

**STUDI PERENCANAAN
TEROWONGAN PENGELAK BENTUK LINGKARAN PADA
BENDUNGAN LOLAK KABUPATEN BOLAANG MONGONDOW
PROPINSI SULAWESI UTARA**

SKRIPSI

**Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun oleh :

SATRIA WIGA TRENGGANA 0310610065

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN SIPIL
MALANG
2010**

**STUDI PERENCANAAN
TEROWONGAN PENGELAK BENTUK LINGKARAN PADA
BENDUNGAN LOLAK KABUPATEN BOLAANG MONGONDOW
PROPINSI SULAWESI UTARA**

SKRIPSI

**Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun oleh :

SATRIA WIGA TRENGGANA 0310610065

DOSEN PEMBIMBING

Ir. Suroso, Dipl. HE, M.Eng
NIP. 19520301 197603 1 001

Ir. Edhi Wahyuni, ST, MT
NIP. 19570616 198601 2 001

**STUDI PERENCANAAN
TEROWONGAN PENGELAK BENTUK LINGKARAN PADA
BENDUNGAN LOLAK DI KABUPATEN BOLAANG MONGONDOW
PROPINSI SULAWESI UTARA**

Disusun oleh :

SATRIA WIGA TRENGGANA 0310610065

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada :

3 Agustus 2010

DOSEN PENGUJI

Yatnanta Padma Devia, ST, MT
NIP. 19740813 199903 2 002

Ir. Suroso, Dipl.HE, M.Eng
NIP. 19520301 197603 1 001

Ir. Edhi Wahyuni, ST, MT
NIP. 19570616 198601 2 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Sipil

Ir. Sugeng Pravitno Budio, MS
NIP : 19610125 198601 1 001

PERNYATAAN**ORISINILITAS SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang sepengetahuan saya, di dalam naskah SKRIPSI ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah SKRIPSI ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur PLAGIASI, saya bersedia SKRIPSI ini digugurkan dan gelar akademik yang saya peroleh (SARJANA TEKNIK) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

(UU No. 20 Tahun 2003 pasal 25 Ayat 2 dan pasal 70)

Malang, 3 Agustus 2010

Mahasiswa

Nama : Satria Wiga Trenggana

NIM : 0310610065

Jurusan : Teknik Sipil

KATA PENGANTAR

Segala puja dan puji syukur kami haturkan ke hadirat Allah SWT, karena atas limpahan berkah dan rahmat-Nya kami bisa menyelesaikan skripsi ini. Skripsi berjudul **”STUDI PERENCANAAN TEROWONGAN PENGELAK BERBENTUK LINGKARAN PADA BENDUNGAN LOLAK KABUPATEN BOLAANG MONGONDOW PROPINSI SULAWESI UTARA”** ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang.

Dalam penyusunan skripsi ini, kami mendapatkan bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan dan kerendahan hati, kami menyampaikan terima kasih kepada :

1. Ir. H Suroso, M.Eng., Dipl. HE selaku dosen pembimbing atas segala masukan dan bimbingan yang diberikan.
2. Ir. Edhi Wahyuni, ST, MT selaku dosen pembimbing atas segala masukan dan bimbingan yang diberikan.
3. Yatnanta P. Devia, ST, MT selaku dosen penguji.
4. Ir. Sugeng P. Budio, MS selaku Ketua Jurusan Sipil Universitas Brawijaya Malang.
5. Ir. Siti Nurlina, MT selaku Sekretaris Jurusan Sipil Universitas Brawijaya Malang.
6. Ir. Prastumi, MT selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Keairan.
7. Achfas Zacoeb, ST, MT selaku dosen wali.
8. Keluarga besar tercinta atas segala dukungan, doa, dan cinta kasih yang tidak pernah putus diberikan selama ini.
9. Teman-teman angkatan 2003 untuk dorongan semangat, kritik, saran dan bantuan baik material maupun spiritual.
10. Serta semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini.

Kami menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Akhir kata, kami berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan.

Malang, Agustus 2010

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL

LEMBAR PENGESAHAN

PERNYATAAN ORISINILITAS SKRIPSI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
ABSTRAKSI	vii

BAB I PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang Masalah	1
1.2	Identifikasi Masalah	2
1.3	Batasan Masalah	3
1.4	Rumusan Masalah	3
1.5	Maksud dan Tujuan	3

BAB II LANDASAN TEORI

2.1	Gambaran Umum Terowongan Pengelak	4
2.1.1	Definisi Terowongan Pengelak	4
2.1.2	Sistem Pengelak	4
2.1.3	Kapasitas Debit Terowongan Pengelak	4
2.2	Perencanaan Terowongan Pengelak	8
2.2.1	Umum	8
2.2.2	Analisa Topografi	9
2.2.3	Analisa Geologi	9
2.2.4	Analisa Stabilitas Konstruksi Terowongan	10
2.2.5	Penulangan Konstruksi Dinding Terowongan	11
2.2.6	Elemen Struktur Plat Dengan Teori <i>Column Analogy</i>	11
2.2.7	Kombinasi Aksial dan Lentur	13

2.2.8 Software STAAD Pro Untuk Analisis Struktur	16
2.2.8.1 Input	16
2.2.8.2 Output	17

BAB III METODOLOGI STUDI

3.1 Gambaran Daerah Studi	18
3.2 Pengumpulan Data	19
3.3 Perhitungan Hidrolika Terowongan	19
3.4 Data Teknis Terowongan Pengelak.....	19
3.5 Prosedur Perencanaan Terowongan Pengelak.....	20
3.6 Flowchart	22

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Perencanaan	24
4.2 Penentuan Dimensi Terowongan Berdasarkan Penelusuran Banjir	25
4.3 Perhitungan Hidraulika.....	26
4.3.1 Aliran Bebas (<i>Free Flow</i>).....	26
4.3.2 Aliran Tertekan (<i>Pressure Flow</i>).....	29
4.4 Perhitungan Konstruksi	35
4.4.1 Kondisi Perencanaan	35
4.4.2 Struktur Geometri Terowongan Pengelak.....	36
4.4.3 <i>Design Section</i> Terowongan Pengelak	36
4.4.4 Perhitungan Pembebanan (<i>Design Load</i>).....	37
4.4.5 Diagram Pembebanan Terowongan Pengelak	47
4.4.6 Kontrol Stabilitas Konstruksi Terowongan.....	50
4.4.6.1 Kontrol Stabilitas Konstruksi Terowongan Pada Kondisi Kosong	50
4.4.6.2 Kontrol Stabilitas Konstruksi Terowongan Pada Kondisi Penuh ...	51
4.4.7 Hasil Perhitungan StaadPro 2004	52
4.5 Penulangan Konstruksi Terowongan	53
4.5.1 Penulangan Terowongan Pengelak.....	54
4.5.2 Gambar Penulangan Terowongan Pengelak	58

