

ANALISIS ALTERNATIF PERENCANAAN STRUKTUR TEROWONGAN PENGELAK (*TUNNEL*) PADA BENDUNGAN BAGONG KABUPATEN TRENGGALEK

Shinta Nuriyah¹, Armin Naibaho², Bobby Asukmajaya R.³

Mahasiswa Manajemen Rekayasa Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang¹, Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang^{2,3}

nuriyahshinta001@gmail.com¹, ar_naibaho@yahoo.co.id², bobbyasukma@polinema.ac.id³

ABSTRAK

Sungai Bagong memiliki debit aliran yang besar pada musim hujan, dan menjadi sumber utama suplai air irigasi dan air bersih di daerah hulu dan hilir bendungan. Sehingga perlu direncanakan terowongan pengelak agar mempermudah pembangunan bendungan utama. Akan direncanakan terowongan berbentuk-B, dimana terowongan pengelak pada eksisting berbentuk tapal kuda. Dibutuhkan data hidrologi dan data geologi pada perencanaan terowongan pengelak. Kedua data tersebut digunakan untuk, 1) menentukan dimensi struktur terowongan pengelak, 2) menentukan beban yang diterima terowongan pengelak, 3) mendesain tulangan yang dibutuhkan pada terowongan pengelak, 4) mengetahui rencana anggaran biaya (RAB) struktur terowongan pengelak. Berdasarkan data penelusuran banjir diperoleh debit banjir sebesar 188.943 m³/detik. Sehingga didapatkan diameter terowongan pengelak yaitu 4,5 m. Beban-beban yang bekerja pada terowongan pengelak antara lain beban batuan horizontal kondisi normal (q_a) sebesar 2,493 t/m², beban batuan horizontal kondisi gempa (q_{ae}) sebesar 5,115 t/m², beban batuan vertikal (P_v) sebesar 7,4 t/m², beban air horizontal (P_{w1}) sebesar 1,0 t/m², beban air horizontal (P_{w2}) sebesar 5,3 t/m², beban air vertikal (P_{wv}) sebesar 9,5 t/m², beban uplift (P_u) sebesar 14,8 t/m², serta beban air dari dalam kondisi penuh (I_{wh}) sebesar 33 t/m. Berdasarkan hasil perhitungan analisis struktur diperoleh diameter tulangan arah sumbu X yaitu D22 - 100, dan diameter tulangan arah sumbu Y yaitu D16 - 100. Serta didapatkan (RAB) pada struktur terowongan pengelak sebesar Rp. 7.482.248.000,00,-.

Kata kunci : terowongan pengelak; bentuk-B; tapal kuda; analisis struktur; rencana anggaran biaya (RAB)

ABSTRACT

The Bagong River has a large flow discharge during the rainy season, and is the main supply of irrigation water and clean water in the upstream and downstream areas of the dam. So it is necessary to plan a diversion tunnel in order to facilitate the construction of the main dam. A B-shaped tunnel will be planned, where the existing diversion tunnel is horseshoe-shaped. Hydrological data and geological data are needed for planning the diversion tunnel. Both data are used to, 1) determine the dimensions of the diversion tunnel structure, 2) determine the load received by the diversion tunnel, 3) design the reinforcement needed in the diversion tunnel, 4) find out the cost budget plan (RAB) of the diversion tunnel structure. Based on flood tracking data, a flood discharge is 188,943 m³/second. So that the diameter of the diversion tunnel is 4.5 m. The loads received by the diversion tunnel are: normal condition horizontal rock load (q_a) of 2.493 t/m², earthquake condition horizontal rock load (q_{ae}) of 5.115 t/m², vertical rock load (P_v) of 7.4 t/m², horizontal water load (P_{w1}) of 1.0 t/m², horizontal water load (P_{w2}) of 5.3 t/m², vertical water load (P_{wv}) of 9.5 t/m², uplift load (P_u) of 14.8 t/m², and water load from full condition (I_{wh}) of 33 t/m.

Keywords : diversion tunnel; alternative; shape-B; modeling

1. PENDAHULUAN

Bendungan Bagong direncanakan terletak pada Sungai Bagong di Kabupaten Trenggalek. Sungai Bagong menyumbang debit banjir yang cukup besar sehingga sistem

pengendalian banjir daerah Ngrowo - Ngasinan - Parit Raya, belum dapat secara tuntas mengatasi banjir yang terjadi di Kota Trenggalek dan sekitarnya. Rencana pembangunan Bendungan Bagong diharapkan dapat mereduksi banjir Kota

Trenggalek secara signifikan. Selain itu Bendungan Bagong direncanakan untuk pengendalian air baku, Irigasi dan domestik, serta untuk konservasi sumber daya air dan sebagai tempat wisata/rekreasi.

Bendungan Bagong merupakan bendungan urugan dengan zona inti tegak. Pada perencanaannya bendungan ini memiliki bangunan pelengkap antara lain bangunan pelimpah (spillway), terowongan pengelak (tunnel), dan jalan akses. Pada pembangunan bendungan, struktur yang di dahulukan adalah terowongan pengelak (Tunnel). Terowongan pengelak bertujuan untuk mengalihkan aliran air sungai supaya memudahkan pelaksanaan konstruksi bendungan utama. Sehingga perlu dilakukan analisis struktur bangunan pengelak supaya dapat menahan beban yang bekerja. Tipe terowongan pengelak yang terdapat di eksisting berbentuk tapal kuda. Dalam penelitian kali ini akan dibuat alternatif terowongan pengelak jenis 'shape B'.

