionalnya yang sudah mendekati 100 tahun maka perlu mengevaluasi tingkat stabilitas keamanan bendungannya (BBWS Pemali-Juana, 2018).

Tujuan penelitian ini untuk 1) mengetahui stabilitas keamanan rembesan dari berbagai skenario ketinggian muka air waduk; 2) mengetahui stabilitas keamanan lereng (*Safety Factor*) dari berbagai skenario ketinggian muka air waduk; 3) mengetahui variabel permeabilitas *core* berpengaruh terhadap rembesan ditubuh bendungan, dan 4) mengetahui variabel permeabilitas *core* berpengaruh terhadap stabilitas lereng di tubuh bendungan.

Soil-water characteristic curve (SWCC) merupakan parameter penting dalam mekanika tanah tak jenuh (*unsaturated soil*). Sifat dari mekanika tanah dengan pembasahan sangat penting karena banyak kegagalan lereng yang disebabkan oleh curah hujan selama proses pembasahan tanah lereng tersebut. Kristo et al., 2019, dalam penelitiannya membahas efek dari histeresis di SWCC pada stabilitas lereng tanah *unsaturated* di Bukit Timah Granit di Singapura. Studinya berfokus pada analisis perbedaan tekanan air pori dan variasi kadar air dibawah kondisi *unsaturated* dan *saturated* dengan melakukan rembesan numerik dan analisis stabilitas. Analisis dilakukan dengan 3 kondisi yaitu hanya menggunakan SWCC kering; hanya menggunakan SWCC basah; menggunakan penggabungan SWCC kering dan SWCC basah.

Berdasarkan teori mekanika tanah, untuk rembesan pada pasir sebagai partikel kasar memiliki permeabilitas yang tinggi pada kondisi jenuh (*saturated*) tetapi memiliki permeabilitas yang sangat rendah pada kondisi tak jenuh (*unsaturated*). Sebagai akibatnya ada penundaan waktu dalam proses pengeringan air di dalam lapisan pasir selama tahap construes (Satyanaga et al., 2021).

Al-Mansori et al., 2020 dalam penelitiannya menganalisis stabilitas terhadap rembesan di Bendungan Khassa Chai Iraq menggunakan *software* Geo-Studio SEEP/W. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, merubah nilai permeabilitas *core* dari 10⁻⁶ m/det menjadi 10⁻⁷ m/det akan mempengaruhi hasil dari nilai debit rembesan (*seepage*). Pada ketinggian muka air waduk 454

m, 471 m, dan 485 m diatas permukaan laut didapatkan hasil nilai debit rembesan (*seepage*) turun menjadi sekitar 8,7%, 13,2%, dan 15,3%.

Feryadi & Gofar, 2022 menganalisis stabilitas lereng dari tanggul yang dipengaruhi oleh perubahan muka air bebas, dengan membuat 9 skenario pemodelan dengan menggunakan *software* Geo-Studio SLOPE/W untuk menganalisis nilai *Safety Factor* stabilitas tanggul. Berdasarkan itu didapatkan nilai *Safety Factor* yang memenuhi syarat adalah kondisi ideal tanggul dengan menambahkan batu riprap.

Penelitian stabilitas lereng juga dilakukan oleh Putra et al., 2019 yang melakukan analisis dengan menggunakan 3 (tiga) metode yaitu metode Fellenius, metode Bishop dan metode Wedge. Didapatkan nilai Faktor Keamanan (FK) dari tiga metode tersebut pada kondisi elevasi muka air waduk surut cepat atau secara tiba-tiba (*rapid drawdown*) yaitu Fellenius = 1,32; Bishop = 1,38; Wedge = 1,41.

Selain menggunakan metoda numeris untuk menganalisis stabilitas lereng, (Nugraha & Sutanto, 2019) menganalisis stabilitas lereng dengan membandingkan metode numeris dan penggunaan *software* Geo5 dengan hasil selisih absolut stabilitas berdasarkan kurva Taylor dan *software* Geo5 berkisar antara 0,17% sampai dengan 3,08% dengan kondisi faktor jarak (n) 0 sampai dengan 3.

Beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya longsoran adalah karena ketidakstabilan permukaan lereng yang diakibatkan kondisi dinamis seperti proses infiltrasi dan evaporasi. Rahardjo et al., 2014, dalam penelitiannya menganalisis pengaruh infiltrasi dan evaporasi tekanan air pori pada lereng tanah di Telok Blangah, Singapura. Hasil dari analisis numerik yang dilakukan menunjukkan kesesuaian yang baik dengan hasil pengukuran dilapangan. Hal ini menunjukkan bahwa curah hujan dan evaporasi memainkan peranan penting dalam perubahan tekanan air pori tanah.

Rahardjo et al., 2016, melakukan analisis karakteristik hujan pada kestabilan tanah lereng. Pada studi tersebut digunakan metode IDF untuk curah hujan daerah Singapura, curah hujan dibagi dalam 6 durasi berbeda yaitu 10 menit, 20 menit, 30 menit, 1 jam, 2 jam, 24 jam dan dengan 6 frekuensi periode ulang yaitu 2 tahun, 5 tahun, 10 tahun, 25 tahun, 50 tahun dan 100 tahun. Kurva IDF tersebut digunakan untuk menganalisis rembesan dan stabilitas lereng yang kemudian untuk menentukan variasi faktor keamanan lereng dengan kondisi intensitas hujan yang berbeda-beda.

