

ANALISIS GEOLOGI TEKNIK REMBESAN DAN KESTABILAN LERENG DI BENDUNGAN LOGUNG, KABUPATEN KUDUS, PROVINSI JAWA TENGAH

Zakki Hilal Chalqi^{1*} dan Misbahudin¹

¹ Geological Engineering, FTEP, Universitas Pertamina

*EMAIL

zakkihilal@gmail.com

KEYWORDS

bendungan, geologi teknik, kestabilan lereng, rembesan.

ARTICLE HISTORY

Received: 27 December 2023

Accepted: 31 August 2024

HOW TO CITE

Chalqi, Z. H. & Misbahudin. (2024). Analisis Geologi Teknik Rembesan dan Kestabilan Lereng di Bendungan Logung, Kabupaten Kudus, Provinsi Jawa Tengah. *Subsurface*, 02(02) 17-32.

© 2024 SUBSURFACE. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

ABSTRAK

Bendungan Logung merupakan bendungan urugan tanah di Kabupaten Kudus sebagai pengendali banjir saat musim penghujan serta penyedia air baku hingga air irigasi untuk menghadapi kekeringan. Dalam operasionalnya, bendungan akan memiliki kondisi muka air fluktuatif pada reservoir di hulu. Kondisinya dapat berupa kondisi air banjir hingga tanpa air sekalipun. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis rembesan baik dari pola aliran hingga debitnya serta mengetahui nilai kestabilan lereng berdasarkan pengaruh muka air di reservoir. Metode dalam penelitian ini berupa teori Cassagrande dan metode Darcy untuk karakteristik rembesan serta metode Morgenstern-Price untuk nilai kestabilan lereng. Dari hasil analisis didapatkan bahwa garis freatik dalam aliran rembesan lebih menunjam pada kondisi muka air yang lebih tinggi. Rembesan pada hilir bendungan juga akan memiliki debit yang lebih tinggi ketika muka air reservoir lebih tinggi. Sementara itu untuk analisis kestabilan lereng untuk semua kondisi dinyatakan hampir aman. Akan tetapi terdapat satu kondisi dengan nilai yang tidak aman pada kondisi surut cepat ketika air di reservoir tiba-tiba menyusut habis.

PENDAHULUAN

Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 72/PRT/1997 tentang Keamanan Bendungan, bendungan adalah bangunan penahan air buatan yang terbuat dari tanah, batu, beton, atau bahan lainnya yang dapat menampung air. Bendungan Logung adalah bendungan urugan tanah random dengan inti vertikal yang terletak di Kabupaten Kudus, Jawa Tengah. Bendungan ini dibangun untuk mengendalikan banjir, menyediakan air baku, irigasi, dan pembangkit listrik tenaga mikro hidro.

Bendungan Logung memiliki dampak positif yang signifikan bagi masyarakat sekitar tetapi bendungan juga memiliki risiko kegagalan konstruksi tinggi yang dapat merugikan masyarakat. Untuk mengurangi risiko kegagalan konstruksi, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait rembesan dan kestabilan lereng bendungan. Tujuan dilakukannya penelitian ini untuk mengetahui pola aliran dari rembesan,

mengetahui debit rembesan di hilir bendungan, serta menganalisis faktor keamanan kestabilan lereng dengan kondisi muka air di hulu yang berbeda-beda. Penelitian ini dapat menjadi acuan mitigasi bencana demi keselamatan masyarakat dan proyek yang berkelanjutan dari Bendungan Logung.

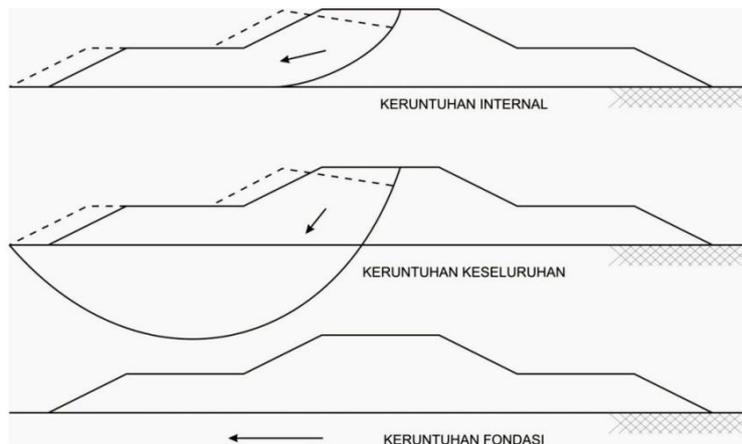
TINJAUAN PUSTAKA

Risiko Bahaya Operasional Bendungan

Pembangunan bendungan merupakan rekayasa keteknikan dengan kompleksitas yang tinggi. Maka dari itu dalam pembangunan bendungan perlu dilakukan banyak analisis untuk memastikan stabilitas bendungan dengan mempertimbangkan berbagai kondisi dan kombinasi beban.

Banyak faktor yang dapat menyebabkan keruntuhan, faktor tersebut dapat berasal dari internal maupun eksternal. Faktor internal meliputi kualitas konstruksi, kekuatan material, dan kondisi geologis. Faktor eksternal meliputi kondisi hidrologis, aktivitas tektonik, dan bencana alam. Mengutip dari Balai Teknik Bendungan (2016) pola-pola keruntuhan yang mungkin terjadi yaitu (**Gambar 1**):

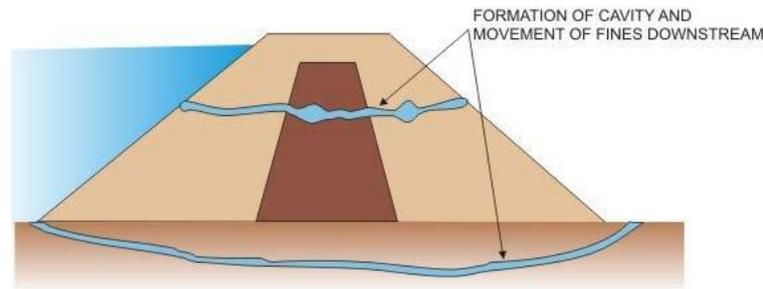
- a. Keruntuhan internal.
- b. Keruntuhan fondasi.
- c. Keruntuhan keseluruhan.



Gambar 1. Pola keruntuhan lereng bendungan (Balai Teknik Bendungan, 2016).

