

Analisis Stabilitas Dan Tegangan Bendungan RCC (*Rolled-Compacted Concrete*) Pada Pembangunan Bendungan Cibeet

Eko Walujodjati¹, Sulwan Permana², Mega Aprilianti^{3*}

^{1,2,3}) Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Garut
Jl. Mayor Syamsu No.1, Jayaraga, Kec. Tarogong Kidul, Kabupaten Garut, Jawa Barat 44151

*Corresponding Author's email: 2011024@itg.ac.id

Diterima : 6 September 2024
Direvisi : 29 November 2024

Disetujui : 6 Desember 2024
Diterbitkan : 30 Mei 2025

Abstract: Dams are important structures that function to store water and regulate its flow as needed. Considering that one of the goals of the construction of the Cibeet Dam is to be able to reduce the flooding that occurred downstream of the Citarum River by 66% in Q_{25} , which is $300.33 \text{ m}^3/\text{sec}$, a thorough analysis of the stability and tension in the dam body is a crucial step in the construction process. This study aims to analyze the stability and stress distribution of RCC (*Rolled-Compacted Concrete*) type dams on the right side of Cibeet Dam under 7 loading conditions. Manual calculations are carried out using Limit Equilibrium Method to assess safety factors against overturning, sliding, and soil bearing capacity. Meanwhile, the value and voltage distribution were analyzed using Finite Element Method (FEM)-based software, namely Abaqus Learning Edition 2023. The results of the analysis showed that the smallest $SF_{\text{overturning}}$ value occurred in condition VI of $4.198 > 1.15$. The smallest SF_{sliding} occurred in condition I, which was $6.63 > 1.7$ in the condition of completion of construction. The largest soil bearing capacity reviewed based on the stress value was obtained 0.707 MPa which occurred in Condition VII, while the minimum stress occurred in Condition II, namely the normal reservoir water level condition of 0.206 MPa . The maximum stress analyzed using Abaqus software occurred at the loading of Condition VI by 0.718 MPa , which was less than the allowable stress of 4.359 MPa . The analysis conducted indicates that the construction of the Cibeet dam using the RCC type can be continued with the belief that the existing planning design is able to overcome various loading conditions, thereby supporting the sustainability and operational safety of the dam.

Keywords : finite element method; limit equilibrium method; RCC Dam; stability; stress.

Abstrak: Bendungan merupakan struktur penting yang berfungsi untuk menyimpan air dan mengatur alirannya sesuai kebutuhan. Mengingat salah satu tujuan dibangunnya Bendungan Cibeet adalah untuk dapat mereduksi banjir yang terjadi di hilir sungai Citarum sebesar 66% pada Q_{25} yaitu $300,33 \text{ m}^3/\text{det}$, analisis menyeluruh terhadap stabilitas dan tegangan pada tubuh bendungan menjadi langkah krusial dalam proses konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas dan distribusi tegangan pada bendungan tipe RCC (*Rolled-Compacted Concrete*) di sisi kanan Bendungan Cibeet pada 7 kondisi pembebanan. Perhitungan manual dilakukan menggunakan metode keseimbangan batas untuk menghitung faktor keamanan terhadap guling, geser, dan daya dukung tanah. Sementara itu, nilai dan distribusi tegangan dianalisis menggunakan perangkat lunak berbasis Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*, FEM) yaitu Abaqus Learning Edition 2023. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai FK_{guling} paling kecil terjadi pada kondisi VI sebesar $4,198 > 1,15$. FK_{geser} terkecil terjadi pada kondisi I yaitu kondisi selesai konstruksi sebesar $6,63 > 1,7$. Daya dukung tanah paling besar yang ditinjau berdasarkan nilai tegangan diperoleh $0,707 \text{ MPa}$ yang terjadi pada Kondisi VII, sedangkan tegangan minimum terjadi pada Kondisi II yaitu kondisi muka air waduk normal sebesar $0,206 \text{ MPa}$. Tegangan maksimum hasil analisis menggunakan *software* Abaqus terjadi pada pembebanan Kondisi VI sebesar $0,718 \text{ MPa}$ lebih kecil dari tegangan izin yaitu $4,359 \text{ MPa}$. Analisis yang dilakukan mengindikasikan bahwa konstruksi bendungan Cibeet menggunakan tipe RCC dapat dilanjutkan dengan keyakinan bahwa desain perencanaan yang ada mampu mengatasi berbagai kondisi pembebanan, sehingga mendukung keberlanjutan dan keamanan operasional bendungan.

Kata kunci : metode elemen hingga; metode keseimbangan batas; Bendungan RCC; stabilitas; tegangan.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan sumber daya air semakin meningkat setiap harinya, baik untuk pemenuhan kebutuhan air minum, irigasi pertanian, maupun pembangkit listrik tenaga air. Oleh karena itu, bendungan menjadi infrastruktur penting yang digunakan untuk menampung air dan mengatur aliran air sesuai dengan kebutuhan [1]. Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Citarum sedang melaksanakan konstruksi Bendungan Cibeet dengan tujuan untuk mereduksi banjir di daerah hilir Sungai Citarum pada elevasi Muka Air Waduk +75 sebesar 66% pada Q_{25} yaitu $300,33 \text{ m}^3/\text{det}$, menyediakan pasokan air bersih sebesar $3,77 \text{ m}^3/\text{det}$ untuk beberapa kabupaten dan kawasan industri. Bendungan Cibeet juga diharapkan dapat difungsikan sebagai sistem irigasi pertanian yang akan mengairi lahan seluas 1.037 Ha. Selain itu, bendungan ini juga diharapkan dapat berperan sebagai pembangkit tenaga listrik dengan kapasitas sebesar 0,25 MW [2].

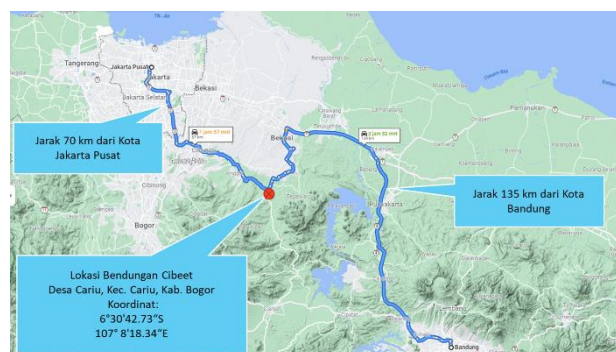
Bendungan adalah struktur yang dibangun melintang sungai [3]. Tubuh bendungan (*main dam*) merupakan bagian terpenting dari konstruksi bendungan, karena secara umum tubuh bendungan berperan sebagai penyangga tandonan air dan penahan rembesan air ke hilir [4]. Pemilihan tipe bendungan didasarkan pada kondisi geoteknik dan fungsi dari bendungan. Bendungan Cibeet menggunakan tipe bendungan beton padat gilas (*Rolled-Compacted Concrete, RCC*) sepanjang 960 m di sisi kanan sebagai tubuh bendungan utama. Bendungan RCC yaitu bendungan yang secara penuh terisi beton kemudian dipadatkan menggunakan roller [5][6]. Proses pemadatan yang efisien memungkinkan RCC dapat dilaksanakan dengan cepat, sehingga mempercepat waktu penyelesaian proyek [7].

Kegagalan pada bendungan dapat disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk kegagalan struktur seperti longsor, kegagalan hidraulik yang mengakibatkan peluapan air, serta masalah operasional dan terjadinya rembesan yang dapat mengganggu kestabilan bendungan [8]. Bendungan yang tidak stabil dapat berpotensi mengakibatkan kegagalan struktural yang serius, mengancam keselamatan penduduk di hilir bendungan serta merusak infrastruktur dan properti di sekitarnya. Untuk mengurangi risiko kegagalan bendungan, diperlukan analisis kestabilan yang komprehensif terhadap risiko-risiko tersebut. Kestabilan bendungan ini dipengaruhi oleh gaya-gaya yang bekerja baik itu vertikal maupun horizontal [9].

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui besaran nilai faktor keamanan tubuh bendungan terhadap potensi guling, geser, dan daya dukung tanah, serta untuk mengetahui distribusi dan besaran nilai tegangan pada tubuh bendungan. Penelitian ini dapat menjadi referensi atau perbandingan bagi pihak terkait untuk perencanaan, pemeliharaan, dan pengembangan bendungan RCC di masa depan.

2. METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian yaitu Bendungan Cibeet berada di wilayah Kecamatan Cariu Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat. Pencapaian lokasi dari Kota Bandung sekitar $\pm 116 \text{ km}$ melalui Jalur Sawahan (Kota Bandung - Jonggol - Cariu Kab. Bogor). Letak as bendungan secara geografis terletak pada posisi secara geografis berada pada $106^{\circ}51'36''$ - $107^{\circ}51'$ BT dan $7^{\circ}19'$ - $6^{\circ}24'$ LS. Kondisi topografi di lokasi bendungan Cibeet adalah daerah cekungan yang diapit oleh perbukitan tinggi di sisi kanan dan perbukitan rendah di sisi kiri serta pada daerah hulu bendungan merupakan daerah pegunungan.



Gambar 1. Lokasi rencana Bendungan Cibeet [2]

Data sekunder yang akan digunakan meliputi data geoteknik, data material bendungan RCC, data teknis Bendungan Cibeet, data geometri (*shop drawing*) bendungan RCC, dan data koefisien gempa yang diperoleh dari Peta Zona Gempa Indonesia Tahun 2017.

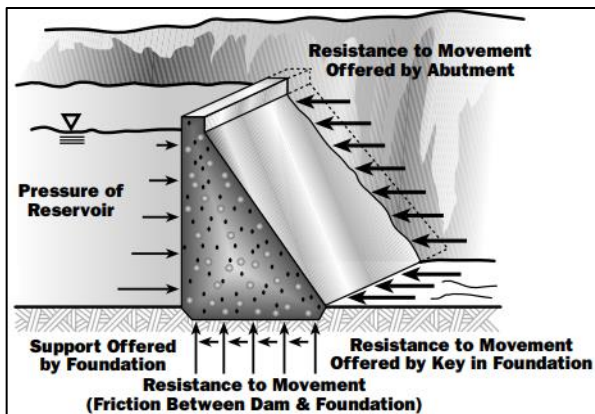
Kondisi Dasar Pembebanan

Berdasarkan Pedoman Analisis Dinamik Bendungan Beton Gaya Berat Tahun 2009, terdapat 7 kondisi pembebanan dalam stabilitas bendungan beton Gravitasi yang dibagi menjadi tiga kondisi pembebanan, yaitu:

1. Kondisi pembebanan luar biasa – Selesai konstruksi, elevasi air banjir standar proyek, elevasi air normal dengan gempa dasar operasi (OBE).

2. Kondisi pembebanan biasa – Elevasi air waduk normal.
3. Kondisi pembebanan ekstrim – Konstruksi dengan gempa dasar operasi (*Operating Basis Earthquake*, OBE), elevasi air normal dengan gempa maksimum boleh jadi (*Maximum Credible Earthquake*, MCE), elevasi air banjir maksimum boleh terjadi.

Dalam konstruksi bendungan, gaya yang dapat menahan atau memperkuat adalah berat sendiri (W) dan akibat tekanan tanah pasif (P_p). Sedangkan gaya akibat tekanan *uplift* (P_u) dari dasar bendungan, tekanan air (P_w), tekanan sedimen (P_s), tekanan hidrodinamis (P_d) yang bekerja di hulu bendungan, gaya akibat gempa (W_g), dan gaya akibat tekanan tanah aktif (P_a) merupakan gaya yang melemahkan atau bahkan dapat mengurangi stabilitas bendungan [10]. Gaya yang bekerja pada bendungan beton dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Pembebanan pada bendungan beton [11]

1) Gaya Berat

Gaya Berat merupakan berat keseluruhan bendungan dan struktur penunjangnya, seperti pintu air, jembatan, dan lainnya. Berat sendiri dari bendungan berasal dari material yang digunakan dalam konstruksinya. Gaya berat dapat dihitung menggunakan persamaan 1.

$$W = A \cdot \gamma_{\text{beton}} \quad (1)$$

dengan W adalah berat bendungan, A adalah luas segmen bendungan (m^2) dan γ_{beton} adalah berat jenis beton (2,3 - 2,4 ton/ m^3).

2) Tekanan Hidrostatik

Menurut Hardiyatmo HC (2006) dalam Jurnal Nurnawanty et al., (2018)[12], tekanan hidrostatik merupakan tekanan yang dipengaruhi oleh zat cair pada kedalaman tertentu. Besarnya tekanan ini tergantung pada ketinggian, massa jenis, dan

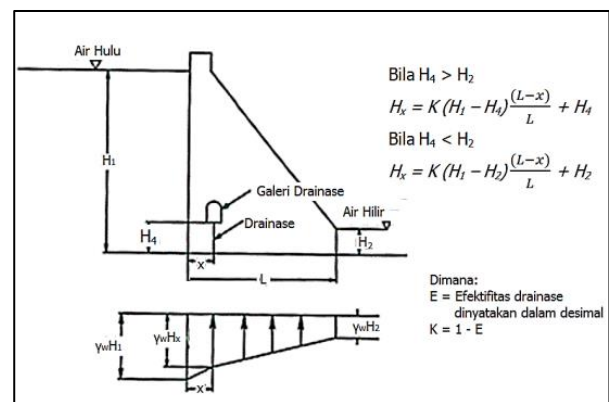
percepatan gravitasi. Tekanan air di hulu bendungan dapat dihitung menggunakan persamaan 2.

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot H^2 \quad (2)$$

dengan P_a adalah tekanan hidrostatik air (ton), γ_w adalah berat volume air (1 ton/ m^3), dan H adalah tinggi air (m).

3) Tekanan Angkat (*Uplift*)

Gaya angkat merupakan salah satu gaya vertikal yang memberikan perlawanan. Keterangan nilai H_x merupakan nilai efektivitas galeri, dengan nilai koefisien (K) 100% dan efektivitas drainase yaitu 0%[13].



Gambar 3. Distribusi Tekanan Angkat dengan Galeri Drainase [14]

4) Tekanan Tanah dan Sedimen

Tekanan tanah yang timbul di sekitar bendungan terjadi ketika tanah urugan ditempatkan di dalam galian pondasi dan mengelilingi beton monolit [15]. Tekanan tanah aktif dan pasif dapat dihitung menggunakan persamaan coloumb sebagai berikut:

$$K_a/K_p = \frac{\cos^2(\phi \pm \theta)}{\cos^2 \theta \cdot \cos(\delta \pm \theta) \left[1 + \frac{\sin(\alpha \pm \phi) \sin(\phi \pm \alpha)}{\cos(\delta \pm \theta) \cos(\theta \pm \alpha)} \right]^2} \quad (3)$$

$$P_a/P_p = \frac{1}{2} \cdot K_a/K_p \cdot \gamma \cdot H^2 \quad (4)$$

dengan P_a/P_p adalah tekanan tanah aktif/pasif (ton), γ adalah berat jenis tanah (t/ m^3), H adalah tinggi tanah (m), K_a/K_p adalah koefisien tekanan tanah aktif normal, Φ adalah sudut geser dalam tanah ($^\circ$), θ adalah sudut kemiringan permukaan dinding penahan terhadap garis vertikal, α adalah sudut kemiringan *backfill* material terhadap garis horizontal, δ adalah sudut geser antara tanah

dengan dinding penahan, dan β adalah $\tan \beta$ (-1) ($kh/(1-kv)$)).

Menurut Dirjen Pengairan DPU dalam KP-06 (1986), tekanan sedimen yang bekerja terhadap muka hulu dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 5.

$$P_s = \frac{\gamma_s \cdot h_s^2}{2} \cdot \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (5)$$

Tabel 1. Kriteria Faktor Risiko untuk Evaluasi Keamanan Bendungan

Faktor Risiko	Angka bobot dalam kurung			
	Ekstrim	Tinggi	Moderat	Rendah
Kapasitas ($10^3 m^3$) (FRk)	>100 (6)	100-1,25 (4)	1,00-0,125 (2)	<0,125 (0)
Tinggi (m) (FRt)	>45 (6)	45-30 (4)	30-15 (2)	<1,5 (0)
Kebutuhan evakuasi (orang) (FRc)	>1000 (12)	1000-100 (8)	100-1 (4)	0 (0)
Tingkat kerusakan hilir (FRh)	Sangat tinggi (12)	Tinggi (10) Agak tinggi (8)	Moderat (4)	Tidak ada (0)

Sumber : Departemen Pekerjaan Umum, 2009

Kelas beban gempa ditentukan dengan menghitung faktor risiko total (FR_{Tot}) menggunakan persamaan 6.

$$FR_{tot} = FR_k + FR_t + FR_c + FR_h \quad (6)$$

Tabel 2. Kelas Risiko Bendungan dan Bangunan Air

Faktor Risiko Total	Kelas Risiko
(0-6)	I (Rendah)
(7-18)	II (Moderat)
(19-30)	III (Tinggi)
(31-36)	IV (Ekstrim)

Sumber : Departemen Pekerjaan Umum, 2009

Analisis Stabilitas Bendungan RCC

Stabilitas bendungan adalah perhitungan konstruksi yang bertujuan untuk menentukan

dengan P_s adalah tekanan sedimen (ton), γ adalah berat jenis tanah (t/m^3), dan h_s adalah tinggi endapan sedimen (m).