2. METODOLOGI

2.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Secara geografis Gambar 1, Bendungan Gunungrowo terletak pada koordinat $6^{\circ} 39' 21''$ Lintang Selatan dan $110^{\circ} 57' 55''$ Bujur Timur di Desa Siti Luhur, Kec. Gembong, Kab. Pati, Jawa Tengah.



Gambar 1. Peta Lokasi Waduk
Sumber: Dinas PSDA Provinsi Jawa Tengah, 2017

Jadwal pelaksanaan penelitian dimulai dari bulan Agustus 2020 sampai dengan bulan Agustus 2021.

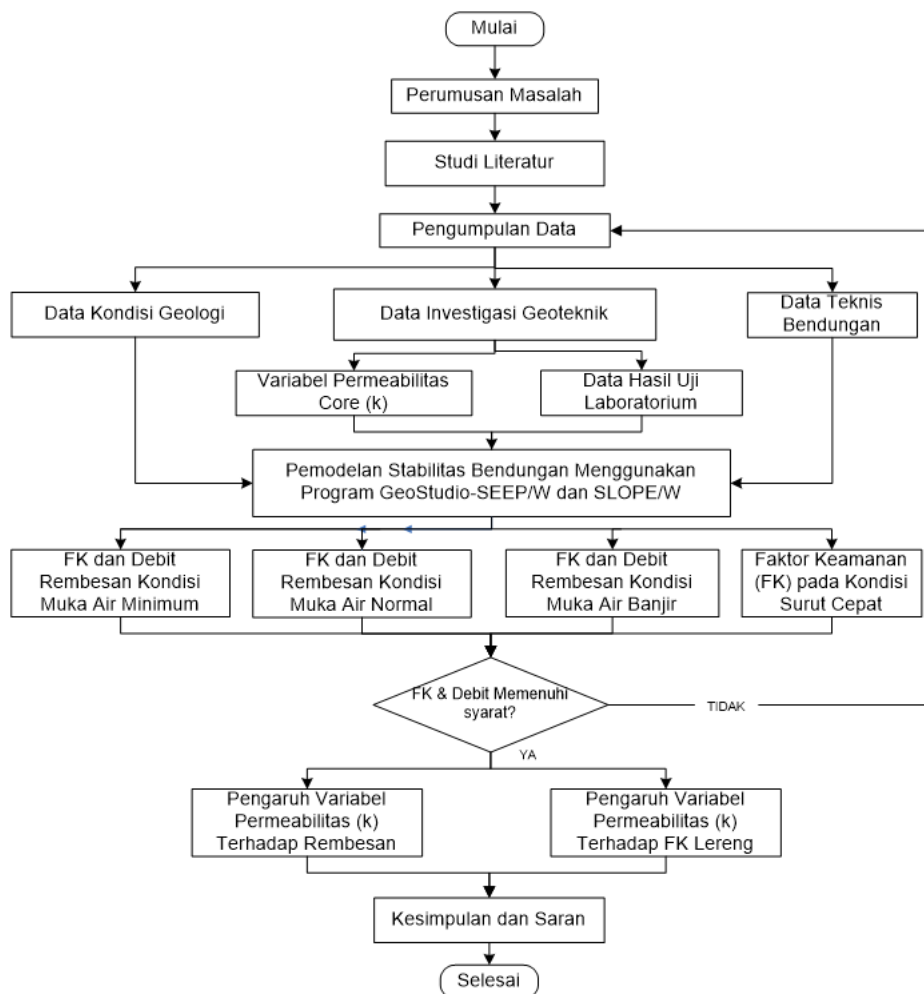
2.2. Bagan alir penelitian

Alur penelitian yang dilaksanakan disajikan pada *flowchart* Gambar 2.

2.3. Metodologi penelitian

Pemodelan yang dilakukan pada penelitian ini adalah melakukan analisis stabilitas keamanan bendungan menggunakan *software* GeoStudio-2012 dengan fitur SEEP/W (GEO-SLOPE International Ltd, 2012a) untuk debit rembesan dan SLOPE/W (GEO-SLOPE International Ltd, 2012b) untuk FK (Faktor Keamanan) lerengnya. Pemodelan pada SEEP/W menggunakan konsep *saturated soil mechanics*. Parameter yang diinput untuk analisis rembesan adalah data dimensi bendungan, jenis material dan nilai permeabilitas lapangan. Pemodelan pada

SLOPE/W menggunakan metode Morgenstern. Parameter yang diinput untuk analisis stabilitas lereng adalah dimensi bendungan, jenis material, berat isi (γ), kohesi (c), dan sudut geser (ϕ). Dari hasil studi, semua nilai debit rembesan dan semua nilai FK pada ketinggian air minimum, ketinggian air normal, ketinggian air banjir dan kondisi *rapid drawdown* dengan perhitungan tanpa beban gempa, diperoleh nilai FK dan nilai debit rembesan memenuhi syarat aman atau stabil terhadap bahaya longsor dan bahaya *piping*. Selanjutnya dari nilai debit rembesan dan nilai FK dikaji bagaimana pengaruh variabel permeabilitas *core* bendungan terhadap bahaya *piping* dan potensi bahaya longsor. Dari hasil kajian tersebut ditarik suatu kesimpulan.