Bendungan sebagai penyimpan air memiliki fungsi yang erat kaitannya dengan aliran air. Oleh karena itu, perlu dipastikan bahwa bendungan aman dari kegagalan akibat rembesan air. Aliran air dapat menyebabkan erosi pada bendungan. Pembagian erosi pada bendungan dapat dibagi menjadi dua, yaitu (Abdeldaim, 2012) (**Gambar 2**):

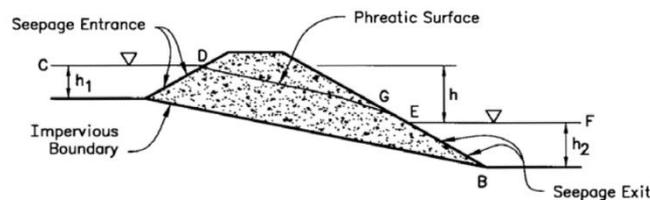
- a. Erosi buluh, atau *piping*, terjadi ketika debit air yang melewati bendungan terlalu besar. Hal ini dapat menyebabkan terbentuknya celah atau lubang pada fondasi bendungan, yang kemudian berkembang menjadi saluran air. Saluran air ini dapat menyebabkan bendungan runtuh.
- b. Erosi internal terjadi ketika air mengalir melalui pori-pori material bendungan. Air yang mengalir ini dapat mengikis material halus pada tubuh bendungan, yang dapat menyebabkan bendungan melemah.



Gambar 2. Proses erosi melalui internal tubuh bendungan dan erosi buluh pada fondasi bendungan (Abdeldaim, 2012).

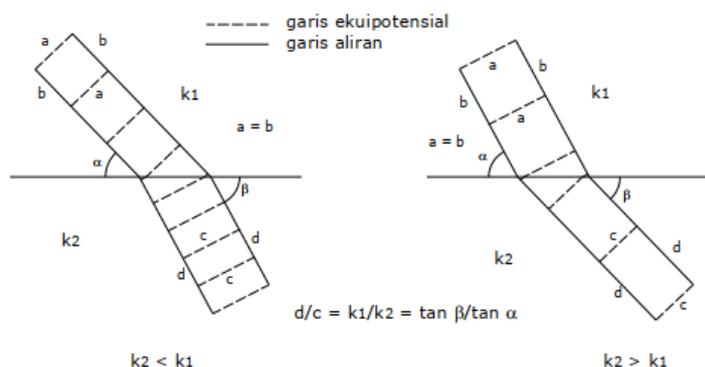
Garis Freatik Teori Cassagrande

Garis freatik merupakan garis batas kejenuhan yang memisahkan daerah yang mengalami rembesan air (di bawah garis freatik) dengan daerah yang tidak mengalami rembesan (di atas garis freatik). Material dengan kondisi yang jenuh dinyatakan berada pada bawah garis freatik (Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2017) (**Gambar 3**).



Gambar 3. Penggambaran garis freatik ditunjukkan garis DG (Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2017).

Cassagrande menggambarkan garis freatik sebagai parabola (Cassagrande (1940) dalam Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2017). Arah aliran rembesan yang diwakili oleh garis freatik akan mengalami pembelokan apabila melewati material dengan beda koefisien permeabilitas (Williams, 1986).



Gambar 4. Defleksi garis aliran pada batas tanah yang mempunyai sifat permeabilitas berbeda (Williams, 1986).

Debit Rembesan Hukum Darcy

Hukum Darcy adalah hukum yang menyatakan bahwa kecepatan aliran air melalui media berpori berbanding lurus dengan gradien hidraulik. Rumus yang menjelaskan Hukum Darcy dinyatakan dalam persamaan:

$$Q = V \cdot A \quad (1)$$

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2)$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (3)$$

$$Q = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A \quad (4)$$

Dengan:

Q = debit rembesan (m³/s)

V = kecepatan rembesan dalam lapisan tanah (cm/s)

K = koefisien permeabilitas (cm/s)

I = gradien hidraulik

A = luas penampang dari lapisan tanah yang dialiri oleh rembesan air (m²)

Δh = perbedaan *head* hidraulik (m)

L = panjang lapisan tanah yang dialiri oleh rembesan air (m)

Konsep Head Hidraulik

Dalam aliran air, simbol 'h' merupakan *hydraulic head*. Air akan mengalir dari titik dengan *head* lebih tinggi ke titik dengan *head* lebih rendah. Pada hukum Bernoulli, *head* hidraulik adalah penjumlahan dari *head* ketinggian, *head* tekanan, dan *head* kecepatan (De Vallejo & Ferrer, 2011). Rumus yang menjelaskan *head* hidraulik adalah sebagai berikut:

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

Dengan:

h = *head* hidraulik

z = *head* ketinggian, tinggi garis yang ditinjau atau tinggi muka air.

$\frac{u}{\gamma_w}$ = *head* tekanan, u adalah tekanan air pori dan γ_w adalah berat isi air.

$\frac{v^2}{2g}$ = *head* kecepatan, v adalah kecepatan aliran dan g adalah percepatan gravitasi.

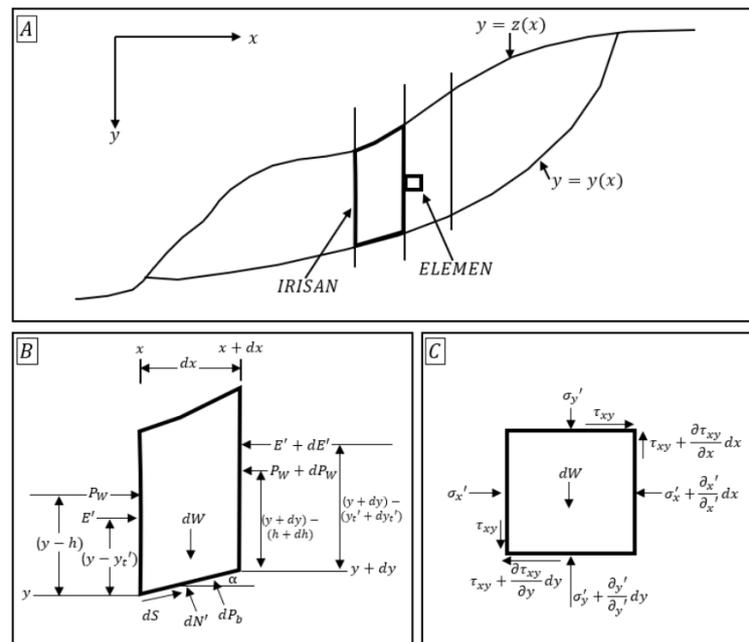
Kestabilan Lereng Metode Morgenstern-Price