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan..... 59

5.2 Saran..... 60

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Nilai Koefisien Kekasaran Manning.....	6
Tabel 2.2 Tegangan Ijin Berbagai Jenis Batuan	10
Tabel 4.1 Kapasitas Pengaliran Saat Kondisi Aliran Bebas.....	28
Tabel 4.2 Kapasitas Pengaliran Saat Kondisi Aliran Tertekan	30
Tabel 4.3 Perhitungan Fungsi Tampungan Untuk Penelusuran Banjir Melalui Terowongan Pengelak.....	32
Tabel 4.4 Perhitungan Elevasi Muka Air Maksimum dan Outflow Maksimum yang Melalui Terowongan Pengelak	33
Tabel 4.5 Tabel Ringkasan Maksimum dan Minimum Gaya Geser, Gaya Normal dan Momen Terowongan Pengelak.....	52



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Kondisi Aliran Bebas	5
Gambar 2.2 Dua Kondisi Muka Air Pada Penampang Lingkaran	6
Gambar 2.3 Diagram Kondisi Aliran Tertekan	7
Gambar 2.4 Distribusi Tegangan Pada Penampang Kolom	13
Gambar 3.1 Peta Lokasi Pekerjaan.....	18
Gambar 3.2 Diagram Alur Pengerjaan Skripsi.....	22
Gambar 3.3 Site Plan Bendungan Lolak.....	23
Gambar 4.1 Diagram Kondisi Aliran Tertekan	29
Gambar 4.2 Grafik Hubungan h dan Q Pada Kondisi Aliran Bebas dan Tertekan	31
Gambar 4.3 Grafik Hubungan Q Inflow dan Q Outflow yang Melalui Terowongan Pengelak	34
Gambar 4.4 Struktur Geometri Terowongan Pengelak	36
Gambar 4.5 <i>Design Section</i> Terowongan Pengelak	36
Gambar 4.6 Diagram Pembebanan Pada Kondisi I	47
Gambar 4.7 Diagram Pembebanan Pada Kondisi II	47
Gambar 4.8 Diagram Pembebanan Pada Kondisi III	48
Gambar 4.9 Diagram Pembebanan Pada Kondisi IV	48
Gambar 4.10 Diagram Pembebanan Pada Kondisi V.....	49
Gambar 4.11 Gambar Penulangan Terowongan Pengelak	58

ABSTRAKSI

Satria Wiga Trenggana, Jurusan Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Agustus 2010, *Studi Alternatif Perencanaan Terowongan Pengelak Berbentuk Lingkaran Pada Bendungan Lolak Kabupaten Bolaang Mongondow Propinsi Sulawesi Utara*, Dosen Pembimbing : Ir. H Suroso, M.Eng., Dipl. HE dan Ir. Edhi Wahyuni, ST, MT.

Air merupakan salah satu sumber daya alam yang sangat penting dalam kehidupan setiap makhluk hidup, terutama manusia yang memanfaatkan air untuk berbagai macam aktifitas dalam kehidupannya. Dengan adanya Bendungan Lolak di Kecamatan Lolak Kabupaten Bolaang Mongondow Propinsi Sulawesi Utara ini diharapkan dapat mengairi lahan pertanian potensial yang luasnya mencapai 2000 Ha, juga untuk memenuhi kebutuhan air baku penduduk disekitar bendungan. Sebelum dilaksanakan pembuatan bendungan, terlebih dahulu dibuat terowongan pengelak (*Diversion Tunnel*) yang berfungsi untuk mengalihkan, menampung aliran sungai sehingga di bagian hilir dari bendungan pengelak kering dan terbentuk ruang kerja untuk pelaksanaan kontruksi.

Saat ini terowongan pengelak yang dibangun pada bendungan Lolak berbentuk tapal kuda. Tujuan dari penyusunan skripsi ini adalah memberikan alternatif perencanaan struktur terowongan pengelak berbentuk lingkaran yang aman dengan menggunakan metode Kolom Analogi (*Analogy Column*).

Terowongan pengelak direncanakan berupa terowongan tunggal dengan kontruksi dari beton bertulang berbentuk lingkaran. Untuk mengetahui kapasitas terowongan digunakan analisa hidrolika. Untuk perhitungan konstruksi digunakan Metode Elastis dengan bantuan software StaadPRO untuk memperoleh gaya-gaya dalamnya dan mengkombinasikan gaya momen yang terjadi dengan gaya normalnya, sehingga untuk perhitungan dan analisa pembebanan, distribusi momen, pemodelan statika pada struktur terowongan, serta perilaku perpindahannya (*displacement*) mengacu pada teori *column analogy* tersebut. Sedangkan untuk penulangannya menggunakan acuan SNI03-2847-2002.

Terowongan ini mempunyai panjang 371 m, elevasi dasar *inlet* +43,00 m dan elevasi dasar *out let* +34,00 m. Terowongan pengelak ini direncanakan berbentuk lingkaran dengan diameter 5 m luasan 19,635 m² dan tebal terowongan 50 cm. Didapatkan Q outflow pada elevasi muka air maksimum 54,2 m yaitu sebesar 259,70 m³/s dan dari hasil analisis tegangan pada kondisi kosong sebesar 1,0396 kg/cm² sedangkan untuk tegangan pada kondisi penuh sebesar 1,367 kg/cm². Dari hasil analisis *software* StaadPro didapat Mmax sebesar 15,292 ton-m. Dengan menggunakan SNI03-2847-2002 dan dari hasil perhitungan momen maksimum yang terjadi, kontruksi terowongan direncanakan menggunakan tulangan vertikal 2-D22 dan tulangan horisontal D10-200 mm.

Key word : *Diversion tunnel, analogy column, clastic center, column cross section, terowongan, pengelak, lingkaran.*

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki dua musim yaitu musim kemarau dan musim hujan dimana pada musim hujan terdapat air yang cukup melimpah dan di saat kemarau terjadi kekurangan air. Untuk itu timbulah pemikiran bagaimana menampung kelebihan air musim hujan dan memanfaatkannya di musim kemarau. Air merupakan salah satu sumber daya alam yang sangat penting dalam kehidupan di dunia ini, terutama bagi perkembangan berbagai kebutuhan, baik itu untuk kebutuhan pangan, kebutuhan transportasi, pembangkit tenaga listrik, maupun untuk kebutuhan irigasi. Selain itu dalam rangka pengembangan memenuhi kebutuhan pangan nasional, Pemerintah Indonesia telah melaksanakan serangkaian usaha secara terus menerus yang dititik beratkan pada sektor pertanian, yang berupa pembangunan di bidang pertanian serta pembangunan di bidang pengairan guna menunjang peningkatan produksi pangan. Untuk itu dari itu sangat diperlukan pelestarian pengelolaan sumber daya air yang baik, yang salah satu caranya yaitu dengan dibangunnya bendungan dan bangunan-bangunan air pendukungnya.