Gambar 2. Flowchart Penelitian

3. HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil analisis rembesan menggunakan SEEP/W

Tabel 1 adalah *input software* Geo-Studio2012 berupa parameter geoteknik atau parameter desain Bendungan Gunungrowo.

Tabel 1. Data Parameter Geoteknik Bendungan Gunungrowo

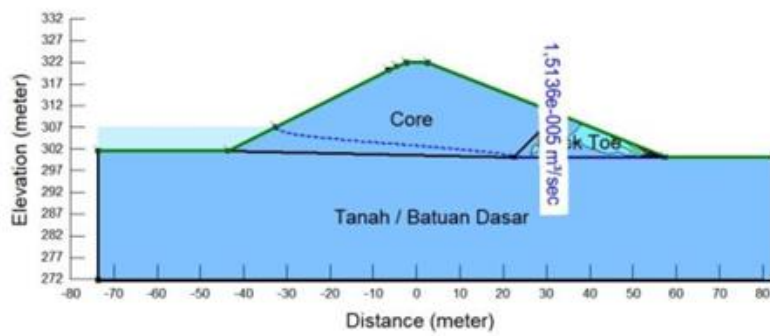
| Material | Berat Isi Jenuh γ_{sat} | | Kohesi (efektif) c' | Sudut Geser Dalam (efektif) ϕ' | Koefisien Permeabilitas (k) |
|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------|---|--------------------------------|
| | t/m ³ | kN/m ³ | kPa | Derajat (°) | m/det |
| Timbunan Inti (<i>Core</i>) | 1,683 | 16,5 | 23,5 | 21 | 1,0 x 10E-6 |
| Tanah/ Batuan Dasar | 1,938 | 19,0 | 24,5 | 30 | 1,0 x 10E-5 |
| <i>Rock Toe</i> | 2,091 | 20,5 | 0 | 40 | 1,0 x 10E-2 |

Analisis rembesan ini dikaji dari 4 (empat) keadaan muka air waduk yaitu: pada saat ketinggian air minimum (Min), ketinggian air normal (MAN), ketinggian air banjir (MAB) dan keadaan *rapid drawdown* (RD). Hasil analisis dari 4 (empat) keadaan ketinggian air waduk yang menggunakan nilai permeabilitas (k) desain sebesar 1E-6 m/det terdapat pada Gambar 3.

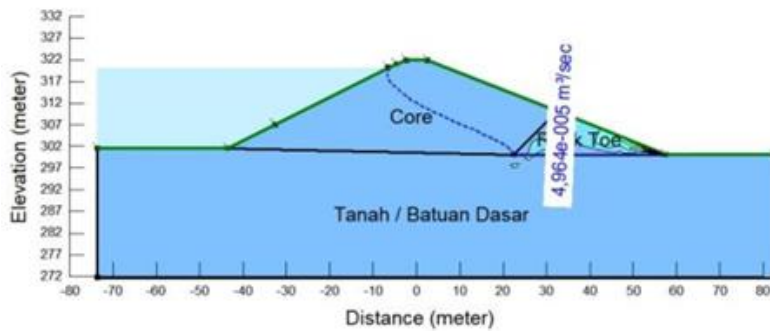
Berdasarkan model yang telah dilakukan, terdapat pola garis preatik yang berbeda pada ketinggian air minimum, ketinggian air normal, ketinggian air banjir dan *rapid drawdown*. Dari analisis rembesan pada keadaan *rapid drawdown* tidak memiliki nilai debit keluaran (*output*).

Berdasarkan syarat/ ambang batas dari debit total rembesan yang diizinkan yaitu 1% dari debit *inflow* (PUPR, dalam Lontoh et al., 2020). Debit total rembesan (Q_{total}) harus lebih kecil dari debit ($Q_{inflow} \times 1\%$). Jika debit yang masuk bendungan adalah 4,93 m³/det, maka perhitungan syarat/ambang batas debit yang diizinkan adalah $1\% \times 4,93 \text{ m}^3/\text{det} = 0,0493 \text{ m}^3/\text{det}$. Untuk menghitung nilai debit total yang keluar di hilir bendungan maka debit model x panjang bendungan 185 m (debit model GeoStudio x panjang tubuh Bendungan Gunungrowo).

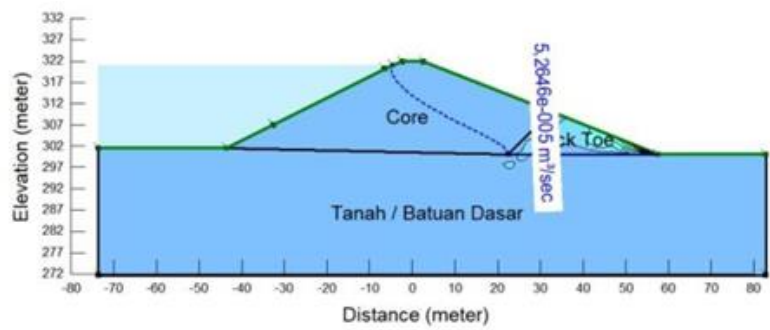
Hasil analisis debit rembesan untuk kondisi ketinggian muka air minimum, normal, dan banjir terdapat pada Tabel 2 yang menunjukkan bahwa seluruh nilai Debit Total lebih kecil dari nilai Debit Syarat (0,0493 m/det), sehingga semua debit rembesan memenuhi persyaratan (YA) untuk dinyatakan aman terhadap bahaya rembesan atau bahaya *piping*.