Salah satu aplikasi perangkat lunak yang biasa digunakan untuk menghitung struktur suatu bangunan adalah *Autodesk Robot Structural Analysis Professional* (RSAP). RSAP adalah perangkat lunak pemodelan struktural untuk menganalisis dan merancang bangunan. Perkembangan yang terkait dengan teknologi komputer memudahkan para insinyur/perencana bangunan teknis untuk merancang bangunan yang kuat dan ekonomis, karena banyak persyaratan dalam merancang bangunan tahan gempa, sehingga insinyur biasanya hanya memiliki waktu yang singkat sehingga diperlukan alat untuk merancang sebuah struktur bangunan tahan gempa.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui dimensi yang aman untuk struktur terowongan pengelak, mengetahui beban yang diterima oleh terowongan pengelak, mengetahui desain penulangan terowongan pengelak yang aman serta mengetahui perhitungan anggaran biaya (RAB) pada struktur terowongan pengelak.

2. METODE

Data Hidrologi

Data ini digunakan untuk perhitungan penelusuran debit banjir rencana dengan berbagai kala ulang tertentu yang menggunakan suatu metode. data yang diperlukan meliputi data debit yang masuk dalam saluran pelimpah selama 24 jam.

Data Geologi

Data ini digunakan untuk mengetahui letak tanah keras, serta jenis batuan yang akan digunakan untuk

mengetahui elevasi terowongan pengelak beserta γ_{batuan} untuk perhitungan pembebanan.

Analisis Hidrolika Terowongan Pengelak

Perhitungan hidrolika terowongan menggunakan dua kondisi yaitu aliran bebas dan tertekan:

1. Aliran bebas ($h < 1,2 d$):

$$R = \frac{A}{P} \quad (1)$$

$$Q = V \cdot A \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Keterangan:

Q = debit yang mengalir pada kedalaman tertentu (m³/detik)

R = jari-jari hidrolis = A/P (m)

A = luas penampang basah (m²)

P = keliling basah (m)

S = kemiringan terowongan

n = koefisien kekasaran Manning

V = kecepatan aliran (m/detik)

2. Aliran tertekan ($h > 1,5 d$):

$$V = \sqrt{\frac{2g \cdot (H_A + L \sin \phi - \frac{D}{2})}{\Sigma H_L}} \quad (4)$$

$$\Sigma H_L = h_e + h_b + h_f + h_r + h_p \quad (5)$$

Keterangan:

h_e = kehilangan akibat melewati pintu masuk

h_b = kehilangan akibat melewati belokan

h_f = kehilangan akibat gesekan dengan penampang

h_r = kehilangan kecepatan pada keluaran

h_p = kehilangan energi akibat perubahan penampang

Perhitungan Pembebanan

1. Pembebanan akibat batuan di atas terowongan

$$H_p = 0.3 (B + HT) \quad (6)$$

Keterangan:

H_p = head pressure (m)

B = lebar terowongan (m)

H_t = tinggi terowongan (m)

Sehingga dapat ditentukan besar tekanan batuan dengan rumus:

$$P_v = \gamma_{breksi} \cdot H_p \quad (7)$$

$$q_v = P_v \cdot 1m \quad (8)$$

Keterangan:

γ = unit weight of rock (t/m³)

q_v = beban merata persatuan meter (t/m)

2. Pembebanan tekanan air tanah di atas terowongan

$$P_{wv} = \gamma_w \cdot H_w \quad (9)$$

$$q_{wv} = P_{Wv} \cdot 1m \quad (10)$$

Keterangan:

P_{Wv} = tekanan air tanah (t/m^2)

γ_w = berat jenis air (t/m^3)

H_w = tinggi muka air (m)

q_{wv} = beban per satuan meter (m)

3. Beban sendiri

$$A_D = \frac{1}{4} \pi D^2 + (\gamma_{beton} \cdot D) \quad (11)$$

$$A_d = \frac{1}{4} \pi d^2 + (\gamma_{beton} \cdot d) \quad (12)$$

$$P = \frac{D-d}{B} \times \gamma_{beton}$$

(13)

Keterangan:

A_D = luas terowongan luar (m^2)

A_d = luas terowongan dalam (m^2)

P = berat sendiri terowongan (t/m^2)

D = diameter terowongan luar (m)

d = diameter terowongan dalam (m)

γ_{beton} = berat jenis beton (t/m^3)

B = lebar terowongan (m)

4. Tekanan air dalam terowongan kondisi air penuh

$$P = \gamma_w \text{ (elevasi surge tank - elevasi dasar tunnel)}$$

(14)

Keterangan:

P = Tekanan Water Hammer (t/m^2)

5. Tekanan upift

$$P_{Wv} = \gamma_w (H_w \cdot H_T)$$

(15)

$$q_{wv} = P_{Wv} \cdot 1m$$

(16)

Keterangan:

P_{Wv} = besar tekanan air tanah (t/m^2)

q = beban per satuan meter (m)

6. Tekanan batuan horizontal

Besar tekanan batuan horizontal kondisi gempa pada terowongan (P_a):

$$q_a = \gamma \cdot H \cdot K_a$$

(17)

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cdot \cos(\alpha + \delta) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi)}{\cos(\alpha + \delta) \cdot \cos \delta}} \right]^2}$$

(18)

Besar tekanan batuan horizontal kondisi gempa pada terowongan (P_{ae}):

$$q_{ae} = \gamma \cdot H \cdot K_{ae}$$

(19)

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\phi - \theta_0 - \theta)}{\cos \theta_0 \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos(\theta + \delta + \theta_0) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \theta_0 - \alpha)}{\cos(\theta + \delta + \theta_0) \cdot \cos(\alpha - \theta)}} \right]^2}$$

(20)

$$\theta_D = \arctan \left[\frac{kh}{1 - kv} \right]$$

(21)

$$K = Kh / (1 - Kv)$$

(22)