Salah satu yang mendapat prioritas dalam program pembangunan daerah Irigasi yang dilaksanakan oleh Satuan Kerja Balai Wilayah Sungai Sulawesi I dengan dana dari APBN, adalah Daerah Irigasi Lolak yang terletak di kecamatan Lolak, Kabupaten Bolaang Mongondow Sulawesi Utara. Pada Tahun anggaran 2006 Satuan Kerja Balai Wilayah Sungai Sulawesi I telah melakukan pekerjaan studi kelayakan (*Feasibility Study*) dan Analisis Dampak Lingkungan Bendungan Lolak. Masih terdapat sekitar 2000 Ha lahan pertanian potensial di kanan Bendung Lolak yang belum terairi dan dapat digunakan sebagai sumber pemenuhan kebutuhan air baku penduduk lokal dan sekitarnya.

Pada hakekatnya bendungan dilengkapi dengan bangunan penunjang yakni terowongan pengelak yang mempunyai peranan yang sangat penting dalam merencanakan suatu terowongan pengelak dengan kapasitas yang memadai dan dengan konstruksi yang aman, merupakan syarat terpenting bagi pelaksanaan konstruksi bendungan. Dari bangunan terowongan pengelak (*diversion tunnel*)

bandungan Lolak yang sudah ada maka dicoba untuk menganalisis perencanaan terowongan baru dengan perencanaan dimensi yang layak bangun dengan bentuk lingkaran. Hasil seperti ini dapat membandingkan antara terowongan pengelak (*diversion tunnel*) berbentuk tapal kuda dengan terowongan pengelak (*diversion tunnel*) berbentuk lingkaran, dengan memperhatikan analisa hidrolika maka dapat diketahui aspek hidrolik dan kapasitas pengeluaran dari dimensi yang direncanakan, sehingga mendapatkan terowongan yang layak bangun. Salah satu keuntungan dari terowongan pengelak (*diversion tunnel*) berbentuk lingkaran yaitu dari segi hidrolika lebih efektif mengalirkan air, proses pekerjaan penulangan juga lebih mudah karena bentuknya yang simetris.

1.2 Identifikasi Masalah

Bangunan terowongan pengelak (*Diversion Tunnel*) untuk bangunan bendung adalah membuat suatu konstruksi yang bertujuan untuk mengatur jalannya aliran. Bangunan pengelak pada Bendungan Lolak direncanakan terowongan pengelak berbentuk Tapal Kuda (*Horse Shoe*) dengan dimensi $B = 5,0$ m, $H = 2,5$ m, $R = 2,5$ m sepanjang 371 meter dengan kemiringan saluran/pipa $S_0=0,0243$. Elevasi dasar bagian pemasukan +43,0 m dan bagian outlet +34,0 m. Elevasi puncak *cofferdam* ditetapkan pada elevasi +75,0 m untuk debit banjir Q_{25} .

Dalam studi alternative bentuk terowongan Bendungan Lolak ini dicoba memberikan suatu alternatif bentuk perencanaan terowongan pengelak dengan bentuk lingkaran dimana perencanaan sebelumnya berbentuk tapal kuda. Dengan memperhatikan analisa hidrolika maka dapat diketahui aspek hidrolika dan kapasitas pengeluaran dari dimensi yang direncanakan sehingga mendapatkan terowongan yang layak bangun, efektif dan aman. Setelah pembangunan terowongan ini selesai maka dilakukan penutupan terowongan pengelak yang selanjutnya dimanfaatkan untuk saluran pembawa atau pengambilan untuk kebutuhan irigasi maupun kebutuhan air baku. Oleh karena itu, dalam menentukan debit banjir perlu dilakukan analisa penelusuran banjir.

1.3 Batasan Masalah

Kajian batasan masalah yang digunakan dalam studi ini adalah sebagai berikut :

1. Terowongan pengelak (*Diversion Tunnel*) yang direncanakan berbentuk Lingkaran.
2. Data perencanaan yang digunakan adalah data topografi, keadaan geologi dan data hidrologi.
3. Analisa hidrolika pada terowongan bertujuan untuk mengetahui aspek hidrolik dan kapasitas pengeluaran dari dimensi yang direncanakan
4. Menggunakan bantuan software Staad Pro 2004 untuk analisis struktur.
5. Pada perencanaan tersebut tidak membahas tentang aspek ekonomis, yaitu penjadwalan dan biaya proyek.

1.4 Rumusan Masalah

Dengan memperhatikan batasan-batasan yang telah diuraikan, permasalahan dalam studi ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Berapakah dimensi terowongan lingkaran dan besar debit berdasarkan penelusuran banjir ?
2. Bagaimana debit maksimum yang akan melalui terowongan dengan parameter perencanaan yang telah ditentukan ?
3. Apa saja dasar pertimbangan pemilihan bentuk terowongan lingkaran?
4. Bagaimana stabilitas terowongan berbentuk lingkaran?
5. Bagaimana perhitungan konstruksi terowongan berbentuk lingkaran?

1.5 Maksud dan Tujuan

Maksud dari penulisan skripsi ini adalah untuk menganalisis dan mendesain terowongan pengelak (*Diversion Tunnel*) dengan bentuk lingkaran dan memberikan alternatif lain dari perencanaan terowongan pengelak (*Diversion Tunnel*) yang sudah direncanakan sebelumnya. Sedangkan tujuannya adalah menerapkan segala disiplin ilmu yang telah diperoleh dari bangku kuliah. Selain itu dapat memberikan sumbangan pemikiran dan pemahaman dalam perencanaan terowongan pengelak (*Diversion Tunnel*).

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Umum

2.1.1 Definisi Terowongan Pengelak

Terowongan Pengelak adalah bangunan pelengkap yang berfungsi untuk mengalihkan aliran sungai selama pelaksanaan pekerjaan pembangunan bendungan, dan untuk mengalirkan air sungai, pembangunan terowongan pengelak dilaksanakan pada awal pelaksanaan bendungan.

2.1.2 Sistem Pengelak

Sistem pengelak adalah sistem untuk membantu mengelakkan aliran air sungai sehingga pembangunan bendungan bisa dilaksanakan. Sistem ini terdiri dari bendungan pengelak (*cofferdam*) dan terowongan pengelak (*diversion tunnel*). Terowongan Pengelak direncanakan sebagai fasilitas pengalihan aliran atau pemasukan dan pengeluaran aliran sungai utama sehingga pembangunan bangunan pelimpah dan bendungan utama bisa dilaksanakan. Setelah terowongan pengelak selesai dilaksanakan, aliran sungai akan dialihkan menuju terowongan tersebut dengan cara menutup alur sungai tepat di hilir mulut terowongan dengan tanggul sementara (pekerjaan ini biasanya dilakukan pada saat musim kemarau). Setelah aliran dialihkan ke terowongan, maka pelaksanaan pembangunan Bendungan pengelak dapat dilaksanakan, selanjutnya pekerjaan-pekerjaan konstruksi lainnya segera dapat dilakukan setelah bendungan pengelak selesai dibangun. Terowongan pengelak selanjutnya dimanfaatkan untuk saluran pembawa dengan membangun bangunan pengambilan di mulut terowongan.