Metode Morgenstern-Price menggambarkan analisis kestabilan lereng yang memperhitungkan kesetimbangan gaya dan momen. Metode ini merupakan pengembangan dari metode Bishop dan metode Janbu, yang hanya memperhitungkan kesetimbangan gaya. Metode Morgenstern-Price memiliki kelebihan lain, yaitu dapat digunakan untuk semua jenis material dan bidang gelincir (Morgenstern dan Price, 1965) (**Gambar 5**). Rumus dan ilustrasi yang menggambarkan metode ini adalah sebagai berikut:

$$FK = \frac{c' dx \sec \alpha + dN' \tan \phi'}{dE' \cos \alpha + dP_w \cos \alpha - dX \sin \alpha + dW \sin \alpha} \quad (6)$$

Dengan:

- FK = Nilai faktor keamanan
 c' = Kohesi (Pa)
 dx = Panjang sumbu x (m)
 dN' = Gaya normal (N)
 ϕ' = Sudut geser dalam ($^\circ$)
 α = Sudut antara titik tengah bidang irisan dengan bidang datar ($^\circ$)
 dE' = Tegangan efektif tepi irisan (Pa)
 dP_w = Resultan tekanan air tepi irisan (Pa)
 dW = Gaya berat akibat beban tanah (N)
 dX = Gaya gesek vertikal tepi irisan (Pa)



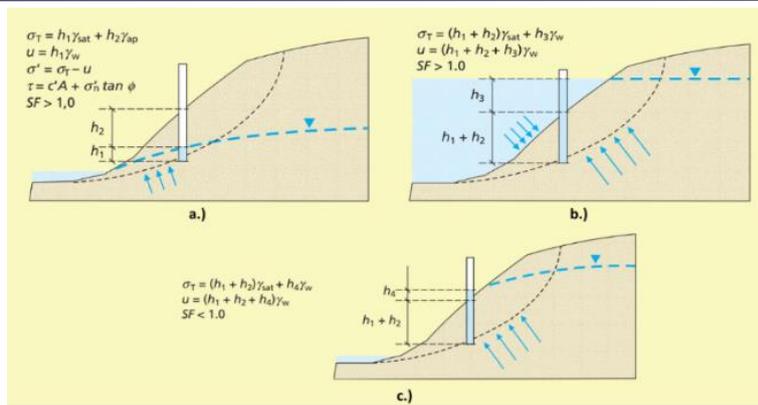
Gambar 5. a.) Dua buah irisan dan sebuah elemen di antaranya, b.) Gaya pada irisan bidang longsor, c.) Tegangan efektif yang bekerja pada elemen (Morgenstern dan Price (1965) dalam Putra dkk., 2020).

Situasi Operasional Bendungan

Dalam operasional bendungan, akan ada fase ketika reservoir dalam tahap pengisian dan pengurasan air. Ada masa ketika air di hulu reservoir perlu disurutkan dengan cepat, misal dalam kondisi banjir. Situasi ini perlu diperhatikan karena dapat mengganggu kestabilan lereng. **Gambar 6** menggambarkan beberapa kondisi dalam operasional bendungan pada umumnya.

Kondisi operasional bendungan meliputi tiga hal pada umumnya, yaitu:

- Kondisi awal ketika reservoir belum terisi dengan stabil.
- Kondisi ketika air mulai mengisi reservoir secara perlahan. Air pori akan meningkat bersamaan dengan adanya gaya stabilisasi pada lereng akibat air, menghasilkan kondisi stabil.
- Kondisi penyurutan, saat air reservoir tiba-tiba mengalami penurunan ketinggian secara cepat. Kondisi lereng tidak stabil akibat beban hidrostatis hilang tetapi tekanan air pori pada tubuh bendungan masih tinggi.



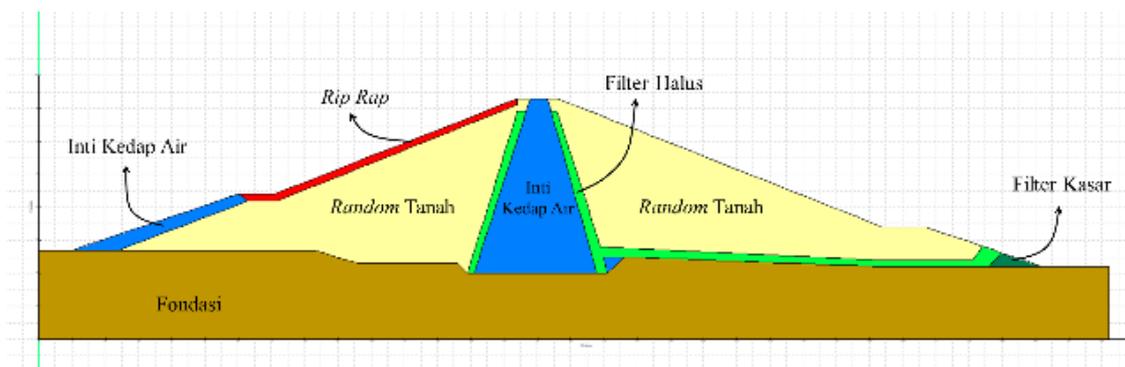
Gambar 6. Kondisi air pori yang tersimpan dalam tanah pada kondisi penyurutan (De Vallejo dan Ferrer, 2011).

DATA DAN METODOLOGI

Data yang digunakan pada penelitian ini hanya berupa data sekunder tanpa adanya mengumpulkan data primer ke lapangan. Data sekunder didapatkan dari Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Pemali-Juana. Rincian data yang digunakan yaitu hasil laboratorium mengenai properti fisik dan mekanik material penyusun bendungan, data ketinggian muka air reservoir, desain geometri bendungan, serta kondisi geologi teknik proyek bendungan.

Geometri Bendungan

Bendungan Logung adalah bendungan yang terbuat dari material urugan yang dibagi menjadi beberapa zona, dengan inti kedap air di bagian tengah berdiri secara vertikal. Bendungan ini memiliki panjang 292 meter dan puncaknya berada pada ketinggian 93 meter. Pada bagian atas untuk hulu dan hilir memiliki lereng dengan kemiringan 1 : 2,5, sedangkan bagian kaki-kaki hulu dan hilir adalah 1 : 3. Kemiringan lereng inti kedap air adalah 1 : 0,3. Untuk pembagian zona material dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Sketsa melintang tubuh Bendungan Logung (Dimodifikasi dari Balai Besar Wilayah Sungai Pemali-Juana, 2015).

Analisis Rembesan

Dalam analisis rembesan untuk mengetahui pola aliran rembesan melalui garis freatiknya serta debit rembesan dilakukan menggunakan aplikasi Geostudio. Dalam aplikasi Geostudio digunakan program SEEP/W untuk menganalisis rembesan.