Keterangan:

q_a = beban batuan horizontal (t/m)

q_{ae} = beban batuan horizontal pada kondisi gempa (t/m)

Kh = koefisien gempa

γ_{sat} = berat jenis batuan saturated (t/m^3)

H_p = tinggi batuan (m)

ϕ = sudut geser dalam dari tanah timbunan ($^\circ$)

δ = sudut geser antara tanah dan permukaan dinding penahan

θ = sudut antara dinding penahan

7. Tekanan air tanah horizontal

$$P_{W1} = \gamma_w \cdot H_w \quad (23)$$

$$P_{W2} = \gamma_w \cdot (H_w + H_T) \quad (24)$$

Keterangan:

P_w = tekanan air eksternal (t/m^2)

Penulangan Terowongan

$$\rho_b = \frac{0,85 \beta_1 f_c'}{f_y} \cdot \frac{600}{600 + f_y} \quad (25)$$

$$e = \frac{Mu}{Pu} \quad (26)$$

$$m = \frac{fy}{0,85 \cdot fc} \quad (27)$$

$$c_b = \frac{600}{600 + f_y} d \quad (28)$$

$$a_b = \beta_1 \cdot c \quad (29)$$

$$f_s' = \epsilon_s \cdot E_s \cdot \frac{(c_b - d')}{d'} \quad (30)$$

Jika $f_s' < f_y$, maka digunakan f_s' jika $f_s' > f_y$, maka digunakan f_y

$$\phi P_{nb} = 0,65 \cdot (0,85 \cdot f_c' \cdot a_b \cdot b + A_s' \cdot f_s' - A_s \cdot f_y) \quad (31)$$

$$\phi P_n =$$

$$0,65 \cdot$$

$$0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot d \cdot \left[\left(\frac{h-2 \cdot e}{2d} \right) + \sqrt{\left(\frac{h-2 \cdot e}{2d} \right)^2 + 2 \cdot m \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{d'}{d} \right)} \right] \quad (32)$$

Keterangan:

- f_y = kuat leleh tulangan (MPa)
- f_c' = kuat tekan beton (MPa)
- f_s = kuat lentur tulangan (MPa)
- ρ = rasio tulangan yang direncanakan (mm^2)
- e = eksentrisitas (mm)

Berdasarkan SNI 2847:2019 luas tulangan longitudinal komponen struktur tekan non-komposit tidak boleh kurang 1% atau lebih dari 6% kali luas bruto penampang, maka:

$$A_{smax} = 0,75 \cdot \rho \cdot b \cdot d \quad (33)$$

$$A_{smin} = \frac{1,4}{f_y} \cdot b \cdot d \quad (34)$$

$$\rho = \frac{A_{stot}}{b \cdot h} \quad (35)$$

$$S_n = \frac{0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot b}{A_s} \quad (36)$$

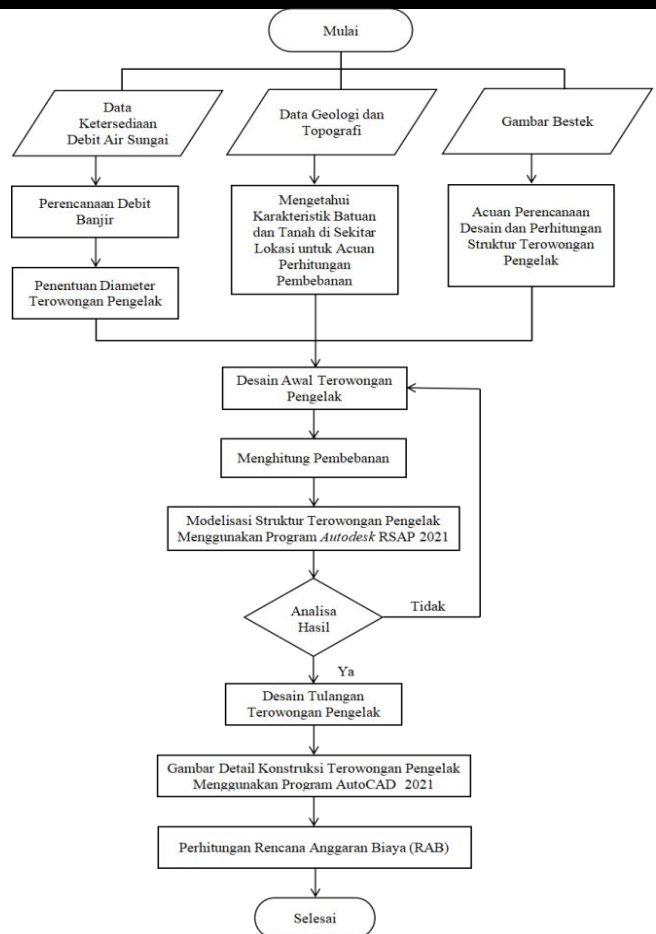
Keterangan:

- A_{sperlu} = luas total tulangan longitudinal non prategang (mm^2)
- ρ = rasio A_s terhadap $b \cdot d$
- b = lebar muka tekan komponen struktur (mm)
- D = diameter tulangan (mm)

Rencana Anggaran Biaya (RAB)

Anggaran biaya merupakan harga suatu proyek yang dihitung dengan teliti, cermat dan memenuhi syarat-syarat yang telah ditentukan (Ervianto, 2005).

Diagram allir perencanaan alternatif struktur terowongan pengelak.