2.1.3 Kapasitas Debit Terowongan Pengelak

Untuk menentukan debit aliran dalam terowongan tergantung pada karakteristik hidrolis dari aliran yang terjadi, faktor yang mempengaruhi karakteristik hidrolis pada terowongan. (*Sosrodarsono, 1989:261*).

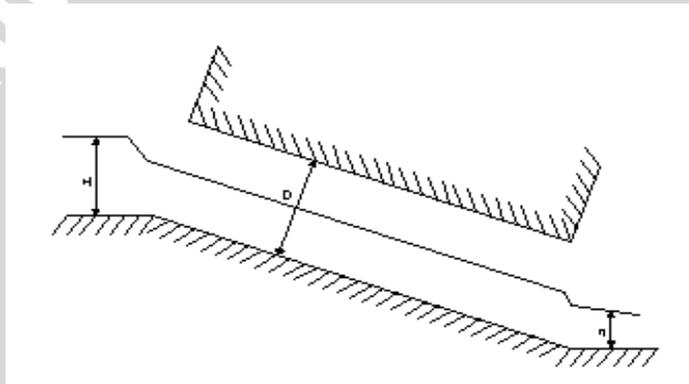
- Kemiringan dasar terowongan pengelak.
- Kekasaran dinding terowongan.

- o Panjang terowongan pengelak.
- o Ukuran terowongan pengelak.

Debit yang masuk kedalam terowongan melalui inlet dapat dihitung berdasarkan ketinggian permukaan air di depan bagian hulu. Debit yang masuk ke dalam terowongan terjadi pada 2 kondisi aliran yaitu aliran bebas (*free flow*) dan aliran tertekan (*pressure flow*). Oleh karena itu tipe aliran pada terowongan pengelak dibagi menjadi dua kondisi:

a. Kondisi Aliran Bebas (*Free Flow*)

Aliran bebas yaitu berupa aliran saluran terbuka, ini terjadi bila terowongan tidak penuh, ujung hulu terowongan tidak tenggelam dimana $H/D < 1,2$ (Suyono Sosrodarsono dan Kensaku Takeda, 1989 : 263)



Gambar 2.1 Kondisi aliran bebas

Dengan ,

D = diameter terowongan

H = tinggi air di muka inlet

Untuk menentukan tinggi muka air dan diameter terowongan pengelak digunakan rumus Manning (Chow,1992) :

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

$$R = \frac{A}{P} \quad (2-2)$$

$$Q = A \cdot V \quad (2-3)$$

- V = Kecepatan aliran (m/det)
- Q = Debit yang lewat terowongan (m^3/det)
- n = Koefisien kekasaran Manning
- R = Jari- jari hidrolis(m)
- S = Kemiringan saluran
- A = Luas penampang basah (m^2)

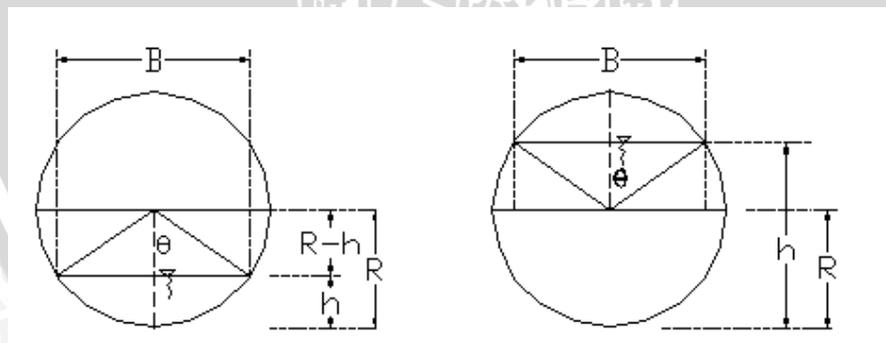
Tabel 2.1.Nilai koefisien kekasaran Manning (n)

Bahan Saluran	Max	Min
Pipa beton jadi atau dicor ditempat	0.014	0.008
Pipa baja dengan sambungan dilas	0.012	0.008
Terowongan batuan alami	0.035	0.020

Sumber: Design of Small Dam, 1978: 471

Bentuk penampang lingkaran :

Pada kondisi aliran bebas, untuk menentukan besarnya luas, keliling basah dan lebar pada dimensi lingkaran dapat digunakan pendekatan seperti di bawah ini:



Gambar 2.2. Dua kondisi muka air pada penampang lingkaran
Kondisi air di bawah garis tengah lingkaran :

$$\theta = \arccos \frac{(R - h)}{R} \quad (2-4)$$

$$A = R^2 \left[\frac{\theta\pi}{180} - \sin \theta \cdot \cos \theta \right] \quad (2-5)$$

$$P = \frac{2\theta\pi R}{180} \quad (2-6)$$

$$B = 2 R \sin \theta \quad (2-7)$$

Kondisi air diatas garis tengah lingkaran :

$$\theta = \arccos \frac{(h - R)}{R} \quad (2-8)$$

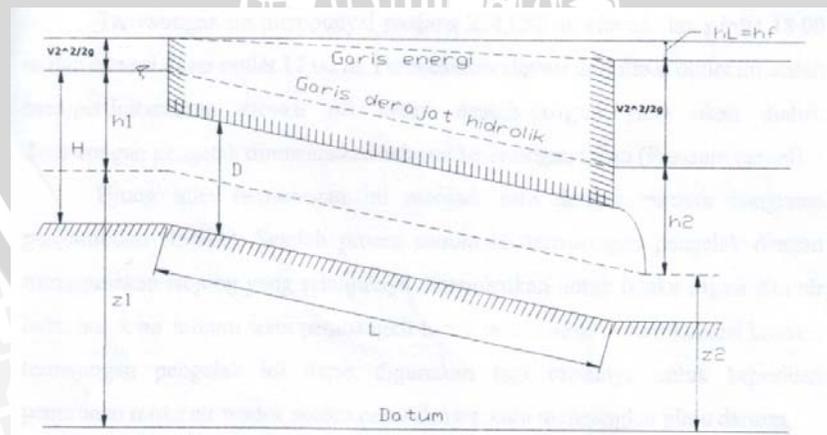
$$A = \pi R^2 - R^2 \left[\frac{\theta\pi}{180} - \sin \theta \cdot \cos \theta \right] \quad (2-9)$$

$$P = 2\pi R \left(1 - \frac{2\theta}{360} \right) \quad (2-10)$$

$$B = 2 R \sin \theta \quad (2-11)$$

b. Kondisi Aliran Tertekan(Pressure Flow)