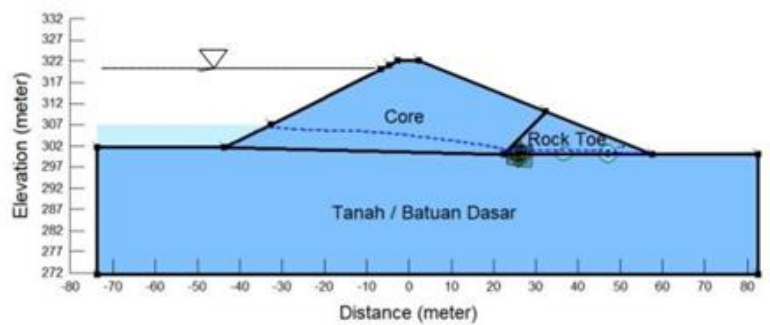
a. Kondisi tinggi air minimum (Min)



b. Kondisi tinggi air normal (MAN)



c. Kondisi tinggi air banjir (MAB)



d. Kondisi rapid drawdown (RD)

Gambar 3. Model Hasil Analisis Rembesan $k=1E-6$ m/det, 4 Keadaan Muka Air Waduk

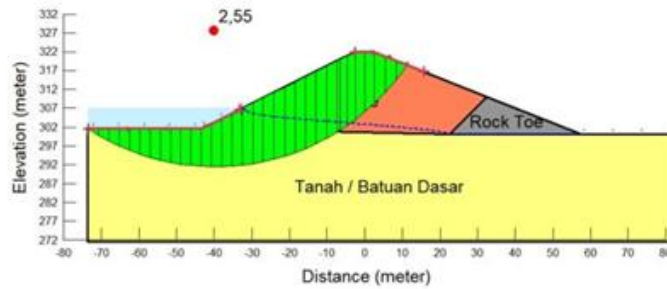
Tabel 2. Hasil Analisis Rembesan Pada Kondisi Muka Air Waduk

| Panjang Bendungan: 185 m | | | | | |
|---|------------------------------|-----------------------------|--|--|------------------------|
| Syarat Debit: 0,0493 m³/det | | | | | |
| No | Permeabilitas (m/det) | Kondisi Muka Air (m) | Debit Model (m³/det) | Debit Total (m³/det) | Memenuhi Syarat |
| 1 | 1,00E-06 | Minimum (El +307) | 0,000015136 | 0,00280016 | YA |
| | | Normal (El +320) | 0,00004964 | 0,0091834 | YA |
| | | Banjir (El +321) | 0,000052646 | 0,00973951 | YA |
| 2 | 1,47E-07 | Minimum (El +307) | 0,000013553 | 0,002507305 | YA |
| | | Normal (El +320) | 0,000039766 | 0,00735671 | YA |
| | | Banjir (El +321) | 0,000041839 | 0,007740215 | YA |
| 3 | 1,69E-07 | Minimum (El +307) | 0,000013596 | 0,00251526 | YA |
| | | Normal (El +320) | 0,000040039 | 0,007407215 | YA |
| | | Banjir (El +321) | 0,000042137 | 0,007795345 | YA |
| 4 | 2,93E-07 | Minimum (El +307) | 0,000013832 | 0,00255892 | YA |
| | | Normal (El +320) | 0,000041553 | 0,007687305 | YA |
| | | Banjir (El +321) | 0,000043796 | 0,00810226 | YA |
| 5 | 3,48E-07 | Minimum (El +307) | 0,000013936 | 0,00257816 | YA |
| | | Normal (El +320) | 0,000042214 | 0,00780959 | YA |
| | | Banjir (El +321) | 0,000044519 | 0,008236015 | YA |
| 6 | 3,98E-07 | Minimum (El +307) | 0,00001403 | 0,00259555 | YA |
| | | Normal (El +320) | 0,000042809 | 0,007919665 | YA |
| | | Banjir (El +321) | 0,000045171 | 0,008356635 | YA |
| 7 | 4,04E-06 | Minimum (El +307) | 0,00002031 | 0,00375735 | YA |
| | | Normal (El +320) | 0,000079871 | 0,014776135 | YA |
| | | Banjir (El +321) | 0,00008567 | 0,01584895 | YA |
| 8 | 4,37E-06 | Minimum (El +307) | 0,000020849 | 0,003857065 | YA |
| | | Normal (El +320) | 0,00008296 | 0,0153476 | YA |
| | | Banjir (El +321) | 0,000089041 | 0,016472585 | YA |
| 9 | 4,88E-07 | Minimum (El +307) | 0,000014199 | 0,002626815 | YA |
| | | Normal (El +320) | 0,000043867 | 0,008115395 | YA |
| | | Banjir (El +321) | 0,00004633 | 0,00857105 | YA |
| 10 | 4,98E-06 | Minimum (El +307) | 0,000021838 | 0,00404003 | YA |
| | | Normal (El +320) | 0,000088619 | 0,016394515 | YA |
| | | Banjir (El +321) | 0,000095216 | 0,01761496 | YA |
| 11 | 5,27E-07 | Minimum (El +307) | 0,000014271 | 0,002640135 | YA |
| | | Normal (El +320) | 0,000044322 | 0,00819957 | YA |
| | | Banjir (El +321) | 0,000046827 | 0,008662995 | YA |
| 12 | 9,94E-06 | Minimum (El +307) | 0,000029657 | 0,005486545 | YA |
| | | Normal (El +320) | 0,00013325 | 0,02465125 | YA |
| | | Banjir (El +321) | 0,00014389 | 0,02661965 | YA |