Gambar 1 Flowchart Perencanaan

Sumber: Hasil Perhitungan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil perhitungan yang didapatkan dari eksisting, diperoleh Q_{25} Th (*Inflow*) sebesar $188.943 \text{ m}^3/\text{detik}$. Dari debit banjir ini akan dilakukan analisa hidriloka sebagai berikut:

1. Aliran Bebas:

$$A = r^2 \left[\left(\frac{\theta \cdot \pi}{180} \right) - (\sin \theta \cdot \cos \theta) \right] = 2,25^2 \left[\left(\frac{27 \cdot \pi}{180} \right) - (\sin 27,266 \cdot \cos 27,266) \right] = 0,348 \text{ m}^2$$

$$P = \left(\frac{2 \cdot \theta \cdot \pi \cdot r}{180} \right) = \left(\frac{2 \cdot 27,266 \cdot \pi \cdot 2,25}{180} \right) = 2,141 \text{ m}$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{0,348}{2,141} = 0,162 \text{ m}$$

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{0,014} \cdot 0,162^{\frac{2}{3}} \cdot 0,01332^{\frac{1}{2}} = 2,453 \text{ m/detik}$$

$$Q = A \cdot V = 0,348 \cdot 2,453 = 0,853 \text{ m}^3/\text{detik}$$

2. Aliran Tertekan:

$$\Sigma HL = h_e + h_b + h_f + h_r + h_p$$

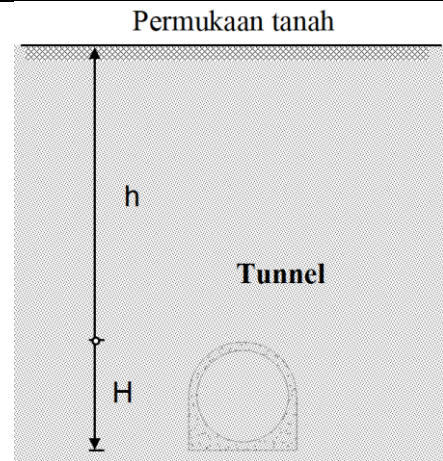
$$\Sigma HL = 0,08 + 0,071 + 0,0148 + 1 + 0 = 1,166$$

$$V = \sqrt{\frac{2g \cdot (H_A + L \sin \phi - \frac{D}{2})}{\Sigma H_L}}$$

$$V = \sqrt{\frac{(2 \cdot 9,81 \cdot (267,400 - 262,00 - (\frac{4,5}{2}) + 543,55 \cdot \sin 2,95))}{1,166}}$$

$$V = 42,400 \text{ m/detik}$$

$$Q = A \cdot V = 15,904 \cdot 42,400 = 674,343 \text{ m}^3/\text{detik}$$



Gambar 2 Ilustrasi Terowongan Pengelak
Sumber: Perhitungan

Dengan:

- Lebar terowongan: 5,3 m
- Tinggi terowongan: 5,3 m
- Jarak antara muka tanah dengan terowongan: 14,8 m

Tabel 1 Perhitungan Aliran Bebas saat Kondisi $h < 1,2$ d

ELV (m)	h (m)	θ (°)	sin θ	cos θ	B (m)	A (m ²)	P (m)	S	n	R (m)	V (m/det)	Q (m ³ /det)	Qc (m ³ /det)	F nilai	Keterangan
262,250	0,25	27,266	0,5	0,9	2,06	0,348	2,141	0,01332	0,014	0,162	2,453	0,853	0,253	3,370	Super-Kritis
262,500	0,50	38,942	0,629	0,778	2,83	0,966	3,059	0,01332	0,014	0,316	3,823	3,693	1,001	3,691	Super-Kritis
262,750	0,75	48,190	0,7	0,7	3,35	1,742	3,785	0,01332	0,014	0,460	4,915	8,563	2,226	3,847	Super-Kritis
263,000	1,00	56,251	0,831	0,6	3,74	2,632	4,418	0,01332	0,014	0,596	5,836	15,359	3,912	3,926	Super-Kritis
263,250	1,25	63,612	0,896	0,4	4,03	3,605	4,996	0,01332	0,014	0,722	6,632	23,908	6,043	3,957	Super-Kritis
263,500	1,50	70,529	0,943	0,3	4,24	4,641	5,539	0,01332	0,014	0,838	7,326	33,999	8,603	3,952	Super-Kritis
263,750	1,75	77,160	0,97	0,2	4,39	5,721	6,060	0,01332	0,014	0,944	7,933	45,383	11,579	3,920	Super-Kritis
264,000	2,00	83,621	0,994	0,1	4,47	6,829	6,568	0,01332	0,014	1,040	8,461	57,787	14,959	3,863	Super-Kritis
264,250	2,25	90,000	1	0	4,50	7,952	7,069	0,01332	0,014	1,125	8,917	70,910	18,737	3,785	Super-Kritis

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 2 Perhitungan Aliran Bebas saat Kondisi $h > 1,2$ d

ELV (m)	h (m)	θ (°)	sin θ	cos θ	B (m)	A (m ²)	P (m)	S	n	R (m)	V (m/det)	Q (m ³ /det)	Qc (m ³ /det)	F nilai	Keterangan
264,250	2,25	90,000	1,0	0,0	4,50	7,952	7,069	0,01332	0,014	1,125	8,917	70,910	18,737	3,785	Super-Kritis
264,500	2,50	83,621	1,0	0,1	4,47	9,075	7,570	0,01332	0,014	1,199	9,303	84,425	22,913	3,685	Super-Kritis
264,750	2,75	77,160	1,0	0,2	4,39	10,183	8,077	0,01332	0,014	1,261	9,621	97,975	27,499	3,563	Super-Kritis
265,000	3,00	70,529	0,9	0,3	4,24	11,264	8,598	0,01332	0,014	1,310	9,870	111,170	32,529	3,418	Super-Kritis
265,250	3,25	63,612	0,9	0,4	4,03	12,299	9,141	0,01332	0,014	1,345	10,047	123,573	38,079	3,245	Super-Kritis
265,500	3,50	56,251	0,8	0,6	3,74	13,273	9,719	0,01332	0,014	1,366	10,147	134,678	44,308	3,040	Super-Kritis
265,750	3,75	48,190	0,7	0,7	3,35	14,162	10,352	0,01332	0,014	1,368	10,159	143,869	51,579	2,789	Super-Kritis
266,000	4,00	38,942	0,6	0,8	2,83	14,938	11,079	0,01332	0,014	1,348	10,062	150,303	60,849	2,470	Super-Kritis
266,250	4,25	27,266	0,5	0,9	2,06	15,557	11,996	0,01332	0,014	1,297	9,804	152,511	75,745	2,013	Super-Kritis