Aliran tertekan (*Pressure flow*) terjadi apabila terowongan tenggelam, dimana $H/D > 1,2$ (Suyono Sosrodarsono dan Kensaku Takeda, 1989)



Gambar 2.3 Diagram Kondisi Aliran Tekan

dengan :

D = diameter terowongan

H = tinggi air di muka inlet

berlaku persamaan:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h}{\sum f}} \quad (2-12)$$

$$Q = A \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h}{\sum f}} \quad (2-13)$$

$$\sum f = f_e + f_g + f_c + f_b + f_o \quad (2-14)$$

Rumus Kontinuitas :

$$Q = A \cdot V \quad (2-15)$$

Rumus Bernoulli :

$$Z_1 + h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (2-16)$$

2.2 Perencanaan Terowongan Pengelak

2.2.1 Umum

Bangunan pengelak yang direncanakan berupa terowongan tunggal dengan konstruksi dari beton bertulang berbentuk lingkaran. Ujung inlet terowongan ini menjadi satu dengan menara bangunan pengambilan (*intake*). Setelah proses penutupan terowongan pengelak dengan menggunakan stoplog, yang selanjutnya dimanfaatkan untuk saluran pengambilan.

Spesifikasi terowongan bentuk lingkaran:

Tipe	: Terowongan
Panjang	: 371 m
Bendungan Pengelak	: Timbunan batu
Elevasi Puncak Cofferdam	: El. +57.00 m
Elevasi Dasar Sungai	: El. +43.00 m
Kemiringan terowongan	: 0.0243
Elevasi Inlet	: El. +43.00 m
Elevasi Outlet	: El. +34.00 m

2.2.2 Analisa Topografi

Pada perencanaan pembangunan suatu konstruksi terowongan data topografi berperan penting terutama bagi penentuan letak dan rute kedudukan terowongan. Serta sebagai faktor yang mempengaruhi pemilihan jenis konstruksi yang sesuai untuk terowongan tersebut.

Data topografi dapat diperoleh melalui pengukuran dan pengamatan langsung di lapangan ataupun dengan melihat pola garis ketinggian permukaan tanah (kontur) dari peta kontur yang ada.

2.2.3 Analisa Geologi

Selain kondisi topografi, dalam merencanakan dimensi terowongan yang perlu diperhatikan adalah struktur geologi lokasi kedudukan terowongan. Hal ini berkaitan dengan beban yang bekerja pada dinding terowongan. Setelah hasil perhitungan, jika beban yang bekerja berat, maka sisi bagian atasnya harus dibuat lengkung atau seperti kurva linier.

2.2.4 Analisis Stabilitas Konstruksi Terowongan

Analisis stabilitas konstruksi terowongan didasarkan pada kombinasi gaya yang bekerja pada bangunan. Pembebanan tersebut ditinjau terhadap kondisi:

1. pada saat air kosong
2. pada saat air penuh.

Gaya-gaya yang bekerja merupakan gaya aksi yang berarah ke bawah.

Reaksi yang terjadi dirumuskan :

$$\sigma = \frac{\sum W}{A} \dots\dots\dots(2 - 17)$$

dimana:

- σ = tegangan yang terjadi (kg/m²)
- ΣW = jumlah gaya yang bekerja (kg)
- A = luas (m²)

Konstruksi dianggap aman jika tegangan (σ) yang terjadi lebih kecil dari tegangan ijin ($\bar{\sigma}$). Nilai-nilai tegangan ijin tercantum pada tabel 2.2

Tabel 2.2 Tegangan Ijin Berbagai Jenis Batuan.

No	Sifat Batuan	Macam Batuan	Tegangan ijin (kg/cm ²)
1	Batuan lunak	Batu gamping, Lanau, Lempung, Tufa, Napal	4 – 8
2	Batuan sedang	Braksi, pasir, konglomerasi, aglomerat	8 – 16
3	Batuan keras	Basalt, adrenat, granit	16 - 50

Sumber : Sunggono, 1995

2.2.5 Penulangan Konstruksi Dinding Terowongan

Metode yang digunakan adalah metode elastis dimana tidak boleh ada retakan yang terjadi pada konstruksi. Metode ini sangat cocok digunakan untuk bangunan-bangunan air karena dapat mencegah rembesan air. Pelaksanaan konstruksi antara lain membangun *conduit* pengelak setelah penggalian lapisan *colufial* hingga mencapai tanah keras, setelah proses pembetonan *conduit* selesai, dilanjutkan dengan *grouting* di bawah *conduit*.

Pedoman yang digunakan dalam perhitungan penulangan adalah peraturan standart perencanaan beton bertulang SNI03–2847–2002. Pada metode ini, struktur direncanakan berdasarkan beban kerja. Adapun langkah-langkah perencanaan beton bertulang / penulangan pada pelat adalah sebagai berikut :

1. Merencanakan mutu beton (f_c') dan mutu baja (f_y) yang akan digunakan sesuai dengan kondisi dari suatu konstruksi.
2. Menghitung pembebanan yang bekerja pada dinding terowongan, baik beban mati maupun beban hidup.
3. Menentukan tebal pembetonan terowongan (t) dan tebal efektif (d) beton (direncanakan dan disesuaikan dengan tebal penutup beton).
4. Menghitung statika pembebanan dan momen yang terjadi pada konstruksi terowongan berdasarkan teori *Column Analogy*.
5. Memilih diameter tulangan
Berdasarkan hasil perhitungan kebutuhan luas tulangan pelat (buku grafik dan tabel perhitungan beton bertulang W.C VIs D Gideon K.1993), dengan syarat luasan yang dipakai harus lebih besar dari luas perlu hasil perhitungan.
6. Kontrol gaya berdasarkan jenis penulangan yang menentukan.

2.2.6 Elemen struktur plat pada teori *Column Analogy*.

Analisa yang dilakukan terowongan pengelak berikut menggunakan asumsi teori dasar regangan bidang (*plane strain action*). Sedangkan untuk perhitungan dan analisa pembebanan, distribusi momen, pemodelan statika pada struktur terowongan, serta perilaku perpindahannya (*displacement*) mengacu pada teori *Column Analogy*.