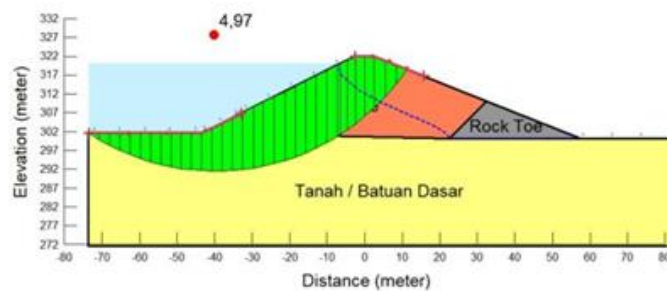
3.2 Hasil analisis stabilitas lereng menggunakan SLOPE/W

Pada studi ini, digunakan *Software* GeoStudio-2012 dengan fitur SLOPE/W untuk menganalisis stabilitas lereng. Beberapa parameter *input* yaitu: dimensi dan jenis material bendungan, data laboratorium seperti berat isi (γ), kohesi (c) dan sudut geser (ϕ).

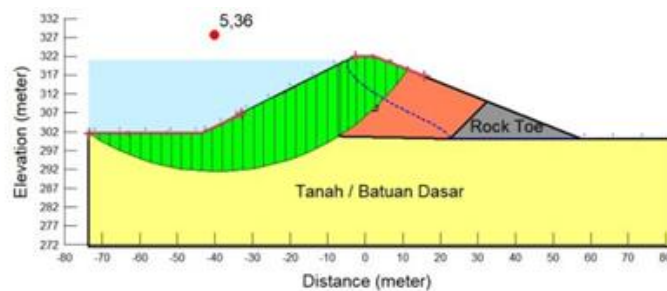
Gambar 4 adalah hasil pemodelan stabilitas lereng di bagian hulu bendungan Gunungrowo dengan 4 (empat) kondisi ketinggian air.



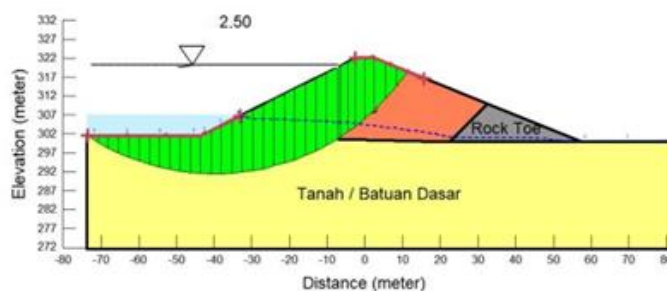
a. Kondisi tinggi air minimum



b. Kondisi tinggi air normal



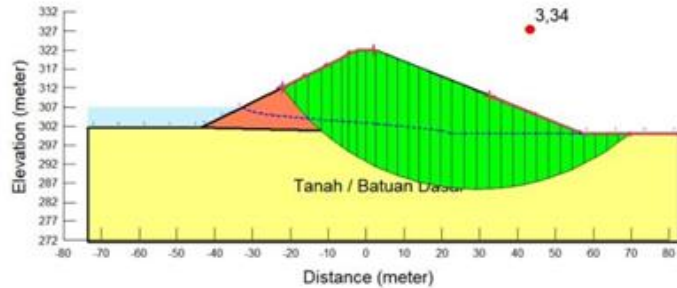
c. Kondisi tinggi air banjir



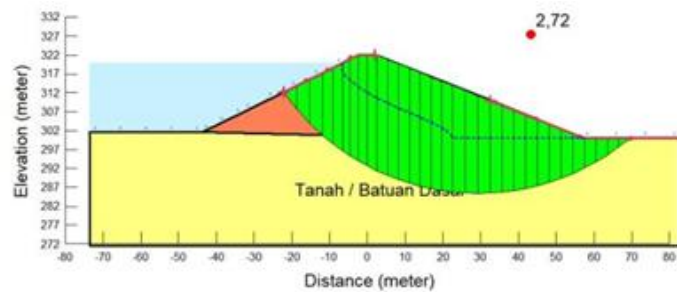
d. Kondisi *rapid drawdown*

Gambar 4. Hasil Analisis Kestabilan Lereng Hulu, 4 Keadaan Muka Air Waduk

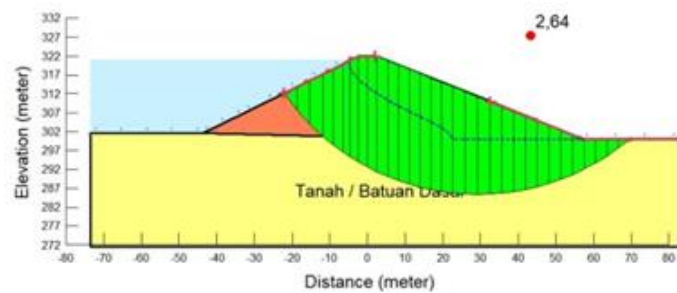
Gambar 5 adalah tubuh bendungan yang merupakan model stabilitas lereng hilir Bendungan Gunungrowo untuk 4 (empat) kondisi pada ketinggian air minimum, ketinggian air normal, ketinggian air banjir dan *rapid drawdown*.