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 3 Perhitungan Aliran Tertekan

H	ELV	h	θ (°)	A	V	Q
5,4	267,400	10,390	2,950	15,904	42,400	674,343
5,6	267,600	10,590	2,953	15,904	42,057	668,882
5,8	267,800	10,790	2,957	15,904	41,724	663,599
6	268,000	10,990	2,960	15,904	41,403	658,487
6,2	268,200	11,190	2,963	15,904	41,092	653,537
6,4	268,400	11,390	2,966	15,904	40,790	648,744
6,6	268,600	11,590	2,969	15,904	40,499	644,101
6,8	268,800	11,790	2,972	15,904	40,216	639,603
7	269,000	11,990	2,975	15,904	39,942	635,242
7,2	269,200	12,190	2,978	15,904	39,676	631,015
7,4	269,400	12,390	2,981	15,904	39,418	626,916
7,6	269,600	12,590	2,983	15,904	39,168	622,940
7,8	269,800	12,790	2,986	15,904	38,925	619,083
8	270,000	12,990	2,988	15,904	38,690	615,340
8,2	270,200	13,190	2,990	15,904	38,462	611,708
8,4	270,400	13,390	2,993	15,904	38,240	608,182
8,6	270,600	13,590	2,995	15,904	38,025	604,759
8,8	270,800	13,790	2,997	15,904	37,816	601,436
9	271,000	13,990	2,999	15,904	37,613	598,208

Sumber: Hasil Perhitungan

Pembebanan

1. Pembebanan akibat tekanan batuan di atas terowongan

$$H_p = 0,3 (B + H_T) = 0,3 (5,3 + 5,3) = 3,7 \text{ m}$$

$$P_v = \gamma \cdot H_p = 2 \cdot 3,7 = 7,4 \text{ t/m}^2$$

$$q = P_v \cdot 1 \text{ m} = 7,4 \cdot 1 = 7,4 \text{ t/m}$$

$$W = q \cdot B = 7,4 \cdot 5,3 = 39,3 \text{ ton}$$

2. Pembebanan tekanan air tanah di atas terowongan

$$P_{Wv} = \gamma_w \cdot H_w = 1 \text{ t/m}^3 \cdot 9,5 \text{ m} = 9,5 \text{ t/m}^2$$

$$q = 9,5 \text{ t/m}^2 \cdot 1 \text{ m} = 9,5 \text{ t/m}$$

3. Beban akibat berat sendiri

$$\text{Diameter dalam (d)} = 4,5 \text{ m}$$

$$\text{Diameter Luar (D)} = 5,3 \text{ m}$$

$$d = \pi \cdot 2,25^2 = 15,90 \text{ m}^2$$

$$D = \left(\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 2,65^2\right) + (5,3 \cdot 2,65) = 25,08 \text{ m}^2$$

$$P = \frac{25,08 - 15,90}{5,3} \cdot 2,4 = 4,15 \text{ t/m}$$

4. Tekanan air dalam terowongan kondisi penuh air

Diketahui : Elevasi Puncak *Surge Tank* : + 295

Tekanan *Water Hammer* = $\gamma_w \cdot (\text{Elevasi } \textit{Surge Tank}$

– Elevasi Dasar Tunnel) = 1. (295 – 262) = 33 ton/m

5. Tekanan *Uplift*

$$(P_{Wv}) = \gamma_w \cdot (H_w + H_T) = 1 \text{ t/m}^3 \cdot 14,8 \text{ m} = 14,8 \text{ t/m}^2$$

$$q = 14,8 \text{ t/m}^2 \cdot 1 \text{ m} = 14,8 \text{ t/m}$$

6. Tekanan batuan aktif horizontal

Tinggi Batuan (H_p) = 14,8 m

Berat Jenis Batuan Saturated (γ_{sat}) = 2 t/m³

Pembebanan akibat tekanan batuan aktif kondisi normal arah horizontal

$$\phi = 36,3^\circ$$

$$\delta = \phi/3 = 36,3^\circ/3 = 12,1^\circ$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cdot \cos(\alpha + \delta) \cdot \left[1 + \frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi)}{\cos(\alpha + \delta) \cdot \cos \delta}\right]^2} = 0,23523$$

$$q_a = \gamma \cdot H \cdot K_a = 2 \cdot 5,3 \cdot 0,23523 = 2,493 \text{ t/m}$$

Pembebanan akibat tekanan batuan aktif kondisi gempa arah horizontal

Diketahui:

$$\phi = 36,3^\circ$$

$$\delta = \phi/3 = 36,3^\circ/3 = 12,1^\circ$$

$$k_h = 0,283$$

$$\theta_D = \arctan \left[\frac{k_h}{1 - k_v} \right] = 15,8015^\circ$$

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\phi - \theta_0 - \theta)}{\cos \theta_0 \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos(\theta + \delta + \theta_0) \cdot \left[1 + \frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \theta_0 - \alpha)}{\cos(\theta + \delta + \theta_0) \cdot \cos(\alpha - \theta)}\right]^2} = 0,48255$$

$$q_{ae} = \gamma \cdot H \cdot K_{ae} = 2 \cdot 5,3 \cdot 0,48255 = 5,1151 \text{ t/m}$$