Teori *Column Analogy* digunakan untuk menganalisis suatu bentukan *plane frame* lengkung tertutup, dimana strukturnya termasuk statis tak tentu dengan derajat kurang dari tiga. Analisis yang digunakan adalah metode gaya, dengan suatu *redundant* dipilih pada suatu titik yang disebut *clastic center*, dan menyertakan perhitungan seperti pada analisa *column cross section* tertekan, guna mengkombinasikan gaya momen yang terjadi dengan gaya normalnya. (Ghali, 2003)

Pada kasus biasa teori *Column Analogy* ini pada umumnya digunakan untuk menghitung gaya tekan atau tegangan dalam pada balok dan tumpuan, namun pada kasus-kasus khusus seperti dalam pembahasan ini dapat juga digunakan untuk menganalisa struktur bidang elastis, menghitung efek deformasi yang disebabkan oleh longitudinal stress dan gaya geser pada batang yang meringkai dan pada batang-batang rangka.

Langkah-langkah dengan menggunakan metode *Column Analogy* ini adalah sebagai berikut:

1. Dari sistim statis tak tentu pilih sistim dasar dan gaya redundant.
2. Hitung momen akibat beban pada sistim dasar (Mq).
3. Buat penampang kolom analogi dengan geometri sama dengan geometri struktur dan tebal berbanding terbalik dengan EI .
4. Hitung besaran-besaran penampang kolom analogi (A, I_x, I_y, I_{xy}).
5. Jadikan diagrammomen akibat beban dibagi EI sebagai “beban” kolom analogi dan hitung tegangan yang ditimbulkan. Sebut tegangan ini M_R .
6. Diagram momen akhir adalah $M = Mq - M_R$.

Perjanjian tanda:

- Beban pada kolom analogi tekan jika Mq bertanda positif (menyebabkan serat luar tertekan)
- Tegangan tekan pada kolom analogi identik dengan M_R positif dan sebaliknya tegangan tarik identik dengan M_R negative
- Tanda momen akhir sama dengan tanda Mq

2.2.7 Kombinasi Aksial dan Lentur

Dalam perencanaan menggunakan *column analogy* ini, plat yang membentuk konstruksi terowongan ini dibagi dalam beberapa bagian (*section*) untuk mempermudah dalam perencanaan baik analisis maupun penulangannya. Analisa perencanaannya mengacu pada dua kondisi, yaitu :

1. Kekuatan kolom pendek yang dibebani secara konsentrik

Kekuatan kolom pendek yang dibebani secara konsentrik terbagi atas komponen sumbangan beton dan sumbangan baja, yaitu sebagai berikut : (Iswandi Imran, 2000)

$$P_c = 0,85 f_c' (A_g - A_{st}) \dots\dots\dots (2-18)$$

$$P_s = f_y A_{st} \dots\dots\dots (2-19)$$

Keterangan :

A_{st} : luas total tulangan baja, yaitu $A_s + A_s'$

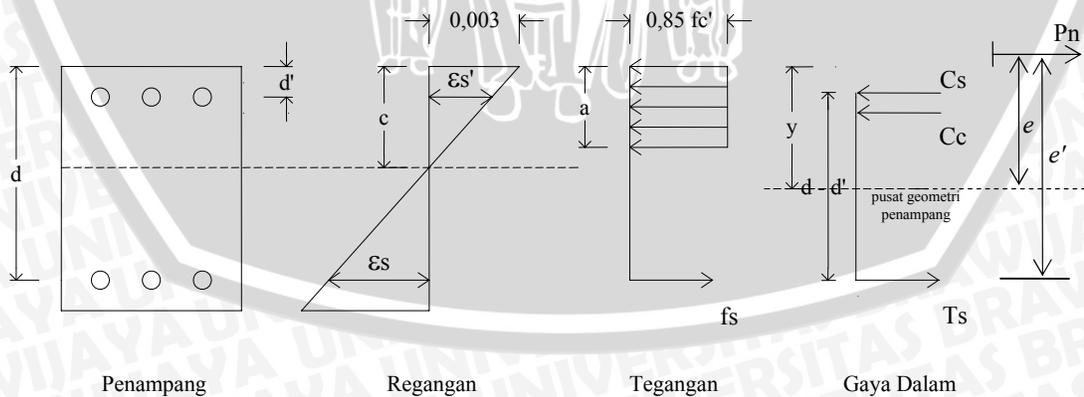
A_g : luas total penampang kotor

Penggunaan nilai 0,85 dalam perhitungan kekuatan kolom didasari atas adanya perbedaan kekuatan tekan beton pada elemen struktur aktual terhadap kuat tekan beton silinder, yaitu :

$$f_{co}' = 0,85 f_c' \dots\dots\dots (2-20)$$

2. Kekuatan kolom pendek yang dibebani secara eksentrik

Prinsip blok tegangan persegi ekuivalen yang berlaku pada analisis balok dapat juga diterapkan pada analisis kolom terhadap beban eksentrik. (Gambar 2.4)



Gambar 2.4. Distribusi Tegangan pada Penampang Kolom

(Sumber : Iswandi Imran, 2000)

Keterangan gambar :

o Regangan

$$\epsilon_s = 0,003 \frac{d - c}{c} \dots\dots\dots (2-21)$$

$$\epsilon_s' = 0,003 \frac{c - d'}{c} \dots\dots\dots (2-22)$$

o Tegangan

$$f_s' = E_s \epsilon_s' \leq f_y \dots\dots\dots (2-23)$$

$$f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y \dots\dots\dots (2-24)$$

o Gaya Dalam

$$C_c = 0,85 f_c' b a \dots\dots\dots (2-25)$$

$$C_s = A_s' f_s' \dots\dots\dots (2-26)$$

$$T_s = A_s f_s \dots\dots\dots (2-27)$$

Persamaan keseimbangan untuk penampang kolom disyaratkan sebagai berikut (SNI 03-2847-2002)

$$\begin{aligned} P_n &= C_c + C_s - T_s \\ &= 0,85 f_c' b a + A_s' f_s' - A_s f_s \dots\dots\dots (2-28) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_n &= P_n e \\ &= C_c \left(\bar{y} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\bar{y} - d' \right) + T_s \left(d - \bar{y} \right) \\ &= 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot a \left(\bar{y} - \frac{a}{2} \right) + A_s' \cdot f_s' \left(\bar{y} - d' \right) + A_s \cdot f_s \left(d - \bar{y} \right) \dots\dots\dots (2-29) \end{aligned}$$

$$P_n = 0,85 f_c' b a$$

Untuk tulangan simetris A_s 's dapat diganti dengan A_s .

