

Pengaruh Pelaksanaan Pekerjaan Timbunan terhadap Stabilitas Bendungan Urugan Selama Masa Konstruksi

A. H. M. Kurnia Zain ^{1*}, S. P. R Wardani ², dan Kresno Wikan Sadono ²

¹ Direktorat Bina Operasi dan Pemeliharaan, Ditjen SDA, Kementerian PUPR, Jakarta, Indonesia 12110

² Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia 50275

* penulis koresponden: husni.mubza@gmail.com

Abstrak: Pembangunan bendungan harus sesuai dengan tiga pilar Konsepsi Keamanan Bendungan, yaitu keamanan struktur, pemantauan, pemeliharaan, dan operasi, serta kesiapsiagaan tindak darurat. Keamanan bendungan salah satunya dapat ditinjau dari kestabilan lereng pada tubuh bendungan. Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi geologi dan geologi teknik, spesifikasi material timbunan dan analisis faktor keamanan lereng tubuh bendungan. Faktor keamanan yang dianalisis adalah selama pelaksanaan konstruksi bertahap timbunan dan saat konstruksi timbunan telah selesai tanpa beban gempa. Metode analisis stabilitas lereng yang digunakan menggunakan pemodelan dengan perangkat lunak *Geostudio 2020*. Analisis stabilitas menggunakan bidang gelincir yang stabilitasnya dievaluasi dan dibagi menjadi beberapa irisan dan tegangan normal yang bekerja pada dasar setiap lapisan timbunan. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan skenario kenaikan timbunan. Skenario yang dimodelkan sebanyak 10 lapisan dengan tiap lapisan setinggi 7 (tujuh) meter. *Initial static stress* masing-masing lapisan timbunan didapatkan dari *Parent analysis*. Hasil analisis pemodelan stabilitas lereng menunjukkan nilai FK cenderung menurun seiring bertambahnya ketinggian lapisan pekerjaan timbunan. Pada pekerjaan timbunan kondisi disipasi tekanan air pori yang dihasilkan saat akhir konstruksi tanpa waktu tunggu disipasi lebih besar dibandingkan dengan adanya waktu tunggu disipasi 7 hari. Perbedaan ketinggian timbunan dan kemiringan tanah dasar dapat mempengaruhi nilai faktor keamanan terutama pada timbunan yang tinggi dan kemiringan tanah dasar yang curam.

Kata kunci: bendungan urugan, faktor keamanan, *Geostudio 2020*, stabilitas lereng, timbunan

1. Pendahuluan

Bendungan Jlantah merupakan salah satu bendungan tipe urugan yang sedang dibangun oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat yang terletak di Desa Tlobo dan Desa Karang Sari, Kecamatan Jatiyoso, Kabupaten Karanganyar, Provinsi Jawa Tengah. Tinggi Bendungan Jlantah adalah 70 m yang dihitung dari pondasi terdalam dengan elevasi puncak bendungan +690,00 dan kemiringan lereng 1:3,2 di hulu serta 1:2,4 di hilir. Bendungan Jlantah dimanfaatkan untuk penyediaan air irigasi seluas 1.494 ha, penyediaan air baku sebesar 150 liter/detik. Selain itu dimanfaatkan untuk mereduksi banjir sebesar 70,33 m³/detik (51,26 % Q₅₀) dan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM) dengan potensi 625 KW.

Terdapat banyak tipe bendungan, namun sekitar 85-90% dari bendungan yang ada, tipe bendungan yang banyak dibangun adalah bendungan urugan. Bendungan urugan secara struktur lebih sederhana dan dapat memanfaatkan material timbunan yang tersedia di sekitar bendungan [1].

Diterima: 4 Oktober 2023

Disetujui: 22 Desember 2023

Sitasi:

Zain, A.H.M.K.; Wardani, S.P.R.; Sadono, K.W. Pengaruh Pelaksanaan Pekerjaan Timbunan terhadap Stabilitas Bendungan Urugan Selama Masa Konstruksi. *J. Teknik Sipil dan Lingkungan*. 2023; 8 (3): 167-176. <https://doi.org/10.29244/jsil.8.3.167-176>

Bendungan tidak hanya memiliki manfaat besar bagi masyarakat tetapi juga memiliki potensi risiko yang besar yang dapat mengancam kehidupan masyarakat seperti keruntuhan bendungan menyebabkan banjir besar di daerah hilir bendungan, sehingga pembangunan bendungan harus sesuai dengan tiga pilar Konsepsi Keamanan Bendungan, yaitu 1) keamanan struktur, 2) pemantauan, pemeliharaan, dan operasi, serta 3) kesiapsiagaan tindak darurat [2]. Keamanan bendungan salah satunya dapat ditinjau dari kestabilan lereng pada tubuh bendungan. Evaluasi stabilitas lereng struktur bendungan urugan merupakan salah satu masalah pada bidang rekayasa geoteknik yang sudah terjadi cukup lama [3].

Tujuan dari penelitian ini adalah mengidentifikasi kondisi geologi dan geologi teknik Bendungan Jlantah, mengidentifikasi spesifikasi material timbunan dan melakukan analisis faktor keamanan lereng tubuh bendungan. Faktor keamanan yang dianalisis adalah selama pekerjaan timbunan dan konstruksi timbunan telah selesai. Pada saat bendungan selesai masa konstruksi timbunan, stabilitas longsor pada lereng tubuh bendungan urugan yang ditinjau adalah lereng hulu dan lereng hilir [4].