Data yang perlu digunakan untuk menjalankan program adalah ketinggian muka air reservoir serta koefisien permeabilitas (k) untuk tiap-tiap material penyusun bendungan. **Tabel 1** merupakan data ketinggian muka air reservoir sedangkan **Tabel 2** merupakan koefisien permeabilitas material bendungan (Balai Besar Wilayah Sungai Pemali-Juana, 2015).

Tabel 1. Ketinggian muka air Bendungan Logung (Balai Besar Wilayah Sungai Pemali-Juana, 2015).

Kondisi Reservoir	Ketinggian Muka Air (m)
Muka Air Normal	+ 88,50
Muka Air Banjir	+ 91,93
Muka Air Pertengahan	+ 75,48
Muka Air Rendah	+ 62,46

Tabel 2. Nilai koefisien permeabilitas material Bendungan Logung (Balai Besar Wilayah Sungai Pemali-Juana, 2015).

No	Material	Koefisien Permeabilitas (m/s)
1	Inti Kedap Air	$9,52 \times 10^{-7}$
2	Filter Halus	$2,851 \times 10^{-5}$
3	Filter Kasar	$5,542 \times 10^{-5}$
4	Random Tanah	$1,1 \times 10^{-7}$
5	Rip rap	1×10^{-2} (Budhu, 2011)
6	Fondasi	$2,10 \times 10^{-4}$

Untuk memastikan keamanan bendungan tipe urugan, debit rembesan yang melewati tubuh bendungan harus dijaga agar tidak melebihi 1% dari debit banjir rata-rata (Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2017). Dalam kasus pembangunan Bendungan Logung, debit banjir rata-ratanya adalah 7928,2 liter per detik. Maka, debit rembesan aman yang diperbolehkan adalah sebesar 79,282 liter per detik (Balai Besar Wilayah Sungai Pemali-Juana, 2015).

Analisis Kestabilan Lereng

Nilai faktor keamanan diproses dengan program SLOPE/W dari Geostudio. Data yang dibutuhkan untuk menjalankan program berupa properti fisik dan mekanik yaitu berat isi, kohesi, dan sudut geser dalam. **Tabel 3** menyajikan properti fisik dan mekanik dari material penyusun bendungan.

Tabel 3. Properti fisik dan mekanik material Bendungan Logung (Balai Besar Wilayah Sungai Pemali-Juana, 2015).

No	Material	γ_{dry} (kN/m ³)	C (kPa)	Φ (°)
1	Inti Kedap Air	12,297	442,28	17,3
2	Filter Halus	14,837	0	30

No	Material	γ_{dry} (kN/m ³)	C (kPa)	Φ (°)
3	Filter Kasar	16,024	0	35
4	Random Tanah	13,857	41,19	37
5	Rip rap	19,221	0	40
6	Fondasi	22,339	20,3	40,25

Standar Nasional Indonesia (SNI) tahun 2016 mengatur kriteria nilai faktor keamanan lereng bendungan yang dianggap aman. Kriteria tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4**. Lereng bendungan yang memiliki nilai faktor keamanan lebih dari nilai tersebut dianggap aman.

Tabel 4. Nilai batas aman FK dengan persyaratan tanpa beban gempa bendungan tipe urugan (SNI 8064-2016).

Kondisi	FK Aman Tanpa Gempa
Kondisi Tanpa Air	1.3
Kondisi Muka Air Normal	1.3
Kondisi Muka Air Pertengahan	1.3
Kondisi Muka Air Rendah	1.3
Kondisi Muka Air Banjir	1.5
Kondisi Surut Cepat	1.3
Kondisi Surut Lambat	1.3

HASIL DAN DISKUSI

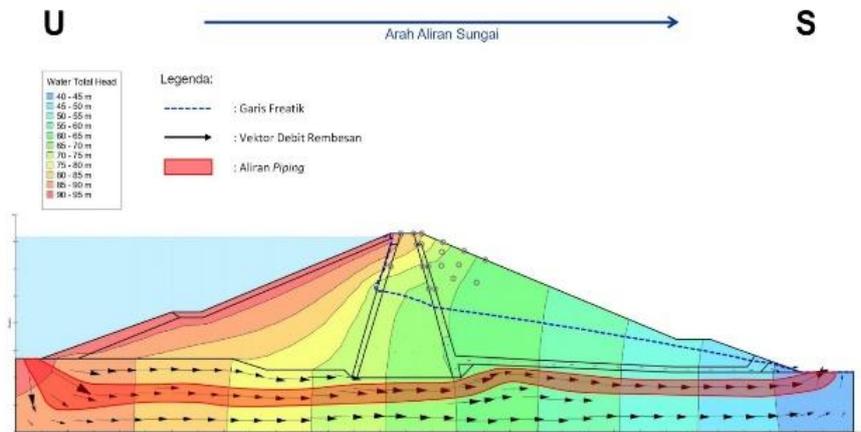
Pola Aliran Rembesan

Untuk membandingkan pola aliran rembesan maka dipilih dua kondisi muka air reservoir yang berbeda sebagai pembanding. Kondisi tersebut yakni muka air banjir (Gambar 8) dengan ketinggian air di hulu reservoir pada titik tertinggi (+91,93 m) serta muka air rendah (Gambar 9) dengan ketinggian air terendah (+62,46 m) pada hulu reservoirnya.

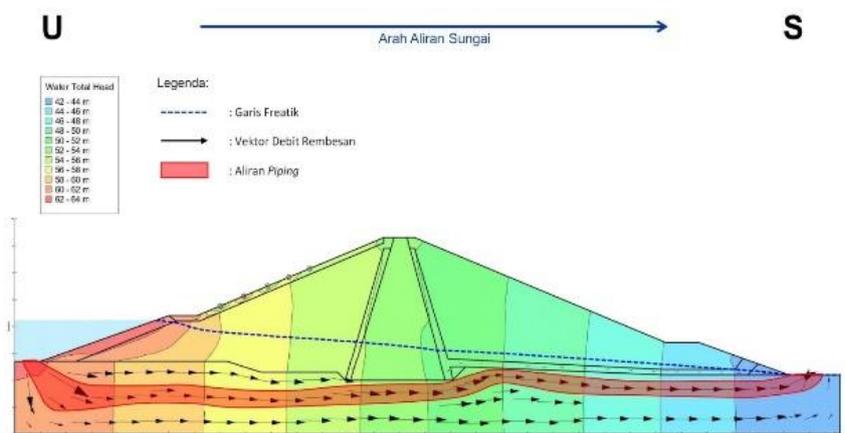
Reservoir yang lebih tinggi terisi akan menyebabkan perbedaan ketinggian antara permukaan air di reservoir dan permukaan air tanah menjadi lebih besar. Perbedaan ketinggian ini disebut dengan perbedaan *head* hidraulik. Perbedaan *head* hidraulik yang lebih besar akan menyebabkan aliran air menjadi lebih deras ke hilir. Maka dari itu, garis freatik akan menunjam secara lebih dibandingkan kondisi lainnya.