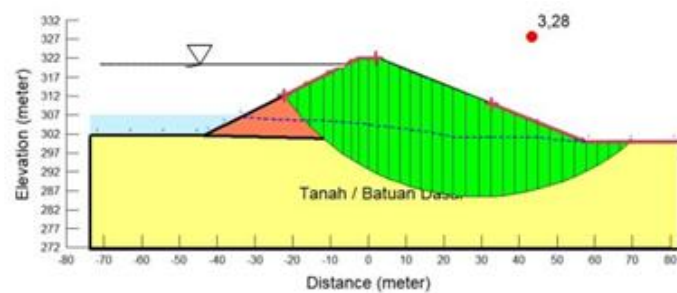
a. Kondisi tinggi air minimum



b. Kondisi tinggi air normal



c. Kondisi tinggi air banjir



d. Kondisi *rapid drawdown*

Gambar 5. Hasil Analisis Kestabilan Lereng Hilir, 4 Keadaan Muka Air Waduk

Dari hasil pemodelan dirangkum FK hasil perhitungan dan analisis stabilitas lereng hulu dan lereng hilir untuk kondisi ketinggian air minimum, maksimum, banjir dan *rapid drawdown*, seperti terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Analisis Kestabilan Lereng Hulu dan Lereng Hilir Bendungan Tanpa Beban Gempa

| Kondisi Muka Air (m) | FK syarat | Angka Keamanan (FK) | | Memenuhi Syarat | |
|----------------------------|-----------|---------------------|-------|-----------------|-------|
| | | Hulu | Hilir | Hulu | Hilir |
| Tanpa Gempa, Min (+307.00) | 1,50 | 2,55 | 3,44 | YA | YA |
| Tanpa Gempa, MAN (+320.00) | 1,50 | 4,97 | 2,72 | YA | YA |
| Tanpa Gempa, MAB (+321.00) | 1,50 | 5,36 | 2,64 | YA | YA |
| Tanpa Gempa, Surut Cepat | 1,30 | 2,50 | 3,28 | YA | YA |

Berdasarkan Tabel 3, semua nilai FK model lebih besar dari nilai FK syarat. Menurut Badan Standardisasi Nasional, 2016 nilai FK syarat tanpa beban gempa adalah 1,50, sedangkan dengan kondisi surut cepat adalah 1,30. Dapat disimpulkan berdasarkan hasil analisis tingkat keamanan stabilitas lereng Bendungan Gunungrowo tanpa beban gempa memenuhi batas syarat (YA).

3.3 Pengaruh variabel permeabilitas *core* terhadap debit rembesan

Tabel 4 menyajikan hasil analisis rembesan dan grafik dari hubungan pengaruh variabel permeabilitas *core* terhadap rembesan.

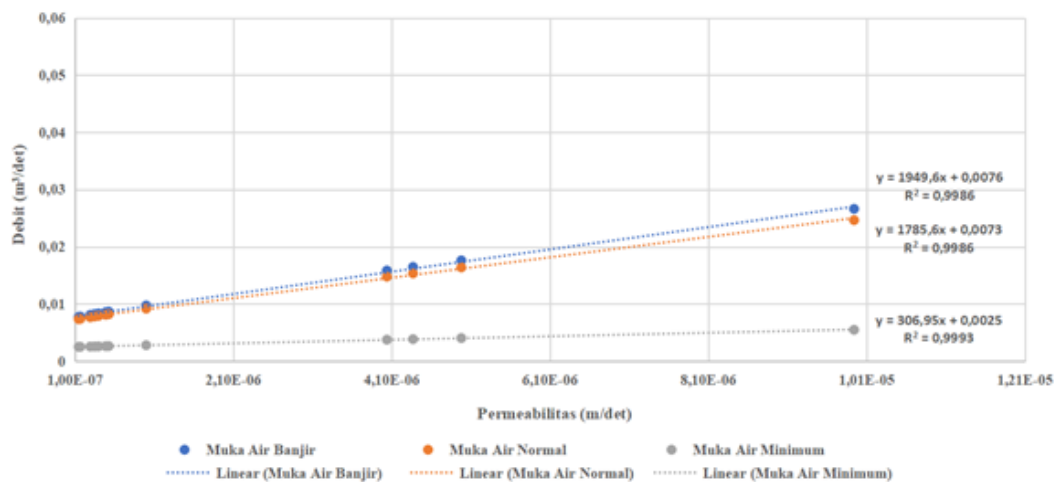
Tabel 4. Permeabilitas *Core* terhadap Debit Rembesan

| No | Permeabilitas (m/det) | Kondisi (m) | Syarat Debit (m ³ /det) | Debit Total (m ³ /det) | Memenuhi Syarat |
|----|-----------------------|----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| 1 | 1,00E-06 | Muka Air Minimum (El +307) | 0,0493 | 0,00280016 | YA |
| 2 | 1,47E-07 | | | 0,002507305 | YA |
| 3 | 1,69E-07 | | | 0,00251526 | YA |
| 4 | 2,93E-07 | | | 0,00255892 | YA |
| 5 | 3,48E-07 | | | 0,00257816 | YA |
| 6 | 3,98E-07 | | | 0,00259555 | YA |
| 7 | 4,04E-06 | | | 0,00375735 | YA |
| 8 | 4,37E-06 | | | 0,003857065 | YA |
| 9 | 4,88E-07 | | | 0,002626815 | YA |
| 10 | 4,98E-06 | | | 0,00404003 | YA |
| 11 | 5,27E-07 | | | 0,002640135 | YA |
| 12 | 9,94E-06 | | | 0,005486545 | YA |