5) Kegempaan

Terdapat kriteria risiko yang terjadi untuk evaluasi keamanan bendungan, ditampilkan pada **Tabel 1**.

apakah bendung dapat menanggung beban dan gaya yang bekerja padanya dalam semua situasi [16].

Persyaratan stabilitas bendungan beton gravitasi untuk semua kondisi dasar pembebanan adalah sebagai berikut:

1. Kestabilan terhadap potensi guling harus terpenuhi pada setiap bidang horizontal pada struktur, dasar, atau di bawah dasar.
2. Kestabilan terhadap potensi geser harus terjamin pada setiap bidang horizontal di dasar bangunan atau pada setiap lapisan dalam pondasi.
3. Tegangan maksimum yang diizinkan pada beton atau bahan pondasi tidak boleh melebihi batas yang ditetapkan.

Tabel 3. Kriteria stabilitas dan tegangan

Kondisi beban	Lokasi resultan pada dasar pondasi	FK geser minimum	Tegangan pada dasar pondasi	Kuat beton	
				Tekan (kPa)	Tarik (kPa)
Biasa	Pertengahan 1/3	2,0	$\leq$ izin	0,3 f_c'	0
Luar biasa	Pertengahan 1/3	1,7	$\leq$ izin	0,3 f_c'	1,142 $f_c' 2/3$
Ekstrim	Di dasar	1,3	$\leq 1,33$ izin	0,3 f_c'	2,855 $f_c' 2/3$

Sumber : Departemen Pekerjaan Umum, 2009

Metode Keseimbangan Gaya dan Momen

Metode ini digunakan untuk mencari nilai faktor keamanan atau stabilitas pada tubuh Bendungan Cibeet terhadap geser, guling dan daya dukung tanah. Langkah-langkah perhitungannya antara lain:

1. Menentukan gaya-gaya vertikal dan horizontal yang bekerja pada tubuh bendungan, dengan perjanjian tanda ditentukan untuk gaya

horizontal ke kiri sedangkan untuk gaya vertikal ke bawah.

2. Menghitung momen akibat gaya-gaya yang bekerja dari bentuk geometri bendungan, dengan perjanjian tanda momen yang berlawanan arah jarum jam adalah negatif.
3. Setelah diketahui, maka eksentrisitas, stabilitas terhadap guling, geser dan daya dukung tanah dapat dihitung sebagai berikut:

a. Stabilitas Terhadap Guling

Stabilitas terhadap guling dihitung dengan menjumlahkan semua momen vertikal (ΣM_V) dan gaya lateral untuk setiap kondisi pembebanan pada bendungan, kemudian menjumlahkan momen horizontal (ΣM_H) yang dihasilkan oleh gaya-gaya tersebut [17]. Persamaan 7 merupakan persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai faktor keamanan terhadap guling.

$$FK = \frac{\Sigma M_V}{\Sigma M_H} \quad (7)$$

dengan ΣM_V adalah jumlah momen vertikal (t.m) dan ΣM_H adalah jumlah momen horizontal (t.m).

Tabel 4. Kriteria stabilitas terhadap guling

Kondisi beban	Faktor keamanan
Biasa	1,5
Luar Biasa	1,15
Ekstrem	1,15

Sumber: R. S Varshney, 2014

b. Stabilitas Terhadap Geser

Stabilitas terhadap geser didasarkan pada nilai *safety factor* (faktor keamanan) sebagai upaya perlawanan bangunan terhadap geser. Analisis ini hanya mempertimbangkan gaya-gaya, tanpa memperhitungkan keseimbangan momen.

Gaya-gaya yang diasumsikan bekerja secara horizontal. Pola keruntuhan terjadi sepanjang bidang keruntuhan jika gaya geser yang bekerja (τ) melebihi gaya geser perlawanan (τ_f) [18]. Faktor keamanan terhadap geser dapat dihitung menggunakan persamaan 8.

$$FK_{\text{geser}} = \frac{(\Sigma V) + \tan(\phi) + L' \times c}{(\Sigma H)} \quad (8)$$

dengan FK_{geser} adalah faktor keamanan geser ΣV adalah jumlah gaya vertikal (t), ΣH adalah jumlah gaya horizontal (t.m), c adalah kohesi (t/m^2), dan L' adalah panjang efektif dasar pondasi (m).

c. Stabilitas Terhadap Daya Dukung Tanah

Daya dukung tanah merupakan kemampuan tanah dalam mendukung beban pondasi serta menahan beban konstruksi yang ada di atasnya. Perhitungan tegangan pada sebuah bendungan

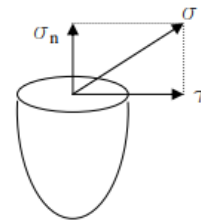
nilainya harus kurang dari atau sama dengan daya dukung tanah izin [19]. Tegangan dapat dihitung menggunakan persamaan 9.

$$\sigma_{\max/\min} = \frac{\Sigma V}{B} \left[1 \pm \frac{6e}{B} \right] \quad (9)$$

dengan $\sigma_{\max/\min}$ adalah tegangan (t/m^2), B adalah lebar pondasi (m), dan e adalah eksentrisitas (m).

Analisis Tegangan Bendungan RCC

Tegangan adalah seberapa kuat gaya yang diterapkan pada struktur sebagai respons terhadap deformasi yang disebabkan oleh beban luar. Tegangan atau yang sering disebut sebagai *stress* merupakan ukuran intensitas gaya atau reaksi yang terjadi per satuan luas. Tegangan ini terbagi menjadi dua jenis, yaitu *true stress* dan *engineering stress*. Satuan pengukuran untuk tegangan adalah N/mm^2 atau megapascal (MPa). Gaya tersebut dapat dibagi menjadi dua komponen: satu tegak lurus dan yang lain sejajar dengan area yang dianalisis. Penguraian tegangan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Komponen tegangan

Analisis tegangan pada bendungan beton gravitasi dapat dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu metode simplifikasi dan metode elemen hingga, tergantung pada tingkat ketelitian yang dibutuhkan dan karakteristik bendungan yang didesain.

Engineering Properties

1) Berat Jenis

Berat satuan RCC umumnya sama dengan, atau sedikit lebih tinggi (sekitar 1-3%) dari beton konvensional. Massa jenis dilambangkan dengan simbol ρ (rho) dan secara matematis dihitung dengan persamaan 10:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (10)$$

2) Modulus elastisitas

Dalam perancangan bendungan, modulus elastisitas yang rendah diinginkan untuk mengurangi risiko retak pada tingkat tegangan tertentu, namun hal ini juga akan menyebabkan

deformasi yang lebih besar.

Modulus elastisitas beton dapat dihitung menggunakan persamaan 11.

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (11)$$

dengan E_c adalah modulus Elastis (MPa), dan f'_c adalah mutu beton (MPa).

3) Tegangan Tekan

Tegangan tekan maksimum yang diizinkan untuk beton dalam bendungan gravitasi tidak boleh lebih besar dari kuat tekan yang ditentukan dibagi dengan faktor keamanan 3.0 [20]. Maka, tegangan tekan izin dapat dihitung sebagai berikut:

$$f'_{cr} = 0.3 f'_c \quad (12)$$

4) Poisson Ratio

Modulus elastisitas dan poisson ratio adalah sifat elastis dari beton. Nilai ini dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kekuatan, usia, volume pasta, dan jenis agregat (ICOLD, 2003). Nilai poisson ratio beton RCC mirip dengan beton konvensional dan nilainya bervariasi dari 0,2 hingga 0,3.