Kondisi muka air banjir terlihat pembelokan garis freatik lebih intens daripada kondisi muka air rendah. Hal ini terjadi karena pada situasi muka air banjir aliran air rembesan banyak menyinggung material dengan koefisien permeabilitas yang berbeda-beda. Sedangkan pada kondisi muka air rendah aliran rembesan memiliki cukup ruang untuk melewati material dengan koefisien permeabilitas yang sama. Seperti contoh aliran rembesan saat kondisi banjir melewati material tanah random di hulu lebih banyak daripada di kondisi muka air banjir.

Pada **Gambar 8** dan **Gambar 9** panah hitam menunjukkan vektor debit rembesan. Arah panah menunjukkan arah aliran rembesan sedangkan ukuran panah yang lebih besar menggambarkan debit rembesan yang lebih besar. Hal yang perlu diperhatikan adalah panah lebih dominan mengalir pada bagian fondasi daripada bagian filter. Penyebab hal ini adalah perbedaan nilai koefisien permeabilitas. Pada bagian fondasi diketahui nilai koefisien lebih besar ($2,10 \times 10^{-4}$ m/s) daripada bagian filter halus dan kasar ($5,542 - 2,851 \times 10^{-5}$ m/s), sehingga pada material fondasi lebih mampu mengalirkan air.



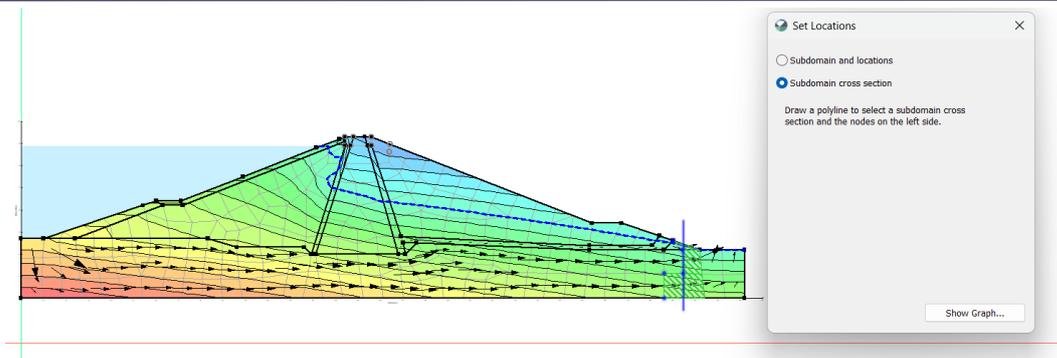
Gambar 8. Pola aliran rembesan kondisi muka air banjir dari Bendungan Logung.



Gambar 9. Pola aliran rembesan kondisi muka air rendah dari Bendungan Logung.

Debit Rembesan

Tempat perhitungan debit rembesan menggunakan program SEEP/W dipilih pada ujung kaki drainase pada hilir bendungan. Pemilihan ini dimaksudkan pada pertemuan rembesan yang melalui tubuh maupun fondasi bendungan. Pemilihan garis melintang lokasi perhitungan debit rembesan ditunjukkan pada **Gambar 10**.



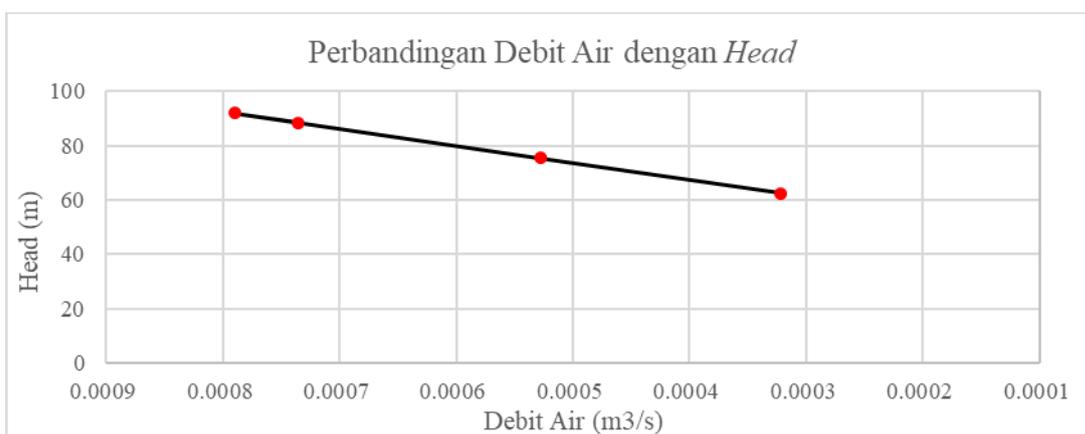
Gambar 10. Garis biru merupakan lokasi dihitungnya debit rembesan.

Hasil analisis pada **Tabel 5** didapatkan nilai rata-rata debit rembesan dari semua kondisi sebesar 0,594 l/s. Nilai rata-rata debit tersebut masih lebih rendah dari batas aman yaitu <79,282 l/s, sehingga debit rembesan masih pada kategori aman.

Tren yang dapat diamati dari nilai debit rembesan bahwa nilai muka air yang lebih tinggi menghasilkan debit rembesan yang lebih besar. Hal ini selaras dengan Hukum Darcy, dinyatakan bahwa nilai debit rembesan (Q) berbanding lurus dengan perbedaan head hidraulik (Δh). Dapat ditarik kesimpulan bahwa kondisi air di reservoir yang semakin banjir akan berdampak pada debit rembesan di hilir yang lebih besar. Tren tersebut dapat diamati pada **Gambar 11**.

Tabel 5. Tabulasi nilai debit rembesan pada semua kondisi muka air reservoir.