Salah satu analisis numerik yang sering digunakan adalah metode elemen hingga (*finite element*) untuk pemodelan disipasi tekanan air pori dan metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium method*) untuk analisis stabilitas. Berdasarkan metode analisis ini, bidang gelincir yang stabilitasnya dievaluasi dibagi menjadi beberapa irisan dan tegangan normal yang bekerja pada dasar setiap irisan untuk mendapatkan kekuatan geser yang diinginkan [5]. Stabilitas lereng bendungan tanah dapat dievaluasi dengan kemiringan yang berbeda berdasarkan tingkat konstruksi bendungan dimana peningkatan kecepatan konstruksi bendungan menghasilkan peningkatan perpindahan vertikal dan horizontal dan penurunan stabilitas lereng [6].

Penelitian ini dilakukan dengan pemodelan skenario kenaikan timbunan berdasarkan metode pelaksanaan pembangunan Bendungan Jlantah. Skenario kenaikan timbunan Bendungan Jlantah dimodelkan dengan perangkat lunak *Geostudio 2020*.

2. Metode

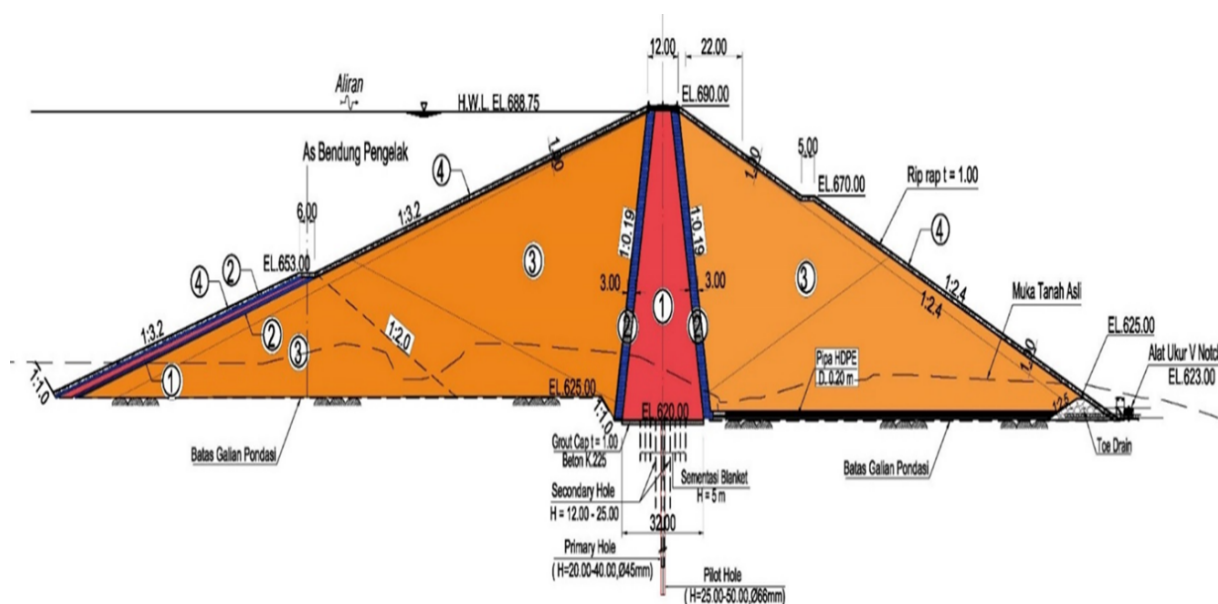
Metode penelitian yang dilakukan untuk analisis kestabilan lereng bendungan, yaitu metode analisis *Morgenstern-Price* dimana menggunakan prinsip kesetimbangan pada setiap gaya normal antar irisan dan momen yang bekerja antar irisan. Pemodelan dan analisis Faktor Keamanan (FK) stabilitas lereng yang dilakukan berdasarkan pada kondisi tanpa memperhatikan faktor kegempaan. Metode penelitian dijelaskan sebagai berikut:

2.1 Data Teknis Bendungan Jlantah

Bendungan yang dimodelkan adalah Bendungan Jlantah merupakan bendungan tipe urugan random kerikil krakalan zonal inti tegak yang mempunyai panjang puncak bendungan 404 m, tinggi bendungan 70 m dengan lebar puncak 12 m. Data teknis Bendungan Jlantah yang dimodelkan disajikan pada **Tabel 1** dan potongan melintang tubuh Bendungan Jlantah dapat dilihat pada **Gambar 1**.

Tabel 1. Data teknis tubuh Bendungan Jlantah [7]

No.	Uraian	Bendungan Utama
1	Tipe Bendungan	Urugan Random Kerikil Krakalan Zonal Inti Tegak
2	Panjang puncak bendungan	404,00 m
3	Tinggi bend. dari pondasi terdalam	70,00 m
4	Tinggi bend. dari dasar sungai	65,00 m
5	Elevasi puncak bendungan	EL. + 690,00
6	Elevasi pondasi terdalam	EL. + 620,00
7	Lebar puncak bendungan	12,00 m
8	Kemiringan lereng	Hulu 1 : 3,2 ; Hilir 1 : 2,4
9	Tinggi Cofferdam	12,00 m
10	Elevasi Puncak Main Cofferdam	EL. + 653,00
11	Lebar Puncak Main Cofferdam	6,00 m