Metode Elemen Hingga

Turner et al, merupakan orang yang pertama kali memperkenalkan Metode Elemen Hingga. MEH adalah langkah numerik yang digunakan untuk memecahkan masalah di bidang teknik. Pendekatan ini memungkinkan perhitungan distribusi beban seperti deformasi dan tegangan pada setiap elemen [21].

Abaqus adalah rangkaian program simulasi teknik yang kuat, didasarkan metode elemen hingga yang dapat menyelesaikan masalah mulai dari analisis yang cukup sederhana hingga simulasi yang paling kompleks. Metode elemen hingga menggunakan software Abaqus Learning Edition 2023 ini digunakan untuk mengetahui nilai dan distribusi tegangan pada tubuh bendungan. Langkah awal dari metode ini adalah menggambarkan struktur sebagai susunan dari bagian-bagian yang lebih kecil dan sederhana, yang disebut sebagai elemen hingga. Setiap elemen terhubung melalui titik nodal, titik pertemuan antara elemen-elemen tersebut dikenal sebagai meshing. Meshing adalah proses diskritisasi dari model struktur kontinu menjadi bagian-bagian yang terpisah, sehingga model yang awalnya kontinu menjadi model yang diskrit. Model diskrit ini disebut sebagai model elemen hingga.

Pemodelan menggunakan abaqus dapat dilakukan secara cepat dan mudah dengan membuat

atau mengimpor geometri struktur yang akan dianalisis dan menguraikan geometri menjadi wilayah yang dapat di mesh. Fisik dan material dapat diberikan pada geometri, bersama dengan beban dan kondisi batas. abaqus menawarkan opsi untuk menyatukan geometri dan memverifikasi hasil yang diperoleh model analisis. Setelah model selesai, abaqus dapat mengirimkan, memantau, dan mengontrol pekerjaan analisis. Rumus yang digunakan pada *software* adalah:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (13)$$

dengan σ adalah tegangan yang terjadi (N/m^2), P adalah beban yang diterima (N), dan A adalah luas tampang (m^2).

Analisis abaqus yang lengkap biasanya terdiri dari tiga tahap, antara lain:

- *Pre-processing*
Pada tahap ini, harus mendefinisikan model masalah fisik dan membuat file input abaqus.
- *Simulation*
Simulasi atau yang biasanya dijalankan sebagai proses latar belakang, adalah tahap di mana Abaqus/Standard atau Abaqus/Eksplisit memecahkan masalah numerik yang didefinisikan dalam model.
- *Post-processing*
Mengevaluasi hasilnya setelah simulasi selesai. Evaluasi biasanya dilakukan secara interaktif menggunakan modul visualisasi Abaqus/CAE.

Pengumpulan Data

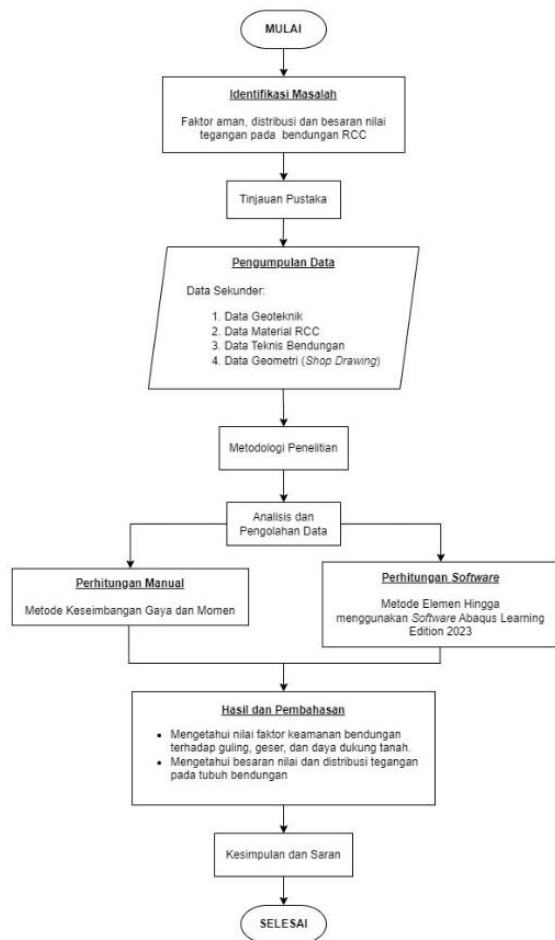
Data yang digunakan adalah data sekunder yang diperoleh dari kontraktor pelaksana Bendungan Cibeet Paket II yaitu PP-Marfri-DMT KSO atas izin dari pemilik proyek yaitu Balai Besar Wilayah Sungai Citarum. Data sekunder yang diperoleh meliputi:

1. Laporan Spesifikasi Teknis
Laporan ini merinci berbagai aspek teknis yang berkaitan dengan desain, konstruksi, dan operasional Bendungan Cibeet.
2. Gambar kerja (Shop Drawing)
Dokumen shop drawing memuat gambar kerja yang didesain oleh kontraktor.
3. Laporan Geologi Teknik
Dokumen ini menyediakan informasi rinci tentang kondisi geologi lokasi pembangunan Bendungan Cibeet yang akan digunakan untuk perencanaan dan pelaksanaan proyek.

Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian pada **Gambar 5** merupakan diagram yang menjelaskan secara garis

besar alur berjalannya penelitian yang akan dilakukan.



Gambar 5. Bagan alir penelitian

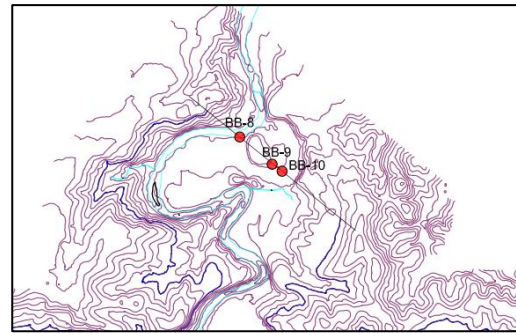
3. HASIL PEMBAHASAN

Sebuah struktur dianggap stabil apabila mampu menahan semua beban yang dikenakan padanya, baik yang berasal dari luar maupun karena berat sendiri struktur tersebut. Dalam konteks bendungan, untuk menentukan kuat tekan atau tarik dari bendungan tersebut, diperlukan analisis terhadap gaya dan arah gaya yang bekerja melalui perhitungan dan perancangan desain.

Parameter Stabilitas

1) Daya Dukung Tanah

Pada Bendungan Cibeet, data yang diperoleh mencakup daya dukung tanah maksimum atau q_{max} sebesar 856,7113 t/m² yang diambil dari hasil pengujian *Triaxial Compression Test* (UU) pada sampel di titik BB-10 yaitu berlokasi di As Bendungan. Perhitungan daya dukung (q_{ult}) sebagai berikut:



Gambar 6. Peta lokasi bor

$$\begin{aligned} q_{max} &= 856,7113 \text{ t/m}^2 \\ q_{ult} &= 0,3 \cdot q_{max} \\ &= 0,3 \cdot 856,7113 \\ &= 257,013 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

2) Koefisien Gempa

Koefisien gempa dihitung berdasarkan data dari Peta Gempa Indonesia tahun 2017, dengan mempertimbangkan periode berulang gempa dan lokasi bangunan. Selanjutnya, kelas risiko bendungan ditentukan sebagai berikut:

Tabel 5. Penentuan faktor risiko gempa

Parameter	Jumlah	Bobot	Tingkat
Kapasitas (10^6 m^3), FR_k	97,53	4	Tinggi
Tinggi (m), FR_t	38	4	Tinggi
Kebutuhan evakuasi (jumlah orang) (FR_e)	>1000	12	Ekstrim
kerusakan hilir (FR_h)	Sangat Tinggi	12	Ekstrim

Berdasarkan Tabel 5, dengan menggunakan persamaan 6 maka FR_{Tot} diperoleh sebesar 32. Sehingga dapat disimpulkan bahwa Bendungan Cibeet diklasifikasikan sebagai kelas risiko IV (Ekstrim). Penentuan koefisien gempa dilakukan dengan menggunakan periode ulang 200 tahun (setara dengan probabilitas kejadian sebesar 5% dalam rentang 10 tahun) dan periode ulang 10.000 tahun untuk MCE. Perhitungan nilai koefisien gempa dilakukan dengan menetapkan nilai percepatan gempa dasar berdasarkan lokasi Bendungan Cibeet. Koordinat geografis Bendungan Cibeet adalah 106°51'36" - 107°51' BT dan 7°19' - 6°24' LS. Dengan demikian, berdasarkan Peta Gempa Indonesia Tahun 2017 didapatkan nilai percepatan gempa yaitu:

- OBE (Kala ulang 200 tahun) : 0,2 g
- MCE (Kala ulang 10000 tahun) : 0,57 g

3) Koefisien Tanah

Koefisien tanah dihitung pada tekanan tanah aktif dan tekanan tanah pasif, dengan menggunakan persamaan 3 maka diperoleh:

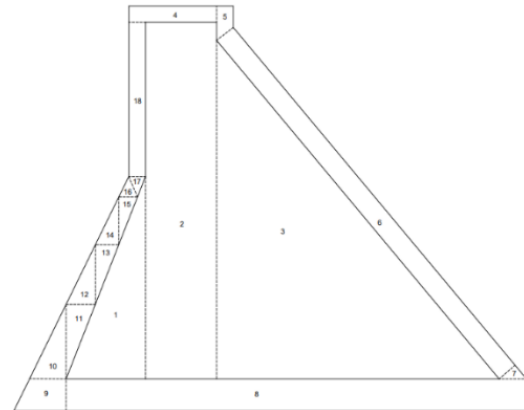
$K_a = 0,201$

$K_p = 4,974$

Gaya-Gaya yang Bekerja pada Bendungan

1) Gaya Berat

Perhitungan gaya berat dilakukan dengan membagi tubuh bendungan menjadi 18 pias, sehingga dapat mempermudah perhitungan. Untuk beton RCC nilai $\gamma = 2,36 \text{ t/m}^3$ adalah dan untuk beton konvensional nilai $\gamma = 2,4 \text{ t/m}^3$.



Gambar 7. Pembagian pias bendungan

Tabel 6. Gaya berat pada bendungan

Notasi	Dimensi (m)			Rasio	Luas (m ²)	$\gamma \text{ (t/m}^3\text{)}$	Gaya V (t)	Lengan x (m)	Momen V (t.m)
	a	b	c						
W1	7,6		19	0,5	72,200	2,36	170,392	39,003	6645,850
W2	6,8		33,5	1	227,800	2,36	537,608	33,070	17778,697
W3	27,04		31,8	0,5	429,936	2,36	1014,649	20,670	20972,794
W4	8,4		1,5	1	12,600	2,4	30,240	33,870	1024,229
W5	3,2	2	1,6	0,5	4,160	2,4	9,984	29,230	291,832
W6	41,7		2	1	83,400	2,4	200,160	15,370	3076,459
W7	1,7		2	0,5	1,700	2,4	4,080	1,750	7,140
W8	44,07		3	1	132,210	2,4	317,304	22,035	6991,794
W9	5	3,48	3	0,5	12,720	2,4	30,528	45,737	1396,250
W10	3,48		7	0,5	12,180	2,4	29,232	45,220	1321,871
W11	2,8		7	0,5	9,800	2,4	23,520	43,127	1014,340
W12	2,8		5,6	0,5	7,840	2,4	18,816	42,193	793,911
W13	2,24		5,6	0,5	6,272	2,4	15,053	40,513	609,840
W14	2,24		4,48	0,5	5,018	2,4	12,042	39,767	478,884
W15	1,8		4,48	0,5	4,032	2,4	9,677	38,500	372,557
W16	1,8		1,92	0,5	1,728	2,4	4,147	38,500	159,667
W17	1,6		1,92	0,5	1,536	2,4	3,686	37,587	138,560
W18	1,6		14,5	1	23,200	2,4	55,680	37,320	2077,978

Sumber : Hasil analisis, 2024

2) Tekanan Hidrostatik

Tekanan hidrostatik yang diperhitungkan adalah kondisi muka air normal (elevasi +80), kondisi Q_{1000} (elevasi +83,40), dan kondisi Q_{PMF} (elevasi +85,20). Rekapitulasi perhitungan tekanan hidrostatik ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Perhitungan tekanan hidrostatik

Kondisi	Gaya (t)	Momen (t.m)
MAN	512	5461,504
Q_{1000}	626,58	7393,644
Q_{PMF}	691,92	8579,808

3) Tekanan Hidrodinamis

Hasil perhitungan tekanan hidrodinamis dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Perhitungan tekanan hidrodinamis

Kondisi	Pe	Momen (t.m)
OBE	109,283	1165,722
MCE	244,525	2608,348

4) Tekanan Tanah

Tabel 9 merupakan hasil perhitungan tekanan tanah menggunakan persamaan 4.

Tabel 9. Tekanan tanah lateral

Tekanan Tanah	Koefisien	h (m)	Momen (t.m)
K_a	0,201	5	54,856
K_p	4,974	6	2814,89

5) Tekanan Lumpur/Sedimen

Dengan menggunakan persamaan 5, hasil perhitungan tekanan lumpur/sedimen dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Perhitungan tekanan lumpur/sedimen

Kondisi	Ps (t)	Momen (t.m)
MAN	73,277	1025,878
Q_{1000}	92,894	1405,765
Q_{PMF}	104,869	1639,709

6) Tekanan *Uplift* (Gaya angkat)

Diketahui:

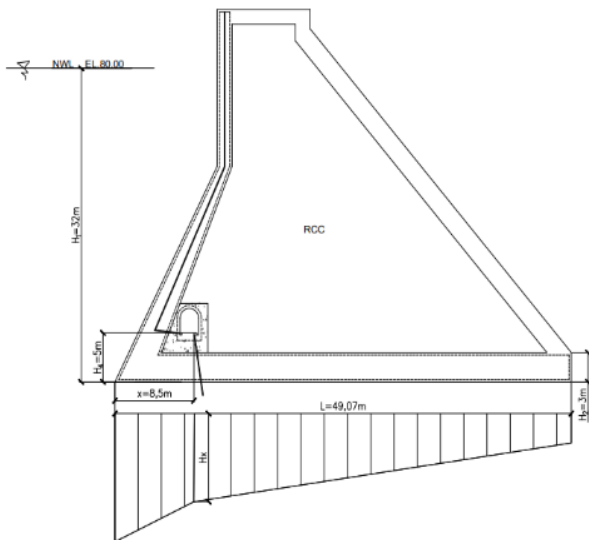
- B = 49,07 m
 - Letak galeri (sumbu x) = 8,5 m
 - Letak galeri berdasarkan panjang pondasi
- $$= \frac{8,5}{49,07} = 0,173 \times b$$

Tabel 11. Reduksi gaya uplift

Letak galeri (Horizontal)	Persentase nilai reduksi (%)
1,00 x b	100
0,75 x b	21
0,50 x b	35
0,25 x b	39
0,10 x b	42

Sumber: R.S Varshney, 2014

Berdasarkan nilai $0,173 \times b$, kemudian dilakukan interpolasi dari **Tabel 11**. Karena $H_4 > H_2$, yaitu $5\text{m} > 3\text{m}$, maka diperoleh nilai $H_x = 18,277\text{ m}$.



Gambar 8. Tekanan Uplift

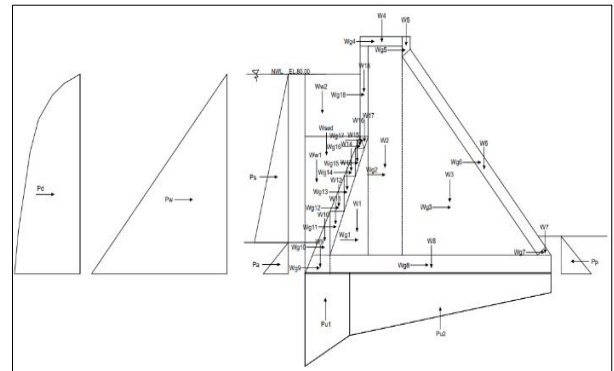
Tabel 13. Perhitungan Gaya Uplift

Gaya Uplift	V (t)	Jarak (m)
Pu1	33,639(-)	44,757
Pu2	431,498(-)	14,661

Analisis Stabilitas Bendungan

Berikut merupakan Analisis Stabilitas terhadap guling, geser, dan daya dukung tanah pada kondisi V, yaitu pembebanan luar biasa ketika muka air waduk normal (elevasi +80) dengan gempa dasar operasi (OBE). Perhitungan pada kondisi V ini akan mewakili perhitungan pada kondisi lain.