Karena $a = P_n / 0,85 f_c' b$ dan $y = h/2$ maka diperoleh:

$$P_n e = P_n \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y (d - d')$$

$$P_n e = P_n \left(\frac{h}{2} - \frac{P_n}{1,7 f_c' b} \right) + A_s f_y (d - d')$$

$$\frac{P_n^2}{1,7 f_c' b} - P_n \left(\frac{h}{2} - e \right) - A_s f_y (d - d') = 0$$

Jika

$$\rho = \rho' = As/bd$$

$$P_n = 0,85f'_c b \left[\left(\frac{h}{2} - e \right) + \sqrt{\left(\frac{h}{2} - e \right)^2 + \frac{2Asfy(d-d')}{0,85f'_c b}} \right]$$

Dan jika

$$m = \frac{fy}{0,85f'_c}$$

maka

$$P_n = 0,85f'_c b d \left[\frac{h-2e}{2d} + \sqrt{\left(\frac{h-2e}{2d} \right)^2 + 2m\rho \left(1 - \frac{d'}{d} \right)} \right]$$

Dengan mengganti e (jarak antara pusat plastis dengan titik tangkap gaya) dengan e' (jarak antara tulangan tarik dengan titik tangkap gaya), maka rumus diatas dapat juga ditulis sebagai:

$$P_n = 0,85f'_c b d \left[\left(1 - \frac{e'}{d} \right) + \sqrt{\left(1 - \frac{e'}{d} \right)^2 + 2m\rho \left(1 - \frac{d'}{d} \right)} \right] \dots\dots\dots (2-30)$$

Pada persamaan di atas, jarak netral c diasumsikan berada dalam daerah d penampang sehingga tulangan baja pada lokasi d benar-benar mengalami gaya tekan, dimana gaya aksial P_n tidak boleh lebih besar dari P_n maks. Dari persamaan di atas dapat dilihat bahwa terdapat beberapa parameter yang tidak diketahui, yaitu tinggi blok tegangan ekuivalen (a), f_s' , f_s , dan P_n untuk e tertentu atau e untuk P_n tertentu. Nilai f_s' dan f_s dapat dinyatakan dalam a , sehingga tinggal dua bilangan yang tidak diketahui, yaitu a dan P_n atau a dan e .

Dengan dua persamaan yang ada, kita dapat memecahkan harga a dan e . Seperti disebutkan sebelumnya, jenis keruntuhan yang dapat terjadi pada kolom pendek adalah leleh tulangan tarik dan keruntuhan tekan, hal ini digunakan untuk menentukan jenis tulangan yang menentukan. Kondisi *balance* tercipta jika keruntuhan terjadi bersamaan pada tulangan tarik dan beton tekan. Jika P_u adalah beban aksial dan P_{nb} adalah beban aksial yang berkaitan dengan keruntuhan *balance*, maka :

- $P_u < P_{nb} \rightarrow$ tulangan tarik menentukan
- $P_u = P_{nb} \rightarrow$ jenis keruntuhan *balance*
- $P_u > P_{nb} \rightarrow$ tulangan tekan menentukan

Prosedur analisis untuk penampang kolom adalah sebagai berikut :

1. Untuk P_u dan M_u yang bekerja pada penampang, hitung $e = \frac{M_u}{P_u}$
2. Asumsikan rasio luas tulangan dengan luas penampangnya (antara 1% – 8%)
3. Hitung P_{nb} untuk penampang yang diasumsikan tersebut dan tentukan jenis tulangan yang menentukan.
4. Kontrol apakah penampang cukup memadai (aman dan ekonomis).
Asumsikan penampang baru jika penampang tidak memadai.
5. Desain tulangan lateral.

2.2.8 Software STAAD Pro untuk analisis struktur

STAAD Pro adalah paket program yang digunakan untuk menganalisis dan mendesain struktur. STAAD Pro menggunakan teknologi yang modern dalam rekayasa elemen hingga, dengan input data berbasis *object oriented*. Kelebihan dari penggunaan GUI (*Graphical User Interface*) dirancang untuk mempermudah penggunaan aplikasi oleh pemakai.

Elemen mayor pada interface STAAD Pro sesuai dengan GUI (*Graphical User Interface*) dari STAAD Pro pada gambar 2.1 yaitu :

- Pulldown menu
Gunanya untuk mengakses ke semua fasilitas dari STAAD Pro.
- Toolbar menu
Toolbar berguna untuk mengakses perintah yang sering digunakan. Dapat juga membuat customized toolbar sendiri.
- Main window
Yaitu layer tempat bekerja, dimana model dan hasil analisis akan ditampilkan.
- Page menu

Yaitu sekumpulan tab yang letaknya paling kiri dari layar. Setiap page control mempunyai perintah spesifik yang akan memudahkan dalam pemodelan dan verifikasi hasil analisa. Organisasi dari tab-tab tersebut menggambarkan operasi berurutan dari atas ke bawah. Setiap tab mempunyai nama spesifik dan icon tersendiri untuk memudahkan pengerjaan.

- Data area

Pada bagian kanan dari layer disebut dengan Data Area, dimana dialog box, table, list box, akan ditampilkan berbeda, tergantung dari operasi yang dilakukan.

2.2.8.1 INPUT

STAAD Pro menyediakan input data melalui *input/command file* dan *Graphical User Interface* atau kombinasi antara keduanya. *Input/command file* merupakan file text yang mengandung serangkaian perintah bahasa inggris yang mengandung instruksi atau data menyangkut analisa maupun desain struktur. Input data pada program STAAD Pro meliputi tipe struktur, unit system, geometri struktur, spesifikasi batang, jenis tumpuan, pembebanan, tipe analisa dan parameter desain struktur. (Anonimous,2005)