Kondisi	Muka Air (m)	Debit Air (m ³ /s)	Batas Aman (l/s)	Rata-rata (l/s)
Muka Air Normal	+ 88,50	7,35 x 10 ⁻³	79,282	0,594
Muka Air Banjir	+ 91,93	7,90 x 10 ⁻³		
Muka Air Pertengahan	+ 75,48	5,28 x 10 ⁻³		
Muka Air Rendah	+ 62,46	3,22 x 10 ⁻³		

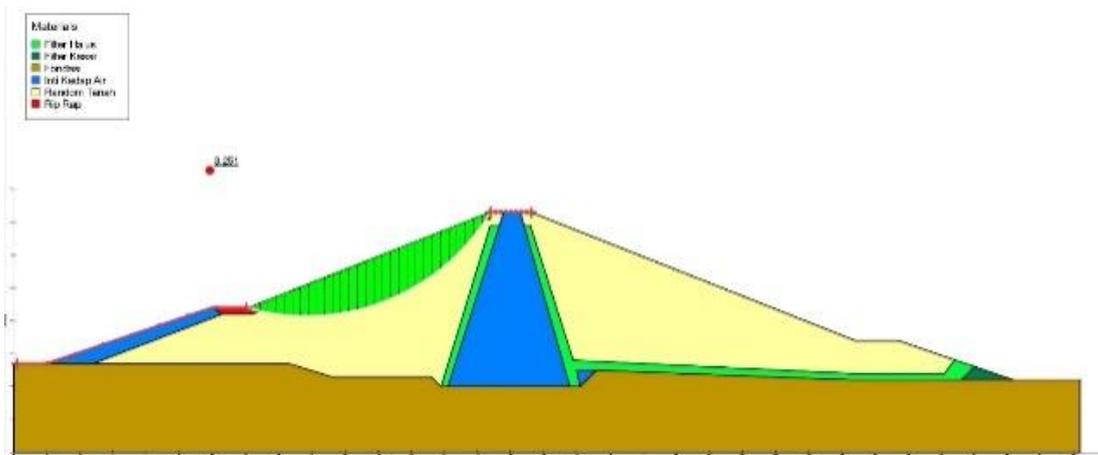


Gambar 11. Grafik perbandingan antara debit air dengan head ketinggian air reservoir.

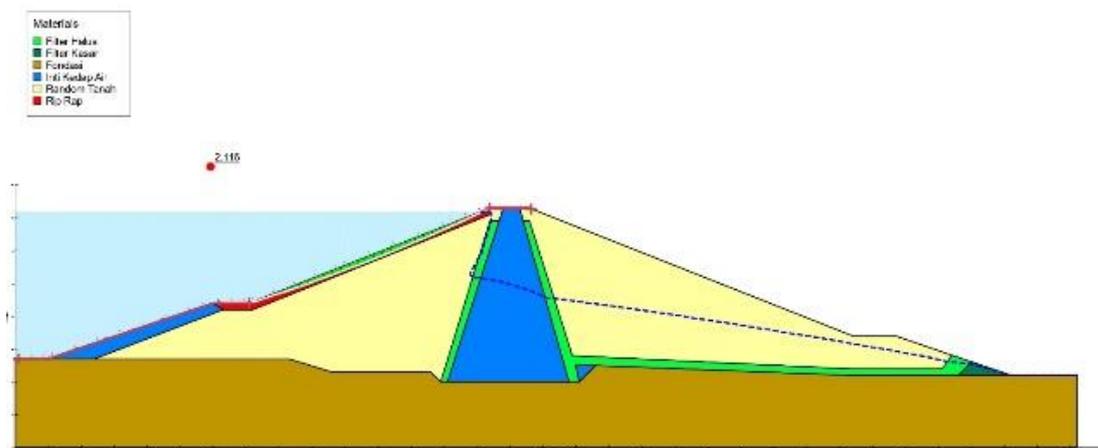
Faktor Keamanan Kestabilan Lereng

Analisis kestabilan lereng menggunakan program SLOPE/W dilakukan pada hulu dan hilir lereng bangunan. Kondisi yang dimodelkan adalah semua kondisi dari mulai tanpa air hingga muka air banjir.

Dalam **Gambar 12** dan **Gambar 13** disajikan beberapa contoh pemodelan dari penentuan kestabilan lereng berdasar nilai faktor keamanan untuk bagian hulu dari bendungan.



Gambar 12. Kondisi kestabilan lereng hulu bendungan kondisi tanpa air.



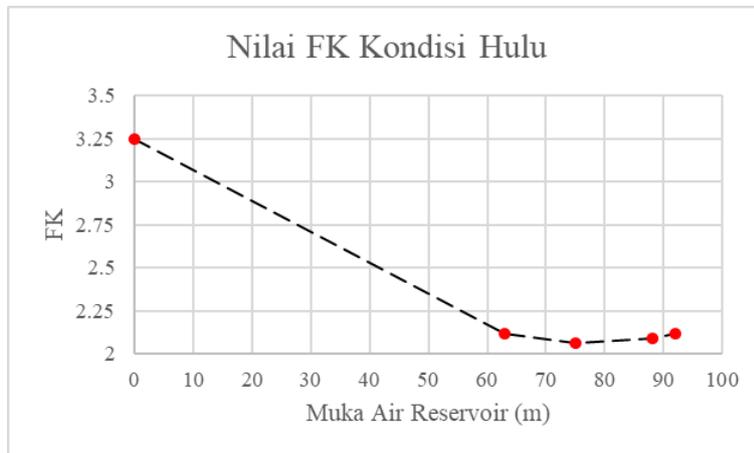
Gambar 13. Kondisi kestabilan lereng hulu bendungan kondisi muka air banjir.

Tabulasi data untuk semua kondisi disajikan pada **Tabel 1**. Dari semua kondisi dinyatakan dalam kategori aman karena nilai faktor keamanannya di atas ketentuan SNI. Nilai aman untuk semua kondisi memiliki nilai $> 1,3$, serta saat kondisi muka air tertinggi pada kondisi air banjir nilainya juga masih $> 1,5$ di atas batas aman. Untuk melihat tren nilai faktor keamanan maka dibuat grafik, pada **Gambar 14** merupakan bagian hulu dan **Gambar 15** merupakan bagian hilir. Lereng bagian hulu dipengaruhi oleh air yang memenuhi reservoir, implikasinya adalah muncul gaya penstabil. Hal tersebut menyebabkan nilai faktor keamanan bertambah untuk muka air yang lebih tinggi. Sedangkan lereng pada hilir menunjukkan tren sebaliknya. Muka air yang lebih tinggi akan menyebabkan nilai faktor keamanan berkurang. Penyebabnya adalah tekanan air pori yang tersimpan dalam tubuh bendungan akan semakin tinggi dengan kondisi reservoir yang makin terisi air. Sedangkan pada hilir tidak ada air mengisi sebagai gaya penstabil, akibatnya nilai faktor keamanan akan tereduksi akibat beban tekanan air pori.