Parameter stabilitas dapat dilihat pada **Tabel 13**, gaya-gaya yang bekerja ditunjukkan pada **Gambar 9** dan penggambaran letak resultan serta diagram tegangan ditunjukkan pada **Gambar 10**.

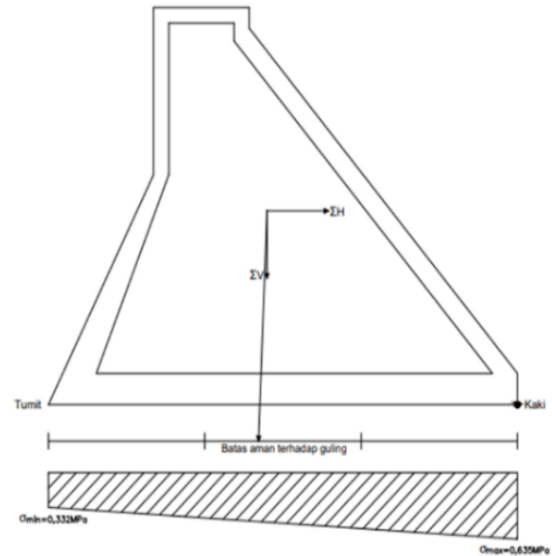


Gambar 9. Gaya-gaya pada kondisi V – pembebanan luar biasa

Tabel 12. Analisis Stabilitas Kondisi V

Notasi	A (m ²)	γ (t/m ³)	Gaya V (t)	Gaya H (t)	Lengan x (m)	Lengan y (m)	Momen V (t.m)	Momen H (t.m)
W	1048,332		2486,798				65152,652	
Wg	1048,332			-209,666				-3886,306
Pw	512	1		-512		10,667		-5461,333
Pa	2,633	2,62		-32,9138		1,67		-54,966
Pp	78,191	2,62		1407,44		2		2814,886
Ps				-73,277		14		-1025,878
Ww1	121		121		45,393		5492,553	
Ww2	110		110		43,52		4787,200	
Wsed	121		121		45,393		5492,553	
Pu1			-33,6385		44,577		-1499,503	
Pu2			-431,498		14,661		-6326,192	
Pd		1		-109,283		10,667		-1165,722
JUMLAH			2373,662	470,303			73099,262	8779,319

- 1) Stabilitas Terhadap Guling
Stabilitas terhadap guling dihitung menggunakan persamaan 7. Syarat terhadap guling $FK_{guling} > 1,15$ (*Design Standards No. 14: Appurtenant Structures for Dams – Spillways and Outlet Works 2022, Page 4-145*, diperoleh nilai FK_{guling} 8,326 $> 1,15$ (**AMAN**))
- 2) Stabilitas Terhadap Geser
Stabilitas terhadap guling dihitung menggunakan persamaan 8. Syarat terhadap geser $FK_{geser} > 1,7$ (*Pedoman Analisis Dinamik Bendungan Beton Gaya Berat Tahun 2009, hal. 62*), diperoleh nilai FK_{guling} 17,998 $> 1,7$ (**AMAN**).
- 3) Stabilitas Terhadap Daya Dukung
Stabilitas terhadap daya dukung tanah dihitung menggunakan persamaan 9. Syarat dari daya dukung tanah yaitu memiliki nilai kurang dari tegangan izin yaitu 257,013 t/m², σ_{min} hasil perhitungan yaitu 33,217 t/m² dan σ_{max} 63,527 t/m². Dengan nilai tersebut maka dapat disimpulkan bahwa tegangan yang terjadi pada tanah tidak melebihi dari tegangan izin tanah, maka bendungan aman terhadap daya dukung tanah.



Gambar 10. Letak resultan dan diagram tegangan kondisi V

Tabel 14. Rekapitulasi Analisis Stabilitas

Kondisi	Tinjauan Keamanan										
	Guling				Geser			Daya Dukung (MPa)			
	FK _{hitung}	FK _{izin}	LR (m)	Ket.	FK _{hitung}	FK _{izin}	Ket.	σ_{min}	σ_{max}	σ_{izin}	Ket.
Kondisi I	23,606	1,15	25,090	AMAN	6,633	1,7	AMAN	0,472	0,541	2,57	AMAN
Kondisi II	19,612	1,5	29,226	AMAN	10,024	2	AMAN	0,206	0,761	2,57	AMAN
Kondisi III	12,373	1,15	28,488	AMAN	12,436	1,7	AMAN	0,254	0,729	2,57	AMAN
Kondisi IV	57,842	1,15	25,746	AMAN	7,680	1,3	AMAN	0,432	0,582	3,42	AMAN
Kondisi V	8,326	1,15	27,097	AMAN	17,998	1,7	AMAN	0,332	0,635	2,57	AMAN
Kondisi VI	4,198	1,15	23,461	AMAN	35,01	1,3	AMAN	0,420	0,547	3,42	AMAN
Kondisi VII	10,133	1,15	28,027	AMAN	14,331	1,3	AMAN	0,284	0,707	3,42	AMAN

Berdasarkan hasil perhitungan stabilitas tubuh bendungan dengan cara manual menggunakan metode keseimbangan batas yang ditinjau terhadap bahaya guling, geser, dan daya dukung tanah menunjukkan bahwa:

Nilai faktor keamanan bendungan terhadap potensi guling terjadi pada kondisi IV yaitu 57,842, dimana pada kondisi IV ini nilai faktor keamanan dihitung pada kondisi selesai konstruksi dengan gempa dasar operasi. Hal ini disebabkan karena terdapat gaya akibat gempa dasar operasi yang bekerja sebagai momen guling (momen negatif) secara horizontal, sehingga momen horizontal yang bekerja akan dikurangi oleh momen akibat gaya gempa dasar operasi tersebut mengakibatkan momen

horizontal sebagai penyebut akan berkurang dan besaran nilai faktor keamanan akan semakin besar. Konstruksi bendungan beton dapat terguling apabila nilai penjumlahan momen vertikal (ΣM_V) lebih besar dari nilai penjumlahan momen horizontal (ΣM_H). Nilai FK_{guling} paling kecil terjadi pada kondisi VI, yaitu kondisi dimana elevasi air waduk Q_{1000} berada pada elevasi +83,40 dengan tambahan gempa maksimum boleh jadi sebesar 4,198 yang masih di atas FK_{izin} yaitu 1,15.

Bergesernya bangunan juga dipengaruhi oleh gaya-gaya yang sama dengan gaya-gaya yang mempengaruhi stabilitas terhadap guling. Namun terdapat parameter lain yang berpengaruh dalam stabilitas terhadap geser ini, yaitu nilai sudut geser

dalam (ϕ), kohesi (c), dan lebar bendungan (L). Nilai FK_{geser} sangat bergantung pada penjumlahan momen horizontal, dibuktikan dengan besaran nilai FK_{geser} pada kondisi II yaitu 10,024 yang lebih kecil daripada kondisi III yaitu 12,436. Perbedaan gaya yang bekerja pada kedua kondisi ini terletak pada kondisi muka air waduk. Dimana pada kondisi II air waduk berada pada elevasi normal yaitu elevasi +80, sedangkan pada kondisi III air waduk berada pada elevasi Q_{1000} yaitu elevasi +83,40. Gaya tekanan air yang bekerja secara horizontal sebagai momen negatif mengakibatkan perbedaan pada kedua kondisi ini, hal tersebut tentu saja berpengaruh terhadap penjumlahan nilai gaya horizontal yang lebih kecil pada kondisi II.

Penurunan pondasi bendungan dipengaruhi oleh tinjauan stabilitas terhadap daya dukung tanah, daya dukung tanah ini dipengaruhi oleh hasil pengujian tanah di lokasi As bendungan, lebar bendungan (B), eksentrisitas (e), dan gaya vertikal (V) yang bekerja terhadap tubuh bendungan. Tegangan tanah izin berdasarkan hasil pengujian di lokasi As Bendungan Cibeet adalah 2,57 MPa. Berdasarkan hasil analisis perhitungan yang telah dilakukan, maka didapatkan nilai tegangan maksimum paling besar terjadi pada kondisi II. Kontrol stabilitas terhadap daya dukung tanah ini dilihat dari nilai tegangan maksimum yang terjadi tidak boleh melebihi nilai tegangan izin dari tanah di lokasi tubuh bendungan.