7. Tekanan air tanah aktif horizontal

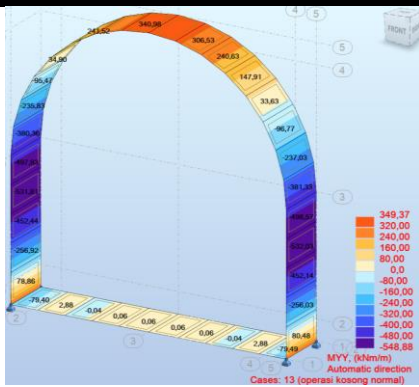
Berat Jenis Air (γ_w) = 1 t/m³

$$P_{W1} = \gamma_w \cdot H_w = (1 \text{ t/m}^3 \cdot 9,5 \text{ m}) = 9,5 \text{ t/m}^2$$

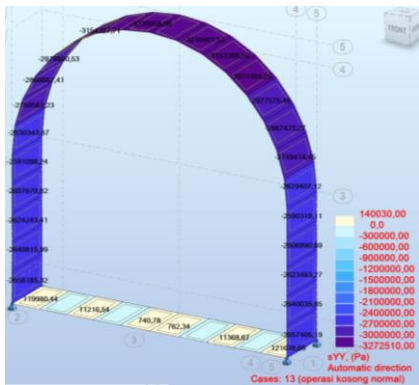
$$P_{W2} = \gamma_w \cdot (H_w + H_T) = 1 \text{ t/m}^3 \cdot (9,5 \text{ m} + 5,3 \text{ m}) = 14,8 \text{ t/m}^2$$

Kombinasi Pembebanan

- Kondisi 1 perencanaan setelah terowongan selesai dibangun pada kondisi normal. Beban yang bekerja: beban mati + beban batuan vertikal + tekanan air tanah vertikal + tekanan batuan horizontal + tekanan *uplift*.
- Kondisi 2 perencanaan setelah terowongan selesai dibangun pada kondisi gempa. Beban yang bekerja: beban mati + beban batuan vertikal + tekanan air tanah vertikal + tekanan batuan gempa horizontal + tekanan *uplift*.
- Kondisi 3 perencanaan saat pengoperasian sebagai terowongan pengelak terisi pada kondisi normal. Beban yang bekerja: beban mati + beban air dari dalam (terisi penuh air) + beban batuan vertikal + tekanan air tanah vertikal + tekanan batuan horizontal + tekanan air tanah horizontal + tekanan *uplift*.
- Kondisi 4 perencanaan saat pengoperasian sebagai terowongan pengelak terisi pada kondisi gempa. Beban yang bekerja: beban mati + beban air dari dalam (terisi penuh air) + beban batuan vertikal + tekanan air tanah vertikal + tekanan batuan gempa horizontal + tekanan air tanah horizontal + tekanan *uplift*.
- Kondisi 5 perencanaan saat pengoperasian sebagai terowongan pengelak kosong pada kondisi normal. Beban yang bekerja: beban mati + beban batuan vertikal + tekanan air tanah vertikal + tekanan batuan horizontal + tekanan air tanah horizontal + tekanan *uplift*.
- Kondisi 6 perencanaan saat pengoperasian sebagai terowongan pengelak kosong pada kondisi gempa. Beban yang bekerja: beban mati + beban batuan vertikal + tekanan air tanah vertikal + tekanan batuan gempa horizontal + tekanan air tanah horizontal + tekanan *uplift*.



Gambar 3 Hasil Pembebanan Terowongan Pengelak ketika Operasi Kosong Kondisi Normal (Myy)
 Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4 Hasil Pembebanan Terowongan Pengelak ketika Operasi Kosong Kondisi Normal (Syy)
 Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4 Tabel Ringkasan Maksimum dan Minimum Momen yang Terjadi

	MXX (kNm/ m)	MYY (kNm/ m)	MXZ (kNm/ m)	sXX (Pa)	sYY (Pa)	sXY (Pa)
MAX	70,52	349,37	69,54	576820,9	244142,7	160613
PANEL	145	132	154	5	3	2,32
NODE	27	45	26	143	132	144
CASE	5	13 (C)	13 (C)	13 (C)	5	13 (C)
MIN (-)	324,34	543,45	69,54	1874155,	3240114,	160613
PANEL	150	123	154	93	71	2,32
NODE	72	54	65	144	132	144
CASE	11 (C)	13 (C)	13 (C)	63	9	60
				13 (C)	13 (C)	13 (C)

Sumber: Hasil Perhitungan

Penulangan

Berdasarkan hasil perhitungan *Robot Structural Analysis Profesional 2021* didapatkan momen terbesar yang terjadi yaitu pada pembebanan pada saat kondisi kosong:

$$\begin{aligned} \phi &= 0,65 & \beta_1 &= 0,85 \\ b &= 1000 \text{ mm} & h &= 500 \text{ mm} \\ f'_c &= 20 \text{ MPa} & d' &= 80 \text{ mm} \\ f_y &= 400 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Perencanaan Tulangan Arah Sumbu X:

Direncanakan menggunakan tulangan D-22

$$d = h - d' = 500 - 80 = 420 \text{ mm}$$

Kapasitas momen pada Upper-Top Arch:

$$M_u = 349,37 \text{ kNm} = 349.370.000 \text{ Nmm}$$

$$P_u = 3.240,115 \text{ kN} = 3.240.115 \text{ N}$$

$$e = \frac{M_u}{P_u} = \frac{349.370.000}{3.240.115} = 108 \text{ mm}$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f_c} = \frac{400}{0,85 \cdot 20} = 23,529$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{f_y} \cdot \frac{600}{600 + f_y} = \frac{0,85 \cdot 0,85 \cdot 20}{400} \cdot \frac{600}{600 + 400} = 0,0217$$

$$A_{smax} = 0,75 \cdot \rho \cdot b \cdot d = 0,75 \cdot 0,0217 \cdot 1000 \cdot 420 = 6.828 \text{ mm}^2$$

$$A_{smin} = \frac{1,4}{f_y} \cdot b \cdot d = \frac{1,4}{200} \cdot 1000 \cdot 420 = 1.470 \text{ mm}^2$$

Mencoba:

$$A_{s1} = 3800 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_{s2} = 0,5 A_{s1} = 0,5 \cdot 3800 = 1900 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_{stot} = A_{s1} + A_{s2} = 3800 + 1900 = 5700 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$\rho = \frac{A_{stot}}{b \cdot h} = \frac{5700}{1000 \cdot 500} = 0,0114$$

$$c_b = \frac{600}{600 + f_y} d = \frac{600}{600 + 400} 420 = 252 \text{ mm}$$

$$a_b = \beta_1 \cdot c = 0,85 \cdot 252 = 214,2 \text{ mm}$$

$$f'_s = \epsilon_s \cdot E_s \cdot \frac{(c_b - d')}{d} = 0,003 \cdot 200000 \cdot \frac{(252 - 420)}{420} = 409$$

Mpa

Karena $f'_s > f_y$, maka digunakan $f'_s = f_y = 400 \text{ Mpa}$

$$\begin{aligned} \phi P_{nb} &= 0,65 \cdot (0,85 \cdot f'_c \cdot a_b \cdot b + A_{s2} \cdot f'_s - A_{s1} \cdot f_y) = 0,65 \\ &\cdot (0,85 \cdot 20 \cdot 214,2 \cdot 1000 + 1900 \cdot 400 - 5700 \cdot 400) \\ &= 1.378.910 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\phi P_{nb} > P_u$$

$$1.378.910 \text{ N} > 3.240.115 \text{ N}$$

Karena ϕP_{nb} lebih dari P_u sehingga terjadi hancur tekan.

$$\phi P_n = 0,65 \cdot 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot d \cdot \left[\left(\frac{h - 2e}{2d} \right) + \right.$$

$$\left. \sqrt{\left(\frac{h - 2e}{2d} \right)^2 + 2 \cdot m \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{d'}{d} \right)} \right] = 0,65 \cdot$$

$$0,85 \cdot 20 \cdot 1000 \cdot 420 \cdot \left[\left(\frac{500 - 2 \cdot 108}{2 \cdot 420} \right) + \right.$$

$$\left. \sqrt{\left(\frac{500 - 2 \cdot 108}{2 \cdot 420} \right)^2 + 2 \cdot 23,529 \cdot 0,0114 \cdot \left(1 - \frac{80}{420} \right)} \right]$$

$$= 3.808.013 \text{ N}$$

$$\phi P_n > P_u$$

$$3.808.013 \text{ N} > 3.240.115 \text{ N}$$

Karena kontrol $\phi P_n > P_u$, maka dinyatakan memenuhi dan penulangan tersebut dapat digunakan.

$$S_n = \frac{0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot b}{A_s} = \frac{0,25 \cdot \pi \cdot 22^2 \cdot 1000}{3800} = 100 \text{ mm}$$

Sehingga D22 - 100 bisa digunakan.

Perencanaan Tulangan Arah Sumbu Y:

Direncanakan menggunakan tulangan D-16

$$d = h - d' = 500 - 80 = 420 \text{ mm}$$

Kapasitas momen pada Upper-Top Arch:

$$M_u = 41,78 \text{ kNm} = 41.780.000 \text{ Nmm}$$

$$P_u = 103,58 \text{ kN} = 103.580,10 \text{ N}$$

$$e = \frac{M_u}{P_u} = \frac{41.780.000}{103.580,10} = 403,359 \text{ mm}$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f_c} = \frac{400}{0,85 \cdot 20} = 23,529$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \beta_1 f_c'}{f_y} \cdot \frac{600}{600 + f_y} = \frac{0,85 \cdot 0,85 \cdot 20}{400} \cdot \frac{600}{600 + 400} = 0,0217$$

$$A_{s_{max}} = 0,75 \cdot \rho \cdot b \cdot d = 0,75 \cdot 0,0217 \cdot 1000 \cdot 420 = 6.828 \text{ mm}^2$$

$$A_{s_{min}} = \frac{1,4}{f_y} \cdot b \cdot d = \frac{1,4}{200} \cdot 1000 \cdot 420 = 1.470 \text{ mm}^2$$

Mencoba:

$$A_{s1} = 2000 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_{s2} = 0,5 A_{s1} = 0,5 \cdot 2000 = 1000 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_{s_{tot}} = A_{s1} + A_{s2} = 2000 + 1000 = 3000 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$\rho = \frac{A_{s_{tot}}}{b \cdot h} = \frac{3000}{1000 \cdot 500} = 0,006$$

$$c_b = \frac{600}{600 + f_y} d = \frac{600}{600 + 400} 420 = 252 \text{ mm}$$

$$a_b = \beta_1 \cdot c = 0,85 \cdot 252 = 214,2 \text{ mm}$$

$$f_s' = \epsilon_s \cdot E_s \cdot \frac{(c_b - d')}{d'} = 0,003 \cdot 200000 \cdot \frac{(252 - 420)}{420} = 409,5 \text{ Mpa}$$