Gambar 1. Potongan melintang Bendungan Jlantah

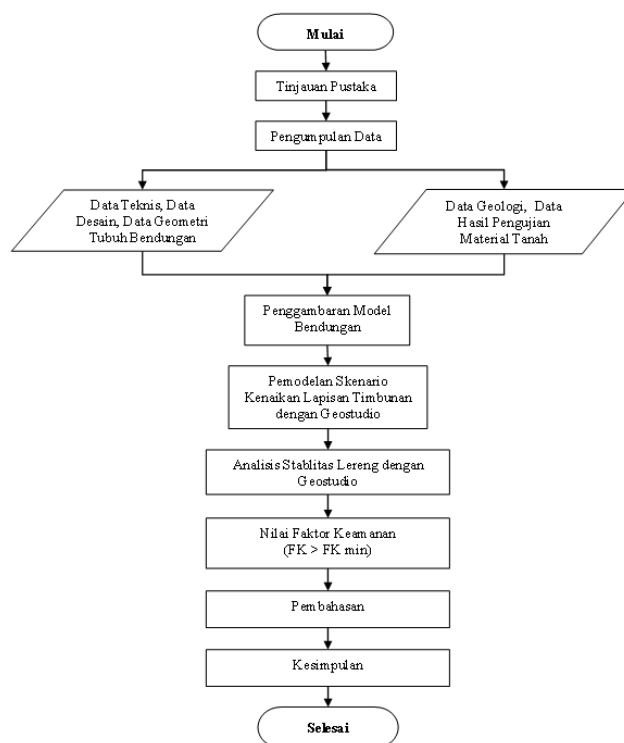
Bendungan Jlantah terdiri dari empat zona material dengan spesifikasi teknis material timbunan yang berbeda. Spesifikasi teknis material timbunan Bendungan Jlantah disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Spesifikasi teknis material timbunan teknis tubuh Bendungan Jlantah

No.	Material	Material Konstruksi
1.	Zone-1 (Inti)	- Ukuran butir maksimal 10 mm - Lolos saringan 200 : 40% - 85%
2.	Zone-2 (Filter)	- Ukuran butir maksimal 50 mm - Ukuran butir saringan 4,76 mm yang lolos : 40 % - 75 % - Ukuran butir saringan 19,1 mm yang lolos : 65 % - 100 %
3.	Zone-3 (Random Krikil Krakalan)	- Ukuran butir maksimal 40 cm - Prosentase lolos saringan 4,76 mm: kurang dari 5 % - Prosentase lolos saringan 38,1 mm: kurang dari 50 %
4.	Rip-rap	- Ukuran diameter batu maksimal 70 cm - Batu pecah

2.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian mencakup tinjauan pustaka dari berbagai sumber dan standar yang berlaku untuk melakukan analisis stabilitas bendungan selama masa konstruksi timbunan, pengumpulan data terdiri dari data teknis, data desain, data geometri bendungan yang diperlukan untuk penggambaran model dan pemodelan skenario kenaikan lapisan timbunan pada perangkat lunak *Geostudio 2020*. Analisis faktor keamanan (FK) lereng tubuh bendungan menggunakan *Geostudio 2020* dengan pengecekan tiap kelipatan ¼ ketinggian bendungan. Bagan alir penelitian dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Bagan alir penelitian

Pengumpulan data diperoleh dari BBWS Bengawan Solo yang meliputi data teknis, data desain, data geometri tubuh bendungan berkaitan dengan tipe bendungan, tinggi bendungan, lebar bendungan, elevasi lereng bendungan yang memuat dimensi untuk evaluasi dan penggambaran penampang tubuh bendungan pada program *Geostudio 2020*. Data data geologi, data pengujian material tanah berkaitan dengan parameter material, yaitu berat volume tanah (γ), kohesi (c), sudut geser (ϕ) dan koefisien permeabilitas (k). Parameter material yang digunakan sebagai input data awal pada perangkat lunak disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Parameter material tanah yang digunakan dalam pemodelan [8]

Zona	Material	Berat Volume	Kohesi	Sudut Geser	Permeabilitas Tanah	Model Material
		(γ) kN/m ³	(c) kPa	(ϕ) Derajat	(k) m/detik	
Zona 1	Inti Lempung	16,887	26,086	17,50	$1,42 \times 10^{-8}$	<i>Mohr-Coulomb</i>
Zona 2	Filter Halus	21,349	0	29,00	$1,03 \times 10^{-5}$	<i>Mohr-Coulomb</i>
Zona 3	Random Kasar	20,604	0	37,34	$4,05 \times 10^{-5}$	<i>Mohr-Coulomb</i>
Zona 4	Riprap	22,555	0	42,00	$1,00 \times 10^{-3}$	<i>Mohr-Coulomb</i>
Rock Toe	Rock Toe	22,555	0	42,00	$1,00 \times 10^{-3}$	<i>Mohr-Coulomb</i>
Pondasi	Pondasi	20,594	98,067	45,00	$1,42 \times 10^{-7}$	<i>Bedrock</i>

Pelaksanaan pekerjaan timbunan bendungan urugan dilakukan dengan pemadatan dengan *vibratory roller* sesuai dengan jumlah lintasan berdasarkan percobaan timbunan (*trial embankment*). Metode pelaksanaan pekerjaan timbunan yang dilakukan SNVT Pembangunan Bendungan BBWS Bengawan Solo akan dimodelkan dalam software *Geostudio 2020 (Slope/W)*. Parameter material masing-masing zona tubuh bendungan dimasukkan kedalam *Define Analyses*. Asumsi untuk menyederhanakan pemodelan dilakukan dengan membagi tinggi timbunan menjadi 10 lapisan atau tebal lapis timbunan yang dimodelkan per 7 (tujuh) meter.