Tabel 4. Permeabilitas *Core* terhadap Debit Rembesan (Lanjutan)

| No | Permeabilitas (m/det) | Kondisi (m) | Syarat Debit (m ³ /det) | Debit Total (m ³ /det) | Memenuhi Syarat |
|----|-----------------------|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| 13 | 1,00E-06 | Muka Air Normal (El +320) | 0,0493 | 0,0091834 | YA |
| 14 | 1,47E-07 | | | 0,00735671 | YA |
| 15 | 1,69E-07 | | | 0,007407215 | YA |
| 16 | 2,93E-07 | | | 0,007687305 | YA |
| 17 | 3,48E-07 | | | 0,00780959 | YA |
| 18 | 3,98E-07 | | | 0,007919665 | YA |
| 19 | 4,04E-06 | | | 0,014776135 | YA |
| 20 | 4,37E-06 | | | 0,0153476 | YA |
| 21 | 4,88E-07 | | | 0,008115395 | YA |
| 22 | 4,98E-06 | | | 0,016394515 | YA |
| 23 | 5,27E-07 | 0,00819957 | YA | | |
| 24 | 9,94E-06 | 0,02465125 | YA | | |
| 25 | 1,00E-06 | Muka Air Banjir (El +321) | 0,0493 | 0,00973951 | YA |
| 26 | 1,47E-07 | | | 0,007740215 | YA |
| 27 | 1,69E-07 | | | 0,007795345 | YA |
| 28 | 2,93E-07 | | | 0,00810226 | YA |
| 29 | 3,48E-07 | | | 0,008236015 | YA |
| 30 | 3,98E-07 | | | 0,008356635 | YA |
| 31 | 4,04E-06 | | | 0,01584895 | YA |
| 32 | 4,37E-06 | | | 0,016472585 | YA |
| 33 | 4,88E-07 | | | 0,00857105 | YA |
| 34 | 4,98E-06 | | | 0,01761496 | YA |
| 35 | 5,27E-07 | | | 0,008662995 | YA |
| 36 | 9,94E-06 | | | 0,02661965 | YA |

Berdasarkan Tabel 4 dibuat grafik pengaruh variabel permeabilitas *core* terhadap debit rembesan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Pengaruh Permeabilitas *Core* terhadap Debit Rembesan

Berdasarkan Gambar 6 dapat dilihat hubungan semakin besar nilai variabel permeabilitas *core* maka akan semakin besar pula debit rembesan yang terjadi atau dapat dikatakan jika *core* bendungan *porous*, potensi kebocoran atau bahaya *piping* akan semakin besar.

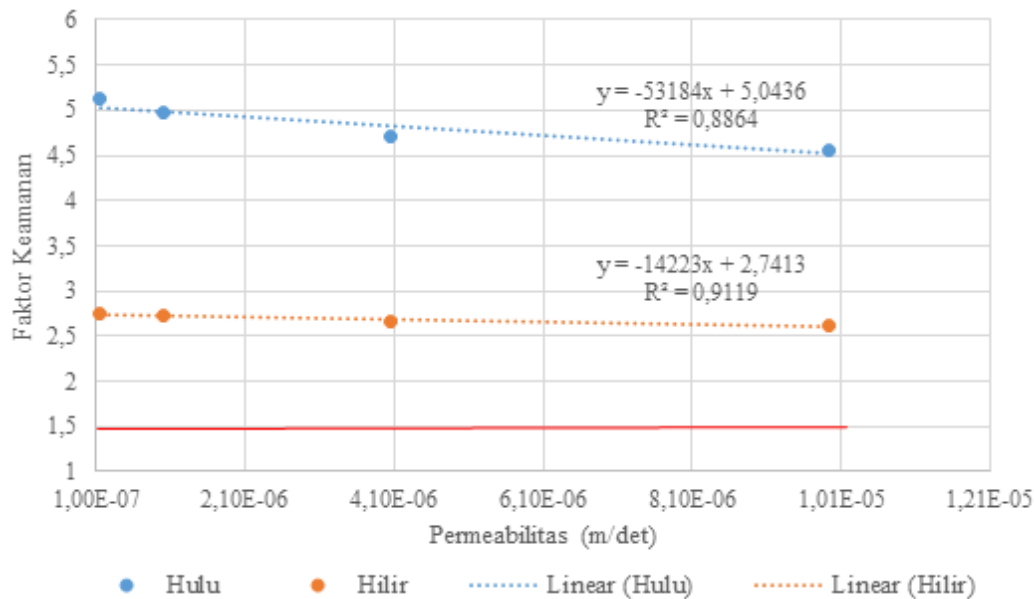
3.4 Pengaruh variabel permeabilitas *core* terhadap faktor keamanan

Tabel 5 adalah hasil analisis stabilitas lereng yang memperlihatkan pengaruh dari variabel permeabilitas *core* terhadap Faktor Keamanan (FK) pada bagian hulu dan hilir bendungan.