Karena $f_s' > f_y$, maka digunakan $f_s' = f_y = 400 \text{ Mpa}$

$$\phi P_{nb} = 0,65 \cdot (0,85 \cdot f_c' \cdot a_b \cdot b + A_{s'} \cdot f_s' - A_s \cdot f_y) = 0,65 \cdot (0,85 \cdot 20 \cdot 214,2 \cdot 1000 + 1000 \cdot 400 - 3000 \cdot 400) = 1.846.910 \text{ N}$$

$$\phi P_{nb} > P_u$$

$$1.846.910 \text{ N} > 103.580,10 \text{ N}$$

Karena ϕP_{nb} lebih dari P_u sehingga terjadi hancur tarik.

$$\phi P_n = 0,65 \cdot 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot d \cdot \left[\left(\frac{h-2e}{2d} \right) + \sqrt{\left(\frac{h-2e}{2d} \right)^2 + 2 \cdot m \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{d'}{d} \right)} \right] = 0,65 \cdot 0,85 \cdot 20 \cdot 1000 \cdot 420 \cdot \left[\left(\frac{500-2 \cdot 403,359}{2 \cdot 420} \right) + \sqrt{\left(\frac{500-2 \cdot 403,359}{2 \cdot 420} \right)^2 + 2 \cdot 23,529 \cdot 0,006 \cdot \left(1 - \frac{80}{420} \right)} \right] = 595.828 \text{ N}$$

$$\phi P_n > P_u$$

$$595.828 \text{ N} > 103.580,10 \text{ N}$$

Karena kontrol $\phi P_n > P_u$, maka dinyatakan memenuhi dan penulangan tersebut dapat digunakan.

$$S_n = \frac{0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot b}{A_s} = \frac{0,25 \cdot \pi \cdot 16^2 \cdot 1000}{2000} = 100 \text{ mm}$$

Sehingga D16 - 100 bisa digunakan.

Rekapitulasi Rencana Anggaran Biaya (RAB)

Tabel 5 Rekapitulasi Rencana Anggaran Biaya

NO	URAIAN PEKERJAAN	JUMLAH (Rp.)
1	2	3
1	PEKERJAAN PEMBETONAN	6.053.509.557
2	PEKERJAAN PEMBESIAN (D22)	1.139.077.385
3	PEKERJAAN PEMBESIAN (D16)	289.661.496
	Total	7.482.248.438
	Jumlah Dibulatkan	7.482.248.000

Sumber: Hasil Perhitungan

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan pada pembahasan sebelumnya, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Alternatif terowongan pengelak direncanakan memiliki bentuk-B. Berdasarkan data penelusuran banjir diperoleh debit banjir sebesar 188.943 m³/detik. Sehingga didapatkan diameter terowongan pengelak yaitu 4,5 m. dari perencanaan dimensi terowongan pengelak yang sudah didapatkan, kemudian ditinjau kondisi hidrolis yang terjadi yaitu pada kondisi aliran bebas dan aliran tertekan.
- Beban-beban yang bekerja pada terowongan pengelak bentuk B, antara lain:
 Batuan horizontal kondisi normal (q_a) = 2,493 t/m²
 Batuan horizontal kondisi gempu (q_{ae}) = 5,115 t/m²
 Batuan vertikal (P_v) = 7,4 t/m²
 Air horizontal (P_{w1}) = 1,0 t/m²
 Air horizontal (P_{w2}) = 5,3 t/m²
 Air vertikal (P_{wv}) = 9,5 t/m²
 Uplift (P_u) = 14,8 t/m²
 Air dari dalam kondisi penuh (I_{wh}) = 33 t/m

3. Berdasarkan hasil perhitungan penulangan pada terowongan pengelak dengan merujuk pada standar perencanaan beton bertulang Indonesia yaitu SNI 03-2847-2019 diperoleh tulangan sebagai berikut:
 Diameter arah sumbu X : D22 - 100
 Diameter arah sumbu Y : D16 - 100
4. Menurut hasil perhitungan rencana anggaran biaya pada struktur terowongan pengelak menggunakan peraturan menteri PUPR bidang sumber daya air didapatkan hasil sebesar Rp. 7.482.248.000,00,- (Tujuh Miliar Empat Ratus Delapan Puluh Dua Juta Dua Ratus Empat Puluh Delapan Ribu Rupiah).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian PUPR. *BANJIR DAN UPAYA PENANGANANNYA*. (n.d.). <https://pu.go.id/berita/banjir-dan-upaya-penanganannya>.
- [2] Raharjo. B. A., (2023). *Perbandingan Desain Elemen Struktur Pada Bangunan Gedung Secara Manual dan dengan Software Robot Structural Analysis Professional 2022*
- [3] Standar Nasional Indonesia (2020). *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*.
- [4] Standar Nasional Indonesia (2019). *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan*.
- [5] Chow, V. Te. (2009b). *Open-channel Hydraulics*. Amsterdam University Press.
- [6] Singh, Bhawani., & Rajnish. K. Goel . (2006). *Tunneling in Weak Rock*.
- [7] Ervianto, I. W. (2005) *Manajemen Proyek Konstruksi Edisi Revisi*. Andi, Yogyakarta.
- [8] Bureau of Reclamation & United States. (1987d). *Design of Small Dams*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- [9] Phillips, H.B, & Allen, I.E. (1986). *Beggs Deformeter Stress Analysis of Single Barrel Conduits*.
- [10] Loebis, Joerson, Ir, M. Eng, (1984). *Banjir Rencana untuk Bangunan Air*, Badan Penerbit Pekerjaan Umum, Jakarta.