Analisis stabilitas lereng dengan menggunakan perangkat lunak Geostudio 2020 (*Slope/W*) adalah metode keseimbangan batas (*Limit Equilibrium Method/ LEM*). Model material yang digunakan untuk pemodelan stabilitas lereng menggunakan *Mohr-Coulomb*. Analisis stabilitas dilakukan saat pelaksanaan konstruksi timbunan dan pada saat akhir konstruksi. Stabilitas lereng kenaikan timbunan $\frac{1}{4}$ tinggi bendungan dilakukan perhitungan Faktor Keamanan (FK) yang ditinjau terhadap lereng hulu maupun lereng hilir bendungan. Jika lapisan memiliki nilai FK lebih besar dari 1,3 berdasarkan SNI 8064:2016 pada **Tabel 4**, maka pemodelan kenaikan tubuh bendungan dapat dilanjutkan.

Tabel 4. Persyaratan faktor keamanan minimum untuk stabilitas bendungan tipe urugan [9]

No.	Kondisi	Kuat Geser	Tekanan Air Pori	FK Tanpa Gempa	FK dengan Gempa*
	Selesai Konstruksi Tergantung: 1. Jadwal konstruksi 2. Hubungan antara tekanan air pori dan waktu		Peningkatan tekanan air pori pada urugan dan fondasi dihitung menggunakan data lab dan pengawasan instrumen	1,30	1,20
1.	Lereng <i>Upstream</i> (U/S) dan <i>Downstream</i> (D/S)	1. Efektif	Idem tanpa pengawasan instrumen	1,40	1,20
	Dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 50% koefisien gempa desain		Hanya pada urugan tanpa data lab dan dengan/ tanpa pengawasan instrumen	1,30	1,20
2.	-	2. Total	Tanpa pengawasan instrumen	1,30	1,20

* Catatan: Periksa standar tentang metode analisis stabilitas lereng dinamik bendungan tipe urugan

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kondisi Geologi Bendungan Jlantah

Kondisi geologi regional yang ada di lokasi penelitian mengacu pada Peta Geologi Lembar Ponorogo, Jawa (Lembar 1508-1), Peta Geologi Bersistem Indonesia, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Kondisi tersebut terdiri dari morfologi regional, stratigrafi regional, geomorfologi Bendungan Jlantah, Stratigrafi Bendungan Jlantah dan Struktur Geologi Bendungan Jlantah [10].

Morfologi regional Pembangunan Bendungan Jlantah terletak di kaki Gunung Lawu yang termasuk dalam jalur gunungapi Kuarter yang masih aktif, sedangkan bagian selatan termasuk dalam jalur Pegunungan Selatan. Perbukitan di muara Sungai Tirtomoyo merupakan pebukitan lipatan berarah Timur Laut – Barat Daya. Beberapa tonjolan morfologi dibentuk oleh batuan terobosan.

Stratigrafi regional terdapat enam kelompok batuan dengan susunan stratigrafi dari muda ke tua. Susunan stratigrafi tersebut, yaitu Lahar Lawu (Qlla), Lava Condromuko (Qvcl), Lava Jobolarangan (Qvjl), Batuan Gunung Api Lawu (Qvl), Formasi Wonosari (Tmwl) dan Batuan Terobosan Andesit (Tma). Stratigrafi Bendungan Jlantah terdapat satuan batuan yang terdiri dari breksi vulkanik, sisipan pasir, tuf lapili dan endapan aluvial.

Berdasarkan Peta Topografi skala 1:25.000, daerah cekungan Bendungan Jlantah dan sekitarnya mempunyai ketinggian antara elevasi + 620 m sampai + 700 m di atas permukaan laut. Batuan penyusun morfologi ini adalah batuan produk gunungapi yang berumur Kuarter yang terdiri dari breksi vulkanik, tuf

dan sisipan pasir. Morfologi dataran terdapat dataran banjir di sepanjang kiri dan kanan sungai. Penyusun dari morfologi dataran ini adalah endapan aluvial yang terdiri dari boulder, kerakal, kerikil, pasir dan lempung. Bendungan Jlantah akan membendung 2 (dua) sungai utama, yaitu Kali Jlantah dan Kali Puru yang mengalir pada dasar lembah yang berkelok-kelok (*meander*) pada bagian tengah dan hilir. As Bendungan Jlantah terletak di hilir pertemuan antara Kali Jlantah dan Kali Puru berjarak sekitar 50 m. Terdapat pebukitan di bagian hulu yang memisahkan antara Kali Jlantah dan Kali Puru.

Pola struktur geologi regional yang mencakup daerah Pembangunan Bendungan Jlantah mempunyai arah kelurusan Barat – Timur dan bukan berupa sesar/ patahan. Struktur geologi lokal yang ditemukan adalah struktur kekar pada breksi dan perlapisan yang kurang baik pada breksi dan sisipan batu pasir. Beberapa lokasi longsoran ditemukan pada lereng lembah dan pebukitan di daerah rencana genangan. Pada umumnya lokasi-lokasi longsoran tersebut terjadi karena tebing/ lembah yang curam dan pada lapisan tanah paling atas.

3.2 Kondisi Geologi Teknik Bendungan Jlantah

Lokasi bendungan terletak di Sungai Jlantah yang mempunyai sudut lereng landai hingga terjal. Bukit tumpuan kiri mempunyai sudut lereng sekitar 30° sampai 50° , sedangkan bukit tumpuan kanan mempunyai sudut lereng sekitar 5° sampai 20° . Breksi vulkanik bagian atas dengan fragmen terdiri atas aneka bahan gunungapi (andesitik) berukuran 2 – 10 cm. Breksi vulkanik pada bagian bawah dengan fragmen terdiri atas aneka bahan gunungapi (andesitik) berukuran 1 – 3 cm. Breksi vulkanik merupakan batuan dasar di lokasi as bendungan. Nilai kelulusan air dari uji air di lubang bor antara 10^{-4} sampai 10^{-5} cm/detik. Pada rencana as bendungan breksi vulkanik tersingkap di dasar sungai (*bedrock stream*). Breksi vulkanik ditemukan sampai kedalam 90 m.