Analisis Tegangan Bendungan

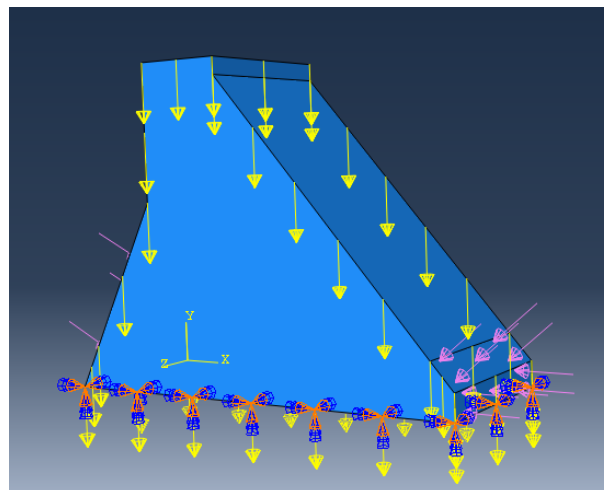
Material yang digunakan dalam bendungan beton antara lain adalah K-175, maka mutu beton K-175 adalah sebesar 14,53 MPa. Nilai poisson ratio beton RCC mirip dengan beton konvensional dan nilainya 0,2. Tegangan tekan dihitung menggunakan persamaan 12, sehingga $f'_{cr} = 4,359$ MPa.

Dikarenakan *software* tidak menggunakan *unit system* maka dalam pemodelan menggunakan *physical constants unit*, dalam Tabel 15.

Tabel 15. *Consistant Unit*

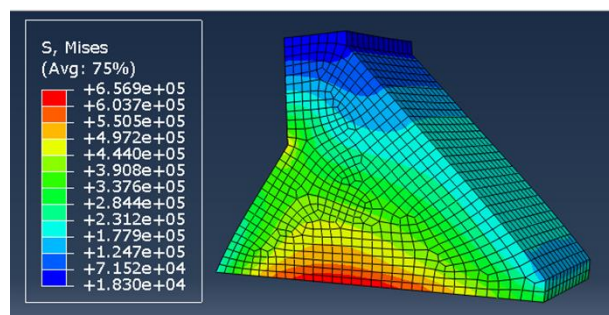
Quantity	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	tonne (10^3 kg)	slug	lbf s ² /in
Time	s	s	s	s
Stress	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
Energy	J	mJ (10^{-3} J)	ft lbf	in lbf
Density	kg/m ³	tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

Sumber : Dassault Systèmes Simulia, 2008



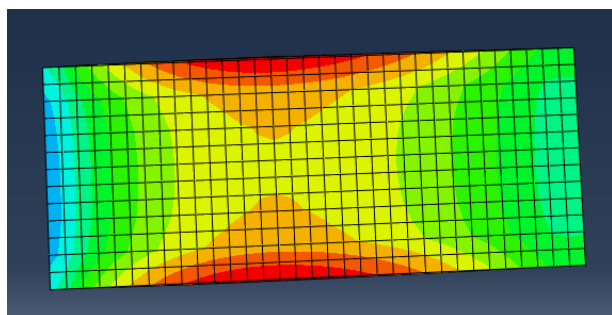
Gambar 11. Kondisi pembebanan

Hasil analisis yaitu tegangan tekan pada output aplikasi abaqus dengan kondisi pembebanan ekstrim seperti pada Gambar 11. Untuk hasil analisis pembebanan menggunakan *software* abaqus pada kondisi VII, yaitu pembebanan ekstrim – muka air waduk Q_{PMF} (Elevasi +85.20) pada tubuh bendungan menghasilkan tegangan maksimum dengan metode Von Mises sebesar 0,657 MPa. Besaran nilai tegangan dan distribusi tegangan ditunjukkan dengan kontur warna seperti pada Gambar 12.

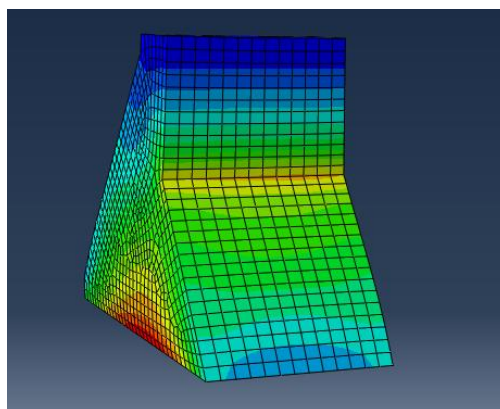


Gambar 12. Output Abaqus kondisi VII

Gambar 13 menunjukkan bagian bawah pada potongan mengalami tekanan yang paling besar, lalu pada bagian belakang potongan tersebut memiliki warna dominan hijau dan terdapat sedikit warna merah yang menunjukkan tegangan akibat gaya yang disebabkan oleh tekanan tanah aktif, air, dan sedimen. Distribusi tegangan bagian belakang tubuh bendungan dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 13. Distribusi tegangan bagian bawah



Gambar 14. Distribusi tegangan bagian belakang

Tabel 16. Rekapitulasi analisis tegangan

No	Kondisi	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	σ_{izin} (MPa)	Ket.
1	Kondisi I: Pembebanan Luar Biasa-Konstruksi	0,643	0,0126	4,359	AMAN
2	Kondisi II: Pembebanan Biasa-Elevasi Waduk Normal	0,648	0,0173	4,359	AMAN
3	Kondisi III: Pembebanan Luar Biasa-Elevasi Waduk Q_{1000}	0,655	0,0180	4,359	AMAN
4	Kondisi IV: Pembebanan Ekstrim-Konstruksi dengan Gempa Dasar Operasi (OBE)	0,641	0,0129	4,359	AMAN
5	Kondisi V: Pembebanan Luar Biasa-Elevasi Waduk Normal (Elevasi +80 m) dengan Gempa Dasar Operasi (OBE)	0,653	0,0182	4,359	AMAN
6	Kondisi VI: Pembebanan Ekstrim-Elevasi Waduk Normal (Elevasi +80 m) dengan Gempa Maksimum (MCE)	0,718	0,0199	4,359	AMAN
7	Kondisi VII: Pembebanan Ekstrim-Elevasi Waduk Banjir Maksimum Q_{PMF}	0,657	0,0183	4,359	AMAN

Momen vertikal didapatkan dari momen berat sendiri (W), momen berat air (W_w), momen berat sedimen (W_{sd}), dan momen tekanan uplift (P_u) dari dasar bendungan. Sedangkan momen horizontal merupakan penjumlahan momen tekanan air (P_w), momen tekanan sedimen (P_s), momen tekanan hidrodinamis (P_d) yang bekerja di hulu bendungan, momen akibat gempa (W_g), dan momen akibat tekanan tanah pasif (P_p) yang bekerja di hilir bendungan. Analisis tegangan tekan menggunakan software Abaqus pada penelitian ini yang dilakukan untuk menentukan apakah beton dan geometri bendungan mampu menahan tegangan tekan yang disebabkan oleh tekanan air, tekanan tanah, gempa bumi, dan beban lainnya. Untuk memastikan bendungan tidak akan retak atau runtuh. Berdasarkan hasil pemodelan menggunakan bantuan software Abaqus menunjukan bendungan aman dalam 7 kondisi yang dianalisis. Dibuktikan dengan nilai tegangan maksimum yang terjadi pada kondisi VI sebesar 0,707 yang lebih kecil dari tegangan izin yaitu 4,359 MPa dengan mutu beton yang digunakan adalah $f_c' 14,53$ MPa. Semakin besar gaya yang bekerja pada tubuh bendungan, maka tegangan yang terjadi semakin besar.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan, maka dapat disimpulkan beberapa hal. Nilai faktor keamanan terhadap guling bendungan cibeet pada kondisi I yaitu 23,606, kondisi II = 19,606, kondisi III = 12,373, kondisi IV = 57,842, kondisi V = 8,326, kondisi VI = 4,198, dan kondisi VII = 10,133. FK_{guling} hasil perhitungan pada semua kondisi tersebut lebih besar dari FK_{guling} yang diizinkan yaitu 1,15 pada kondisi I, III, IV, V, VI dan 1,5 pada kondisi II. Dengan letak resultan yang berada pada batas aman terhadap guling yaitu pertengahan 1/3 dasar pondasi pada kondisi biasa dan luar biasa, serta di dasar pondasi pada kondisi ekstrim, maka Bendungan Cibeet dapat dikatakan aman dari bahaya guling baik pada kondisi selesai konstruksi maupun saat muka air banjir paling maksimum.