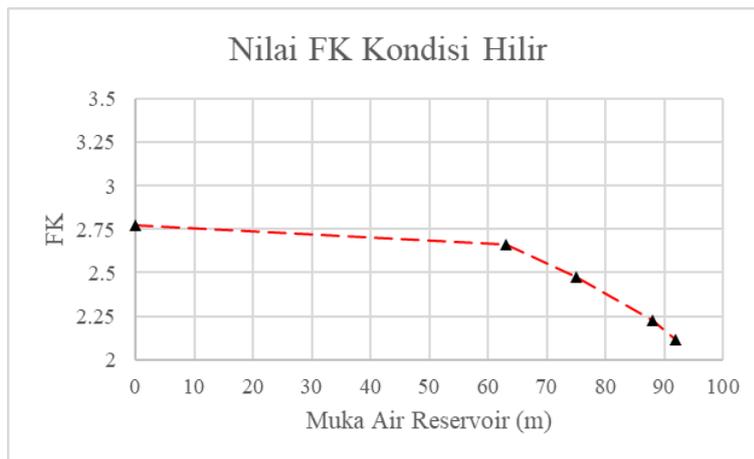
Tabel 6. Tabulasi nilai faktor keamanan kestabilan lereng Bendungan Logung.

Kondisi	Muka Air Reservoir (m)	FK	
		Hulu	Hilir
Tanpa Air	-	3,251	2,775

Kondisi	Muka Air Reservoir (m)	FK	
		Hulu	Hilir
Muka Air Rendah	+ 62,46	2,117	2,661
Muka Air Pertengahan	+ 75,48	2,064	2,475
Muka Air Normal	+ 88,50	2,09	2,223
Muka Air Banjir	+ 91,93	2,116	2,144



Gambar 14. Grafik nilai faktor keamanan pada lereng hulu bendungan.



Gambar 15. Grafik antara nilai faktor keamanan di lereng hilir bendungan.

Kondisi Penyurutan

Penyurutan muka air di hulu bendungan dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu surut lambat dan surut cepat. Surut lambat terjadi secara bertahap dan dapat disebabkan oleh faktor-faktor berikut:

- a. Operasional bendungan, seperti pembukaan pintu pelimpah untuk mengurangi volume air di hulu pada saat banjir.
- b. Faktor alam, seperti perubahan iklim yang menyebabkan musim kemarau berkepanjangan sehingga surutnya air reservoir.

Surut cepat terjadi secara tiba-tiba dan dapat disebabkan pada saat terjadi kebocoran pada tubuh bendungan. Kondisi surut cepat di lapangan sangat jarang terjadi, tetapi tidak dapat dipungkiri sebagai potensi risiko yang harus diantisipasi.

Hasil tabulasi nilai faktor keamanan pada kondisi surut lambat disajikan pada **Tabel 7** serta surut lambat pada **Tabel 8**.

Tabel 7. Nilai faktor keamanan hulu kondisi surut lambat.

Waktu (hari)	Waktu (jam)	Muka Air Reservoir (m)	FK Hulu
0	0	+88	2,09
0,25	6	+85	2,074
0,7	17	+79	2,058
1,4	34	+69	1,601
2,75	66	+52	1,714
5	120	+47	2,013

Tabel 8. Nilai faktor keamanan hulu kondisi surut cepat.

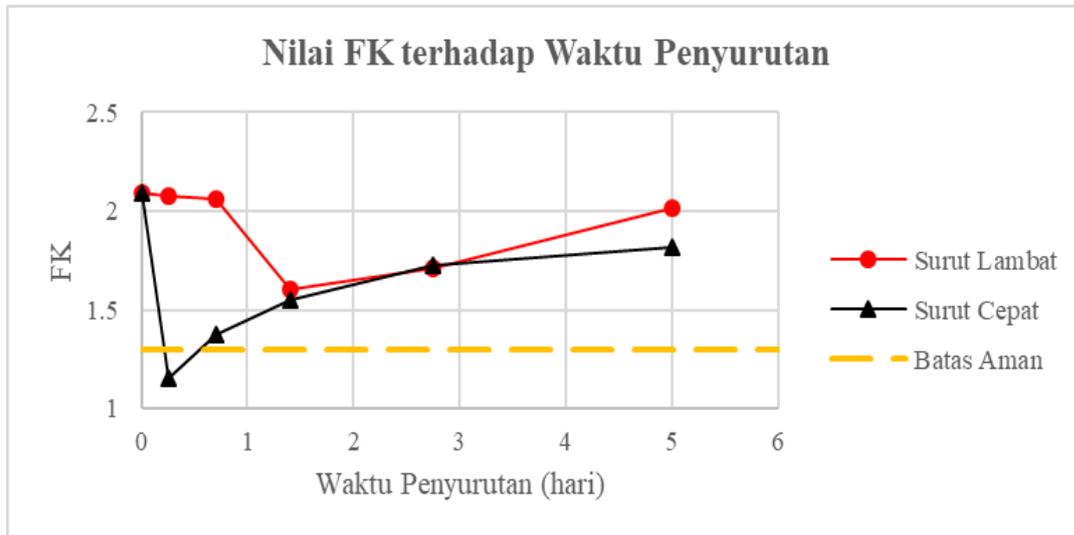
Waktu (hari)	Waktu (jam)	Muka Air Reservoir (m)	FK Hulu
0	0	+88	2,09
0,25	6	+47	1,152
0,7	17	+47	1,376
1,4	34	+47	1,549
2,75	66	+47	1,727
5	120	+47	1,818

Dalam kondisi penyurutan nilai aman sesuai dengan SNI 8064-2016 yaitu nilai faktor keamanan $>1,3$. Untuk kondisi surut lambat semua durasi penyurutan terjadi pada nilai faktor keamanan di atas nilai batas aman. Sedangkan pada kondisi surut cepat terdapat nilai tidak aman yaitu pada langkah kedua setelah 6 jam (0,25 hari). Pada durasi ini air menyurut dari muka air normal menuju habis tanpa air dalam sekali fase. Nilai faktor keamanan berada pada angka.