Diatas satuan breksi vulkanik terdapat satuan tuf lapili lapuk lanjut pada bagian atas dan tuf lapili lapuk ringan-sedang pada bagian bawah. Nilai kelulusan air tuf lapili bagian atas sebesar 10^{-5} cm/detik yang *impermeable* karena sebagian hasil pelapukan batuan menjadi lempung serta mempunyai ketebalan berkisar 2 – 5 m. Tuf lapili pada bagian bawah umumnya lulus air dengan nilai kelulusan air 10^{-4} cm/detik.

Endapan aluvial secara umum berupa endapan sungai yang terdapat diatas breksi vulkanik secara tidak selaras. Endapan sungai terdiri dari material lempung, pasir, kerikil, kerakal sampai bongkahan dan tidak terkonsolidasi. Lapisan permukaan (*top soil*), berupa lempung berwarna coklat sampai coklat kemerahan, mengandung akar, sebagian kesan batuan asal berupa tuf lapili dengan ketebalan sekitar 0,5 sampai 1,5 m.

Permeabilitas batuan dasar pondasi bendungan utama ditunjukkan oleh hasil test permeabilitas/ *Lugeon* di lapangan. Permeabilitas masa batuan dasar pondasi di dasar sungai pada elevasi +625 sampai +615 mempunyai nilai 22,78 – 26,01 *Lugeon* ($3,03 \times 10^{-4}$ cm/detik – $3,46 \times 10^{-4}$ cm/detik) dengan kelas *moderate permeability*, elevasi +615 sampai +566 dengan nilai 5,11 – 7,53 *Lugeon* ($1,00 \times 10^{-4}$ cm/detik – $6,81 \times 10^{-5}$ cm/detik) dengan kelas *low permeability*, pada elevasi +566 sampai +556 dengan nilai 4,58 – 4,96 *Lugeon* ($6,10 - 6,61 \times 10^{-5}$ cm/detik) dengan kelas *low permeability*.

3.3 Analisis Stabilitas Lereng

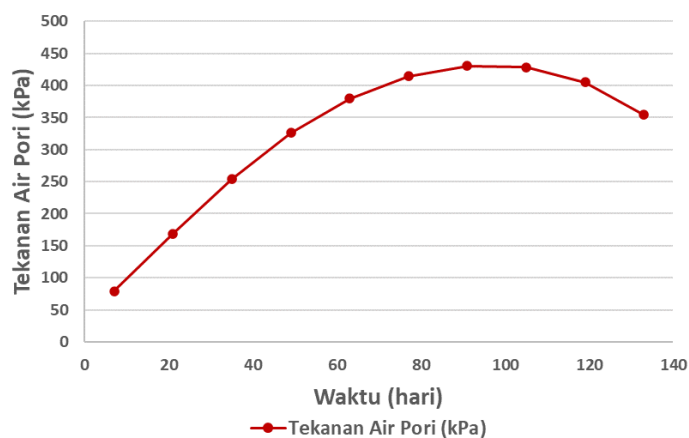
Analisis stabilitas lereng bendungan inti lempung berdasarkan pada hasil analisis dari *Sigma/W* sebagai *initial static stress*, kemudian analisis stabilitas lereng dimodelkan dengan *Slope/W* menggunakan metode analisis *Morgenstern-Price* dengan asumsi bidang gelincir yang terjadi berbentuk cekung/ longsoran rotasi yang umumnya terjadi pada timbunan tanah, sehingga pemodelan dalam *Slope/W* dilakukan dengan menggunakan metode *Entry* dan *Exit*. Bidang gelincir dengan metode *Entry* dan *Exit* akan membentuk bidang gelincir yang dangkal. Pemodelan skenario kenaikan timbunan dilakukan untuk analisis stabilitas lereng bendungan selama masa konstruksi. *Initial static stress* masing-masing skenario lapisan timbunan didapatkan dari *Parent analysis*.

Pemodelan analisis stabilitas lereng diasumsikan zona inti lempung mempunyai tekanan air pori akibat *overburden* menggunakan kategori material efektif dengan perubahan tekanan air pori untuk membangkitkan tekanan air pori dalam timbunan secara otomatis. Sedangkan untuk model material dalam pemodelan kenaikan timbunan dalam perangkat lunak *Sigma/W* sebagai initial *static stress* menggunakan jenis *linear elastic* dengan perubahan tekanan air pori. Analisis menggunakan tekanan efektif tipe *Couple Stress/PWP*.

Pemodelan kenaikan timbunan dengan adanya perubahan tekanan air pori dengan parameter efektif dilakukan input data *Hydraulic Properties*, yaitu *Volume Water Content Function*, dan *Hydraulic Conductivity Function*. Jenis tanah yang dipakai untuk estimasi adalah material lempung. Parameter *saturated water content* yang digunakan sebesar 0,5. Sedangkan untuk mengestimasi *Hydraulic Conductivity Function* nilai parameter *saturated hydraulic conductivity* yang digunakan dalam analisis adalah $1,42 \times 10^{-8}$ m/detik.