Tabel 5. Permeabilitas terhadap FK Hulu dan Hilir Kondisi Muka Air Normal

| No | Permeabilitas (m/det) | Kondisi Tanpa Gempa | FK syarat | Angka Keamanan (FK) | | Memenuhi Syarat | |
|----|-----------------------|---------------------|-----------|---------------------|-------|-----------------|-------|
| | | | | Hulu | Hilir | Hulu | Hilir |
| 1 | 1,00E-06 | Muka Air Normal | 1,5 | 4,97 | 2,72 | YA | YA |
| 2 | 1,47E-07 | (El + 320) | | 5,12 | 2,76 | YA | YA |
| 3 | 9,94E-06 | | | 4,56 | 2,61 | YA | YA |
| 4 | 4,04E-06 | | | 4,72 | 2,66 | YA | YA |

Berdasarkan Tabel 5, dapat dibuat grafik hubungan pengaruh variabel permeabilitas *core* dengan Faktor Keamanan (FK) pada hulu dan hilir bendungan seperti Gambar 7.



Gambar 7. Pengaruh Permeabilitas *Core* terhadap FK Hulu dan Hilir, Muka Air Normal

Dari Gambar 7 dapat dilihat hubungan semakin besar nilai variabel permeabilitas *core* akan semakin kecil nilai faktor keamanan atau dapat dikatakan jika *core* bendungan semakin *porous*, potensi terjadinya longsor pada lereng hulu maupun hilir bendungan akan semakin besar.

4. KESIMPULAN

Dari hasil analisis rembesan (*seepage*) disimpulkan bahwa debit rembesan pada Bendungan Gunungrowo aman terhadap bahaya rembesan atau bahaya *piping* dari berbagai skenario ketinggian muka air waduk.

Dari hasil analisis stabilitas lereng (FK) disimpulkan bahwa stabilitas lereng Bendungan Gunungrowo aman terhadap bahaya longsor dari berbagai skenario ketinggian muka air waduk.

Dari hasil analisis dan grafik debit dengan permeabilitas disimpulkan bahwa semakin besar nilai permeabilitas semakin besar pula debit rembesan yang terjadi.

Berdasarkan analisis dan grafik FK dengan permeabilitas disimpulkan bahwa semakin besar nilai permeabilitas akan semakin kecil nilai faktor keamanannya.

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Panitia Seminar Nasional KIIJK 2021 yang telah merekomendasikan dan memilih makalah ini. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada *Reviewer* dan Editor yang telah membantu penyempurnaan artikel ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Al-Mansori, N. J. H., Al-Fatlawi, T. J. M., Othman, N. Y., & Al-Zubaidi, L. S. A. (2020). Numerical analysis of seepage in earth-fill dams. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 6(7), 1336–1348. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091552>
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). *Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan*.
- BBWS Pemali-Juana. (2018). *Laporan Akhir Pemeriksaan Besar Bendungan Gunungrowo, Kabupaten Pati, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat*.
- Dinas PSDA Provinsi Jawa Tengah. (2017). *Peta Lokasi Waduk di Propinsi Jawa Tengah*.
- Feryadi, A., & Gofar, N. (2022). Effect of Changing in Free Water Level on the Stability of River Embankment. *Jurnal Teknik Sipil*, 18(1), 33–50. <https://doi.org/10.28932/jts.v18i1.3933>
- GEO-SLOPE International Ltd. (2012a). Seepage Modeling with SEEP / W 2015. *Geostudio Helpfile Seepage Modeling with SEEP / W*, July, 199. <http://www.geo-slope.com>
- GEO-SLOPE International Ltd. (2012b). Stability modeling with Slope/W. *Stability Modeling with Slope/W*, June, 213. <http://www.eng.uwo.ca/people/tnewson/Lectures/SLOPEW Engineering Book.pdf>
- Kristo, C., Rahardjo, H., & Satyanaga, A. (2019). Effect of hysteresis on the stability of residual soil slope. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 226–238. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.003>
- Lontoh, R. J., Manoppo, F. J., & Sompie, O. B. A. (2020). Analisa Kestabilan Bendungan Lolak 1. *Jurnal Sipil Statik*, 8(2), 221–236.
- Nugraha, A. S., & Sutanto, A. K. (2019). PENGARUH SUDUT KEMIRINGAN LERENG TERHADAP ANGKA STABILITAS LERENG TANAH KOHESIF BERDASARKAN KURVA TAYLOR DAN SOFTWARE GEO5. *Jurnal Teknik Sipil*, 15(2), 87–99. <https://doi.org/10.28932/jts.v15i2.1958>
- Putra, T. G. S., Aribudiman, I. N., & Juliawan, G. R. (2019). Analisis Stabilitas Lereng Pada

- Bendungan Titab. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 20(1), 1689–1699.
- Rahardjo, H., Nio, A. S., Harnas, F. R., & Leong, E. C. (2014). Comprehensive Instrumentation for Real Time Monitoring of Flux Boundary Conditions in Slope. *Procedia Earth and Planetary Science*, 9, 23–43. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2014.06.015>
- Rahardjo, H., Satyanaga, A., & Leong, E. C. (2016). Effects of Rainfall Characteristics on the Stability of Tropical Residual Soil Slope. *E3S Web of Conferences*, 9, 15004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160915004>
- Satyanaga, A., Wijaya, M., Zhai, Q., Moon, S.-W., Pu, J., & Kim, J. R. (2021). Stability and Consolidation of Sediment Tailings Incorporating Unsaturated Soil Mechanics. *Fluids*, 6(12), 423. <https://doi.org/10.3390/fluids6120423>