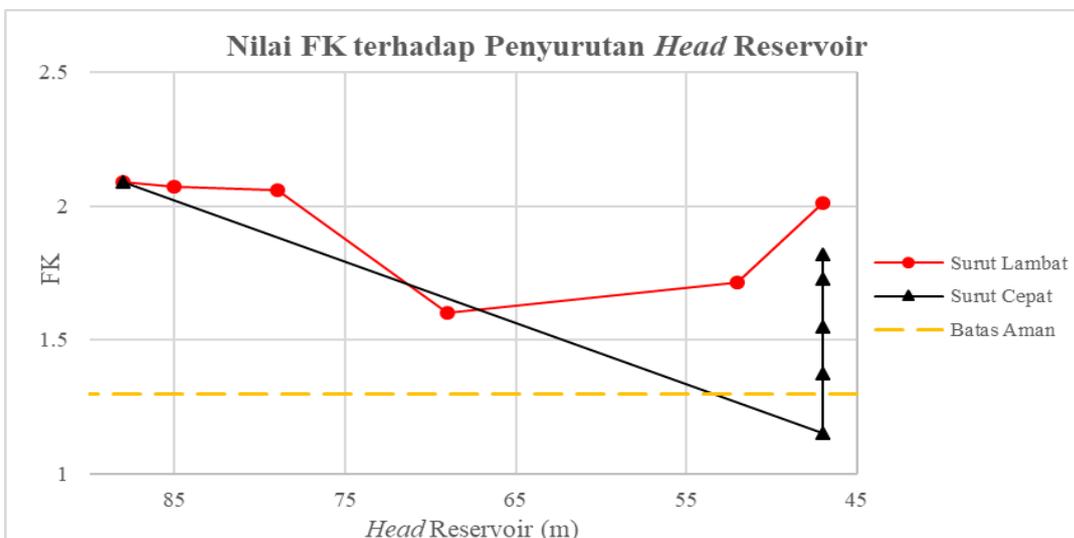
Gambar 16 menyajikan grafik perbandingan nilai faktor keamanan dengan waktu penyurutan. Dalam kedua jenis penyurutan, baik lambat maupun cepat, hampir semua nilai faktor keamanan bendungan tetap berada $> 1,3$ yang menunjukkan kondisi aman. Namun, terdapat pengecualian pada proses surut cepat. Tercatat nilai kritis faktor keamanan terendah sebesar 1,152 pada durasi pengujian setelah 6 jam (0,25 hari). Situasi ini terjadi langsung setelah air surut dari muka air normal hingga tak bersisa.

Dalam **Gambar 17** disajikan grafik antara nilai faktor keamanan dengan ketinggian muka air pada reservoir di hulu. Faktor keamanan bendungan turun drastis saat surut cepat. Hal ini disebabkan oleh turunnya muka air reservoir sebesar 41 meter dari +88 meter hingga +47 meter dalam waktu 6 jam.

Pada kondisi surut cepat, nilai faktor keamanan bendungan turun drastis. Hal ini disebabkan oleh hilangnya gaya stabilisasi dari air reservoir dengan tiba-tiba. Tekanan air pori di lereng tetap tinggi, sehingga lereng menjadi tidak stabil. Setelah 6 jam, tekanan air pori di dalam tanah mulai stabil, sehingga nilai faktor keamanan mulai naik. Pada kondisi surut lambat, nilai faktor keamanan bendungan juga turun seiring penurunan muka air reservoir. Namun, penurunannya tidak sedrastis pada kondisi surut cepat. Hal ini disebabkan oleh hilangnya gaya stabilisasi yang terjadi secara bertahap.



Gambar 16. Grafik perbandingan nilai faktor keamanan terhadap waktu penyurutan.



Gambar 17. Grafik perbandingan nilai faktor keamanan terhadap ketinggian muka air reservoir.

KESIMPULAN

Pada kondisi muka air reservoir yang lebih tinggi didapatkan pola aliran dengan garis freatik yang lebih menonjol. Pada kondisi muka air lebih tinggi juga terjadi pembelokan garis freatik yang lebih intens dibandingkan muka air yang lebih rendah.

Debit rembesan akan lebih tinggi ketika muka air di reservoir semakin tinggi. Perbandingan pada kondisi air tertingginya saat muka air banjir (+91,93 m) nilai debit rembesan sebesar $7,90 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

sedangkan kondisi air terendah pada muka air rendah (+62,46 m) nilai debit rembesan sebesar $3,22 \times 10^{-3}$ m³/s. Dalam semua kondisi nilai debit rembesan masih berada pada nilai yang aman.

Secara keseluruhan, nilai kestabilan lereng berada di atas batas aman untuk semua kondisi ketinggian muka air reservoir. Namun, ada satu kondisi yang perlu diperhatikan, yaitu pada kondisi surut cepat. Pada kondisi ini, nilai faktor keamanan lereng turun menjadi 1,152, yang berada di bawah batas aman. Nilai ini berada pada durasi penyurutan setelah 6 jam (0,25 hari) sesaat setelah air dalam kondisi muka air normal menjadi tanpa air.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih untuk Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Pemali-Juana untuk perizinan penggunaan data keteknikan Bendungan Logung sehingga jurnal ini dapat terselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdeldaim, L. S. K. (2012). Prediction of Peak Breach Outflow, and Breach Parameters for Embankment Dams Using Fuzzy Logic and Artificial Neural Network Techniques. (Disertasi Doktoral, Irrigation and Hydraulics Engineering, Faculty of Engineering, Cairo University Giza).
- Badan Standarisasi Nasional. (2016). SNI 8064-2016. Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan. Badan Standarisasi Nasional: Jakarta.
- Balai Besar Wilayah Sungai Pemali-Juana. (2015). Laporan Geologi Sertifikasi Desain Bendungan Logung Kabupaten Kudus. Semarang: Balai Besar Wilayah Sungai Pemali-Juana.
- Balai Teknik Bendungan. (2016). Diklat Teknis Perencanaan Bendungan Tingkat Dasar. Jakarta: Balai Teknik Bendungan, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- De Vallejo, L. G., & Ferrer, M. (2011). Geological Engineering. Florida: CRC press.
- Kementerian Pekerjaan Umum. (1997). Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 72/PRT/1997 tentang Keamanan Bendungan. Kementerian Pekerjaan Umum. Jakarta.
- Morgenstern, N. u, & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1), 79–93.
- Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi. (2017). MODUL ANALISA STABILITAS BENDUNGAN: PERHITUNGAN REMBESAN. Jakarta: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Putra, M. H. Z., Kartiko, R. D., Soemantidiredja, P., Sadisun, I. A., & Tohari, A. (2020). PENGARUH ZONA JENUH AIR TERHADAP KESTABILAN LERENG DI WENINGGALIH, KABUPATEN BANDUNG BARAT. *RISET Geologi dan Pertambangan*, 30(1), 119. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2020.v30.1086>

Williams, E. (1986). Seepage Analysis and Control for Dams. Washington: Department of the Army US Army Corps of Engineers.