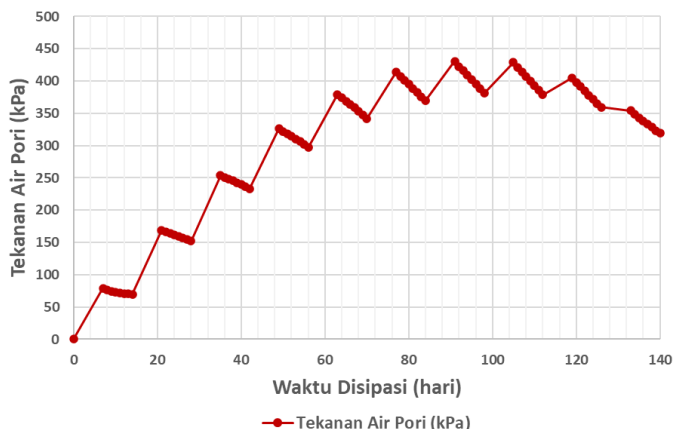
Nilai tekanan air pori bendungan dengan *placement water content* sama dengan OMC, maka tekanan air pori yang diperbolehkan adalah 30% dari tekanan *overburden*. Tekanan air pori yang diperbolehkan sebesar 30% dari *overburden*. Pemodelan tekanan air pori dilakukan dengan skenario waktu disipasi air pori 7 (tujuh) hari. Hasil pemodelan dengan waktu tunggu disipasi menghasilkan nilai yang berangsur turun seiring penambahan lapisan timbunan. Nilai tekanan air pori yang dihasilkan saat akhir konstruksi tanpa waktu tunggu sebesar 354 kPa, sedangkan dengan waktu tunggu 7 hari sebesar 318 kPa. Grafik tekanan air pori ditunjukkan pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**.

Tekanan Air Pori (kPa) Tanpa Waktu Disipasi



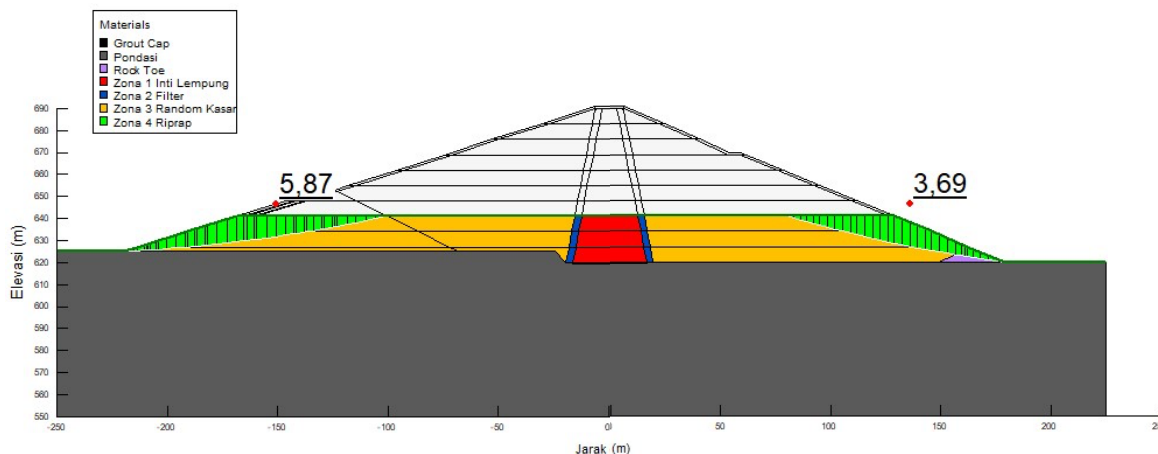
Gambar 3. Grafik tekanan air pori tanpa waktu tunggu

Tekanan Air Pori (kPa) dengan Waktu Disipasi



Gambar 4. Grafik tekanan air pori dengan waktu tunggu (7 Hari)

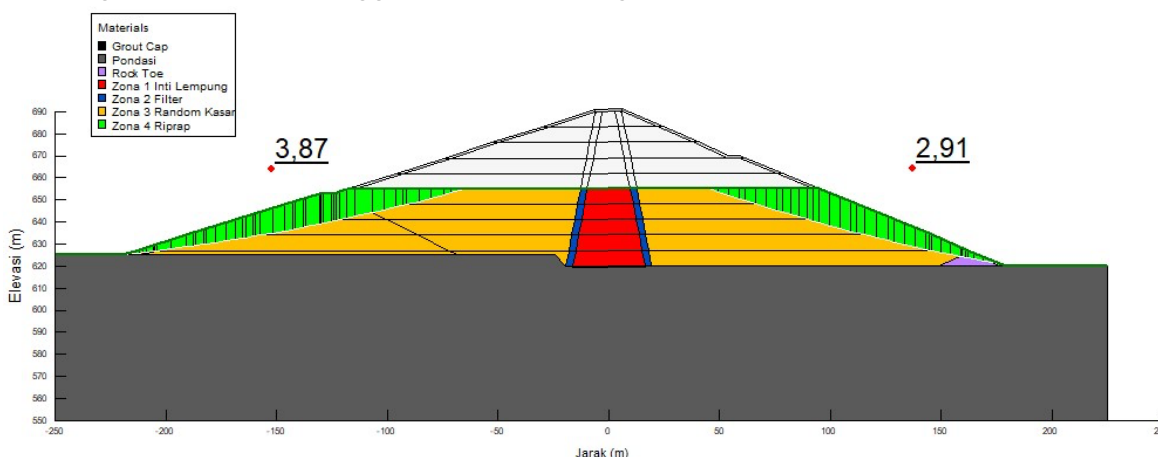
Analisis stabilitas lereng pada pekerjaan timbunan lapisan ke-3 atau tahap penimbunan $\frac{1}{4}$ tinggi tubuh bendungan, memiliki nilai Faktor Keamanan (FK) sebesar 5,87 untuk lereng hulu dan 3,69 untuk lereng hilir. Hasil analisis pemodelan stabilitas lereng timbunan pada tinggi $\frac{1}{4}$ tubuh bendungan dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Faktor keamanan stabilitas lereng pekerjaan timbunan lapisan ke-3 bagian hulu dan hilir

Kondisi lereng timbunan pada lapisan ke-3 mempunyai nilai FK diatas 1,3 yang artinya lereng timbunan aman dan dapat dilanjutkan dengan pekerjaan penimbunan untuk lapisan selanjutnya. Bidang gelincir yang berbentuk cekung/ longсорan rotasi ditempatkan pada Zona 3 yaitu random kasar yang memiliki nilai berat volume sebesar $20,604 \text{ kN/m}^3$, kohesi 0 kPa dan sudut geser $37,34^\circ$.