Nilai faktor keamanan terhadap geser Bendungan Cibeet pada kondisi I yaitu 6,633 > 1,7, kondisi II = 10,024 > 2, kondisi III = 12,436 > 1,7, Kondisi IV = 7,680 > 1,3, kondisi V = 17,998 > 1,7, Kondisi VI = 35,01 > 1,3, dan kondisi VII = 14,331 > 1,3. Nilai FK_{geser} hasil perhitungan pada semua kondisi tersebut, maka Bendungan Cibeet dapat

dikatakan aman dari bahaya geser baik pada kondisi selesai konstruksi maupun saat muka air banjir paling maksimum.

Tinjauan bendungan terhadap daya dukung tanah mendapatkan hasil pada kondisi I $\sigma_{\min} = 0,472$ MPa > 0 dan $\sigma_{\max} = 0,541$ MPa $> 2,57$ MPa, kondisi II $\sigma_{\min} = 0,206$ MPa > 0 dan $\sigma_{\max} = 0,761$ MPa $> 2,57$ MPa, kondisi III $\sigma_{\min} = 0,254$ MPa > 0 dan $\sigma_{\max} = 0,729$ MPa $> 2,57$ MPa, kondisi IV $\sigma_{\min} = 0,432$ MPa > 0 dan $\sigma_{\max} = 0,582$ MPa $> 2,57$ MPa, kondisi V $\sigma_{\min} = 0,332$ MPa > 0 dan $\sigma_{\max} = 0,420$ MPa $> 2,57$ MPa, kondisi VI $\sigma_{\min} = 0,420$ MPa > 0 dan $\sigma_{\max} = 0,547$ MPa $> 2,57$ MPa, serta kondisi VII $\sigma_{\min} = 0,284$ MPa > 0 dan $\sigma_{\max} = 0,707$ MPa $> 2,57$ MPa. Dengan demikian Bendungan cibeet dapat dikatakan aman ditinjau dari daya dukung tanahnya baik pada kondisi selesai konstruksi maupun saat muka air banjir paling maksimum.

Untuk tegangan menggunakan metode Von mises yang dianalisis menggunakan software Abaqus pada STA 1+000 sampai STA 1+050 untuk pembebanan dengan 7 kondisi diperoleh tegangan paling maksimum terjadi pada kondisi VI yaitu 0,707 yang masih lebih kecil dari tegangan izin dari mutu beton yang digunakan yaitu 4,359 MPa. Distribusi tegangan yang ditunjukkan dengan kontur warna menunjukkan tegangan paling besar ditandai dengan warna merah terjadi pada bagian bawah bendungan. Hasil analisis tegangan yang dilakukan menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi pada tubuh Bendungan Cibeet dinyatakan aman.

Saran

Adapun saran pada penelitian ini yaitu perhitungan stabilitas dapat dilakukan dengan menggunakan *software* simulasi untuk mendapatkan perbandingan hasil antara keduanya. Pada penelitian selanjutnya, perlu dilakukan analisis terhadap rembesan. Tegangan yang dianalisis pada penelitian ini sebatas tegangan normal tekan, alangkah baiknya penelitian selanjutnya melakukan analisis tegangan normal tarik pada tubuh bendungan. Analisis stabilitas perlu dilakukan dengan menggunakan data pembacaan dari alat instrumentasi piezometer di lapangan jika bendungan telah selesai konstruksi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Krisdianto, 2021. *Analisis Stabilitas Pada Tubuh Bendungan Dengan Irisan Fellenius Dan Debit Rembesan Dengan Metode Casagrande Menggunakan Software Geostudio*.
- [2] Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2023. *Laporan Pendukung : LAPORAN SPESIFIKASI*.
- [3] Ir. Soedibyo, 2003. *Teknik Bendungan*, vol. 01.
- [4] M. Y. Firmansyah and F. P. Purwahono, 2023. *Analisa Stabilitas Bendung (Studi Kasus: Bendungan Pacal Kabupaten Bojonegoro)*. *J. Sains dan Teknol.*, vol. 2, no. 1, pp. 109–123, Available: <https://doi.org/10.58169/saintek.v2i1.140>
- [5] K. PUPR, 2011. *Pedoman Teknis Buku 1 Bendungan Beton Padat Gilas*.
- [6] S. Chonggang, 1991. *Roller compacted concrete dams in China*, vol. 43, no. 11.
- [7] R. Djajadi, H. Sugiharto, Hardianto Deddy, and H. James, 2003. *Roller Compacted Concrete (RCC) Untuk Bangunan Bendungan, Dimens. Tek. Sipil*, vol. 5, no. 2, pp. 82–86, [Online]. Available: <http://puslit.petra.ac.id/journals/civil/>
- [8] R. Julistian Lontoh, 2020. *Analisa Kestabilan Bendungan Lolak 1, J. Sipil Statik*, vol. 8, no. 2, pp. 221–236.
- [9] M. F. Bargess, C. Lesmana, and R. Y. Tallar, 2019. *Analisis Struktur Bendung dengan Metode Elemen Hingga, J. Tek. Sipil*, vol. 5, no. 1, pp. 1–21, doi: 10.28932/jts.v5i1.1309.
- [10] A. Y. Hidayatulloh, E. N. Cahya, and S. Marsudi, 2023. *Analisa Tegangan Pada Bendungan Cijurey Kabupaten Bogor, Jawa Barat, J. Teknol. dan Rekayasa Sumber Daya Air*, vol. 3, no. 2, pp. 125–136, doi: 10.21776/ub.jtresda.2023.003.02.011.
- [11] H. Konietzky, 2020. *Dam constructions*.
- [12] Nurnawaty, Suhardiman, and Ihwan, 2018. *Analisis Rembesan Pada Bendungan Tipe Urugan (Uji Simulasi Lab), Tek. Hidro*, vol. 11, no. 1, pp. 12–22, doi: 10.26618/th.v11i1.2436.
- [13] H. G. Alviano, R. Asmaranto, and A. P. Hendrawan, 2024. *Analisa Stabilitas Bendung Penggung Kecamatan Wonosegoro Stability Analysis of Penggung Weir Wonosegoro District Boyolali Regency*, vol. 04, no. 01, pp. 1129–1139.
- [14] Departemen Pekerjaan Umum, 2009. *Pedoman Analisis Dinamik Bendungan Beton Gaya Berat*.
- [15] T. P. Wibowo and T. E. Wulandari, 2023. *Analisis Stabilitas Struktur Retaining Wall Basement Terhadap Tekanan Tanah Dengan Aplikasi Plaxis 8.6, J. Ilm. Tek. Sipil dan Arsit.*, vol. 2, no. 1, pp. 14–22, doi: 10.31289/jitas.v2i1.1942.
- [16] R.S Varshney, 2014. *Appurtenant Structures for Dams (Spillways and Outlet Works) Design Standard*, no. 14.
- [17] M. R. Fazjrin, S. Marsudi, and V. Dermawan, 2022. *Studi Perencanaan Konstruksi*

Bendungan Cijurey Tipe Beton Padat Gilas Gravitasi Kecamatan Sukamakmur Kabupaten Bogor Jawa Barat, J. Teknol. dan Rekayasa Sumber Daya Air, vol. 2, no. 2, p. 116.

- [18] G. Pinandito and P. Harsanto, 2021. *Analisis Stabilitas Bendung Kamijoro*, *Bull. Civ. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 33–42, doi: 10.18196/bce.v1i1.11098.
- [19] J. D. Mandiangan, R. R. I. Legrans, and S. G. Rondonuwu, 2023. *Studi Stabilitas Dinding Penahan Tanah Tipe Kantilever Pada Oprit Jembatan (Studi Kasus: Jembatan Boulevard II)*, vol. 21, no. 85.
- [20] United States Department of Interior, 1977. *Design Criteria for Concrete Arch and Gravity Dams*.
- [21] Z. Zulvikar, A. Kadir, and S. Samhuddin, 2022. *Pengaruh Besar Sudut Kampuh V Terhadap Von Mises Stress Material Pada Proses Pengelasan Berbasis Metode Elemen Hingga, Enthalpy J. Ilm. Mhs. Tek. Mesin*, vol. 7, no. 4, p. 164, doi: 10.55679/enthalpy.v7i4.28357.