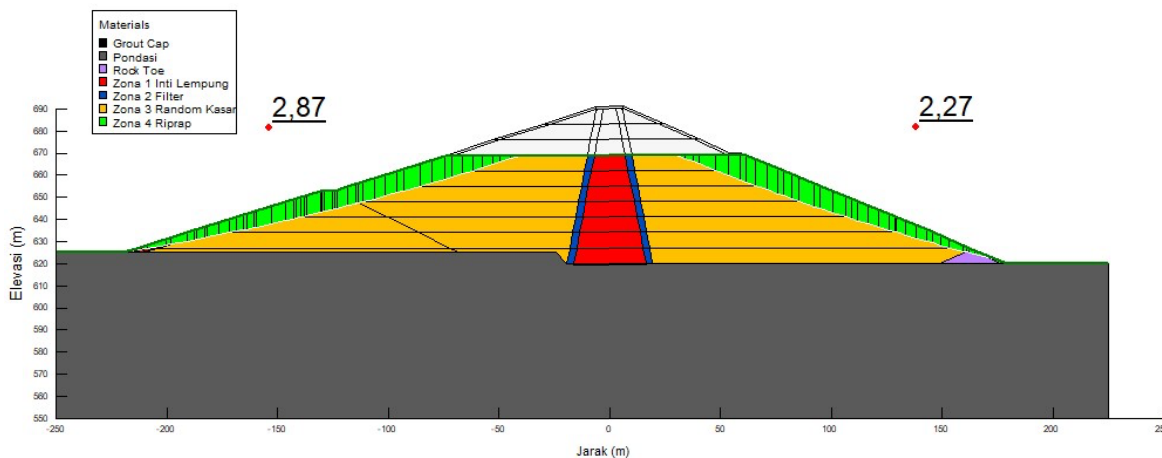
Analisis stabilitas lereng dilanjutkan dengan pemodelan kenaikan timbunan lapisan ke-4 dan lapisan ke-5 atau skenario pemodelan timbunan sampai pada $\frac{1}{2}$ ketinggian bendungan. Hasil stabilitas lereng menghasilkan nilai FK sebesar 3,87 untuk lereng hulu dan 2,91 untuk lereng hilir. Kondisi lereng timbunan pada lapisan ke-5 mempunyai nilai FK diatas 1,3 yang artinya lereng timbunan aman dan dapat dilanjutkan dengan pekerjaan penimbunan selanjutnya, yaitu lapisan ke-6 dan ke-7. Hasil analisis pemodelan stabilitas lereng timbunan pada tinggi $\frac{1}{2}$ tubuh bendungan dapat dilihat pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Faktor keamanan stabilitas lereng pekerjaan timbunan lapisan ke-5 bagian hulu dan hilir

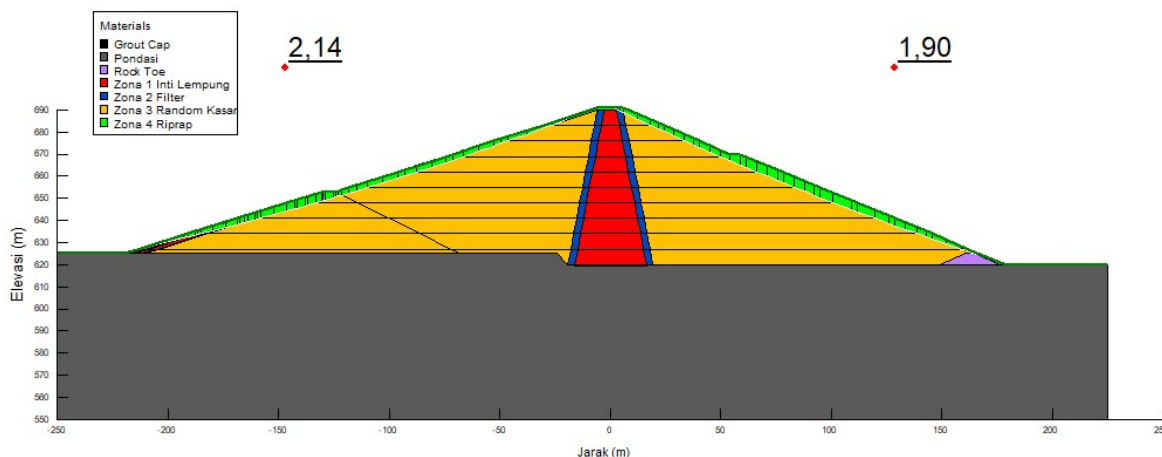
Pekerjaan timbunan pada lapisan ke-6 dan lapisan ke-7 dimodelkan untuk mencapai ketinggian timbunan setinggi $\frac{3}{4}$ dari ketinggian bendungan. Hasil analisis stabilitas lereng pada lapisan ke-7 mempunyai nilai FK sebesar 2,87 untuk lereng hulu dan 2,27 untuk lereng hilir. Kondisi lereng timbunan pada lapisan ke-7 mempunyai nilai FK diatas 1,3 yang artinya lereng timbunan aman dan dapat dilanjutkan

dengan pekerjaan penimbunan untuk lapisan ke-8, ke-9 sampai dengan lapisan akhir. Hasil pemodelan analisis stabilitas bendungan $\frac{3}{4}$ tinggi bendungan dapat dilihat dalam **Gambar 7**.



Gambar 7. Faktor keamanan stabilitas lereng pekerjaan timbunan lapisan ke-7 bagian hulu dan hilir

Pemodelan pekerjaan timbunan pada lapisan ke-10 atau lapisan akhir menunjukkan nilai FK pada akhir masa konstruksi tanpa beban gempa memiliki nilai 2,14 untuk lereng hulu dan 1,90 untuk lereng hilir. Kondisi akhir konstruksi tanpa beban gempa $FK > 1,3$, dikategorikan aman sesuai dengan persyaratan. Hasil pemodelan analisis stabilitas bendungan akhir masa konstruksi dapat dilihat pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Faktor keamanan stabilitas lereng pekerjaan timbunan lapisan akhir bagian hulu dan hilir

Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng menunjukkan bahwa hubungan nilai FK cenderung menurun seiring bertambahnya ketinggian lapisan pekerjaan timbunan. Pada setiap pekerjaan timbunan kondisi disipasi tekanan air pori perlu diperhatikan karena nilai tekanan air pori yang dihasilkan saat akhir konstruksi tanpa waktu tunggu lebih besar dibandingkan dengan adanya waktu tunggu 7 hari. Selain itu, perbedaan ketinggian timbunan dan kemiringan tanah dasar dapat mempengaruhi nilai faktor keamanan terutama pada timbunan yang tinggi dan kemiringan tanah dasar yang curam [11].

Lereng hulu memiliki nilai FK yang lebih besar dari lereng hilir, dikarenakan kemiringan lereng hulu yang lebih landai dan lokasi bidang gelincir tidak berubah. Kondisi stabilitas lereng pada bagian hilir bendungan tanpa beban gempa memiliki nilai FK yang relatif lebih kecil dibandingkan bagian hulu bendungan karena pada bagian hilir bendungan cenderung memiliki tekanan yang tinggi dan material tanggul yang jenuh, sehingga kestabilan lereng bagian hilir semakin berkurang [12].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan diatas dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Lokasi penelitian terletak di kaki Gunung Lawu yang termasuk dalam jalur gunungapi Kuartar yang masih aktif, sedangkan bagian selatan termasuk dalam jalur Pegunungan Selatan. Stratigafi Bendungan Jlantah terdapat satuan batuan yang terdiri dari breksi volkanik, sisipan pasir, tuf lapili dan endapan aluvial. Pola struktur geologi regional yang mencakup daerah penelitian mempunyai arah kelurusan Barat – Timur dan bukan berupa sesar/ patahan.
2. Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng pada tiap ketinggian bendungan yang ditinjau dan akhir pekerjaan timbunan dapat disimpulkan nilai Faktor Keamanan pelaksanaan pekerjaan timbunan menurun seiring dengan bertambahnya ketinggian timbunan tubuh bendungan.
3. Nilai faktor keamanan yang dihasilkan dari pemodelan pekerjaan timbunan pada kondisi tanpa beban gempa menunjukkan nilai $FK > 1,3$ (FK minimum). Nilai FK tersebut telah memenuhi persyaratan sesuai dengan SNI 8064:2016 tentang Metode analisis stabilitas lereng statik bendungan tipe urugan.

Daftar Pustaka

- [1] Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C. & Narayanan, R., Hydraulic Structures Fourth Edition, New York: Taylor & Francis, 2007.
- [2] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Peraturan Menteri PUPR No. 27/PRT/2015 tentang Bendungan, Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015.
- [3] Duncan, J. M., Wright, S. G., Brandon, T. L., Soil Strength and Slope Stability Second Edition, Hoboken: Jhon Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [4] Margaretha, N. Y., Kamiana, I. M., Nindito, D. A., "Studi Analisis Dimensi dan Stabilitas Tubuh Bendungan Urugan Beringin Sila," *Jurnal Teknika*, vol. 4, no. 1, pp. 81-89, 2020.
- [5] Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S. & Boyce, G. M., Slope Stability and Stabilization Methods Second Edition, Hoboken: Jhon Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [6] Yousefirad, M. & Mohammadi, M., "Stability Analysis of Earth Dams Based on Consruction Pace on Soft Soil," *Life Science Journal*, vol. 10, no. 6s, pp. 436-443, 2013.
- [7] BBWS Bengawan Solo, Laporan Pembangunan Bendungan Jlantah, Solo: SNVT Pembangunan Bendungan BBWS Bengawan Solo, 2023.
- [8] BBWS Bengawan Solo, Laporan Hasil Pengujian Laboratorium Proyek Pembangunan Bendungan Jlantah, Solo: SNVT Pembangunan Bendungan BBWS Bengawan Solo, 2020.
- [9] Badan Standarisasi Nasional, SNI 8064:2016 tentang Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2016.
- [10] BBWS Bengawan Solo, Laporan Geologi: Studi Investigasi Tambahan untuk DD Bendungan Jlantah, Solo: SNVT Pembangunan Bendungan BBWS Bengawan Solo, 2017.
- [11] M. F. S. Ikhya, "Analisis Stabilitas Timbunan pada Tanah Dasar Berbentuk Lereng dengan Metode Elemen Hingga," *Reka Racana: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 6, no. 3, pp. 179-190, 2020.
- [12] Maretha, L., Darsono, S., Sadono, K. W., "Analisis Stabilitas dan Keamanan Bendungan Ciawi (Dry Dam) di Provinsi Jawa Barat," *Rang Teknik Jurnal*, vol. 3, no. 2, pp. 243-251, 2020.