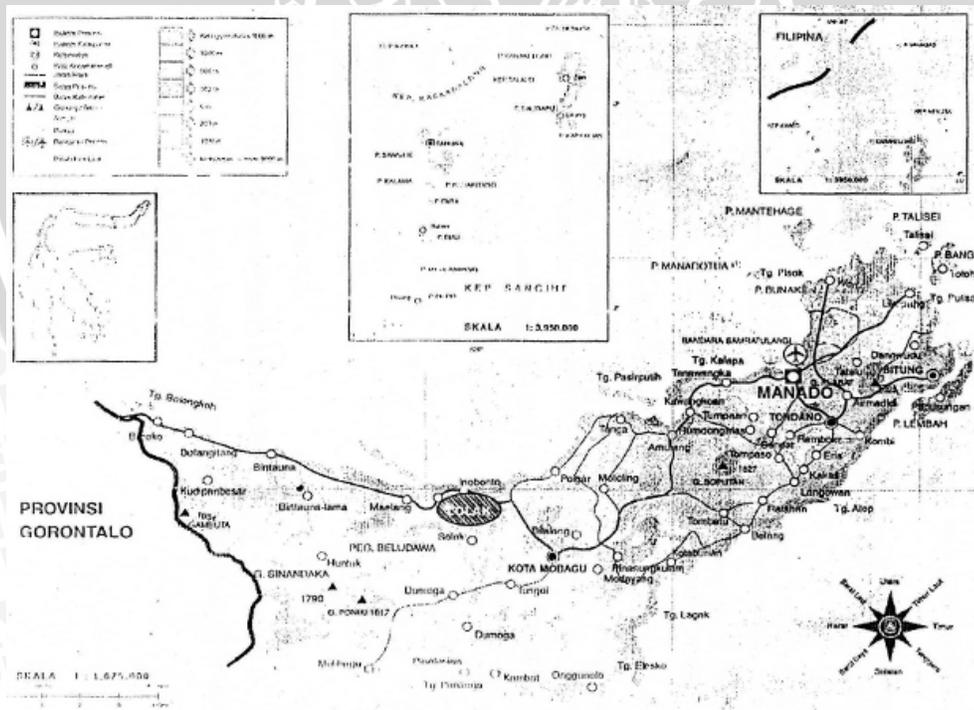
2.2.8.2 OUTPUT

Setelah proses analisa, STAAD Pro menghasilkan output file. File ini menyajikan informasi akurat apabila analisa dilakukan dengan benar. Pada output file akan tampak laporan apabila ada kesalahan dalam input maupun prosesnya. STAAD Pro juga menyediakan fasilitas verifikasi maupun visualisasi, sehingga dapat menyajikan hasil dalam bentuk gambar dan mencocokkannya dengan output file.(Anonimous,2005).

BAB III METODOLOGI STUDI

3.1 Gambaran daerah studi

Bendungan Lolak terletak di Kecamatan Lolak Kabupaten Bolaang Mongondow Propinsi Sulawesi dengan letak geografis terletak antara 0° 36' – 0° 48' LU dan 123° 57' – 124° 04' BT yang terletak di sebelah barat kota Manado dan jarak antara studi ke Manado ±225 km. Luas seluruh DAS Sungai Lolak adalah sekitar 73,11 km². Dengan adanya Bendungan Lolak diharapkan dapat mengairi lahan pertanian potensial yang luasnya mencapai 2000 Ha, juga untuk memenuhi kebutuhan air baku penduduk disekitar bendungan. Pembangunan Bendungan Lolak ini juga sebagai wujud nyata dalam menindak lanjuti Usaha Pemerintah dalam pembangunan Sektor pertanian untuk meningkatkan Produktifitas Pangan Nasional.



Gambar 3.1. Peta Lokasi Pekerjaan

3.2 Pengumpulan Data

Laporan Topografi, Geologi dan Hidrologi diperoleh dari PT. Sapta Adhi Pratama. Laporan topografi berguna sebagai sumber informasi keadaan topografi pada daerah proyek bendungan dengan melihat pola garis ketinggian pada permukaan tanah. Laporan geologi berkaitan dengan keadaan batuan atau struktur tanahnya sehingga dapat diketahui beban yang bekerja pada dinding terowongan. Laporan hidrologi secara umum dilakukan guna mendapatkan karakteristik hidrologi dan meteorologi daerah pengaliran sungai. Studi ini digunakan untuk mengetahui karakteristik hujan, debit atau potensi air, baik yang ekstrim maupun yang wajar yang akan digunakan sebagai dasar analisis selanjutnya dalam pekerjaan detail design.

3.3 Perhitungan Hidrolika Terowongan

Menentukan debit aliran dalam terowongan tergantung pada karakteristik hidrolis dari aliran yang terjadi yaitu pada kondisi aliran bebas, aliran tertekan sebagian dan aliran tertekan penuh. Untuk selanjutnya dipakai sebagai penentuan dimensi terowongan pengelak.

3.4 Data Teknis Terowongan Pengelak

Adapun data-data teknis yang diperlukan pada perencanaan adalah sebagai berikut:

- Elevasi Dasar Inlet terowong : EL. +43,00
- Elevasi Dasar Outlet terowong : EL. +34,00
- Panjang terowongan : 371 m
- Kemiringan terowongan : 0.0243

3.5 Prosedur Perencanaan Terowongan Pengelak

- a. Analisa Hidrologi
 - Diperoleh dari data sekunder
 - Untuk perencanaan debit yang masuk terowongan
- b. Analisa Topografi
 - Diperoleh dari data sekunder
 - Untuk layout terowongan
- c. Analisa Geologi
 - Struktur geologi berkaitan dengan kondisi geologi perencanaan dan struktur tanah di bawah terowongan
 - Untuk perhitungan pembebanan yang bekerja pada dinding terowongan

Langkah-langkah yang diambil dalam studi ini adalah sebagai berikut :

1. Melakukan studi pustaka untuk mencari teori-teori yang digunakan sebagai penunjang dalam penulisan skripsi ini.
2. Mengumpulkan data-data untuk keperluan analisis, seperti data topografi, geologi dan hidrologi. Data-data ini diperoleh dari PT. Sapta Adhi Pratama.
3. Mengolah data yang dilakukan untuk menentukan dimensi terowongan dengan menggunakan data hidrologi yang telah dianalisis oleh PT. Sapta Adhi Pratama.
4. Setelah menentukan dimensi terowongan maka dapat menganalisis hidrolika, dengan menghitung debit yang masuk ke dalam terowongan melalui inlet, dapat dihitung berdasarkan ketinggian permukaan air di depan bagian hulu. Debit yang masuk ke dalam terowongan terjadi pada 2 kondisi aliran yaitu aliran bebas (*free flow*) dan aliran tertekan (*pressure flow*).
5. Menghitung konstruksi dan pembebanan, dimana kondisi perencanaan konstruksi terowongan direncanakan sama mulai dari inlet sampai outlet.

Batasan kondisi yang digunakan dalam perencanaan adalah :

- Kondisi tanah di atas terowongan adalah berupa tanah lepas (bukan berupa batuan keras / *hard rock*) yang akan segera runtuh apabila terdapat rongga di bawahnya, sehingga konstruksi terowongan didesain

tidak hanya berfungsi untuk mengalirkan air dalam terowongan, namun juga harus mampu menahan beban tanah di atasnya.

- Kondisi 1, Kondisi perencanaan normal sebelum terowongan beroperasi

Beban yang bekerja : beban tanah + beban mati + beban hidup + tekanan aktif horizontal tanah (kondisi normal)

- Kondisi 2, Perencanaan khusus (gempa) sebelum terowongan beroperasi

Beban yang bekerja : beban tanah + beban mati + beban hidup + tekanan aktif horizontal tanah (kondisi gempa)

- Kondisi 3, kondisi pada saat pengoperasian sebagai terowongan pengelak (kondisi aliran bebas)

Beban yang bekerja : beban tanah + beban mati + beban hidup + tekanan aktif horizontal tanah + tekanan air ketika belum penuh (separuh penampang)

- Kondisi 4, kondisi pada saat pengoperasian sebagai terowongan pengelak (kondisi terowongan penuh air)

Beban yang bekerja : beban tanah + beban mati + beban hidup + tekanan aktif horizontal tanah + tekanan air kondisi penuh

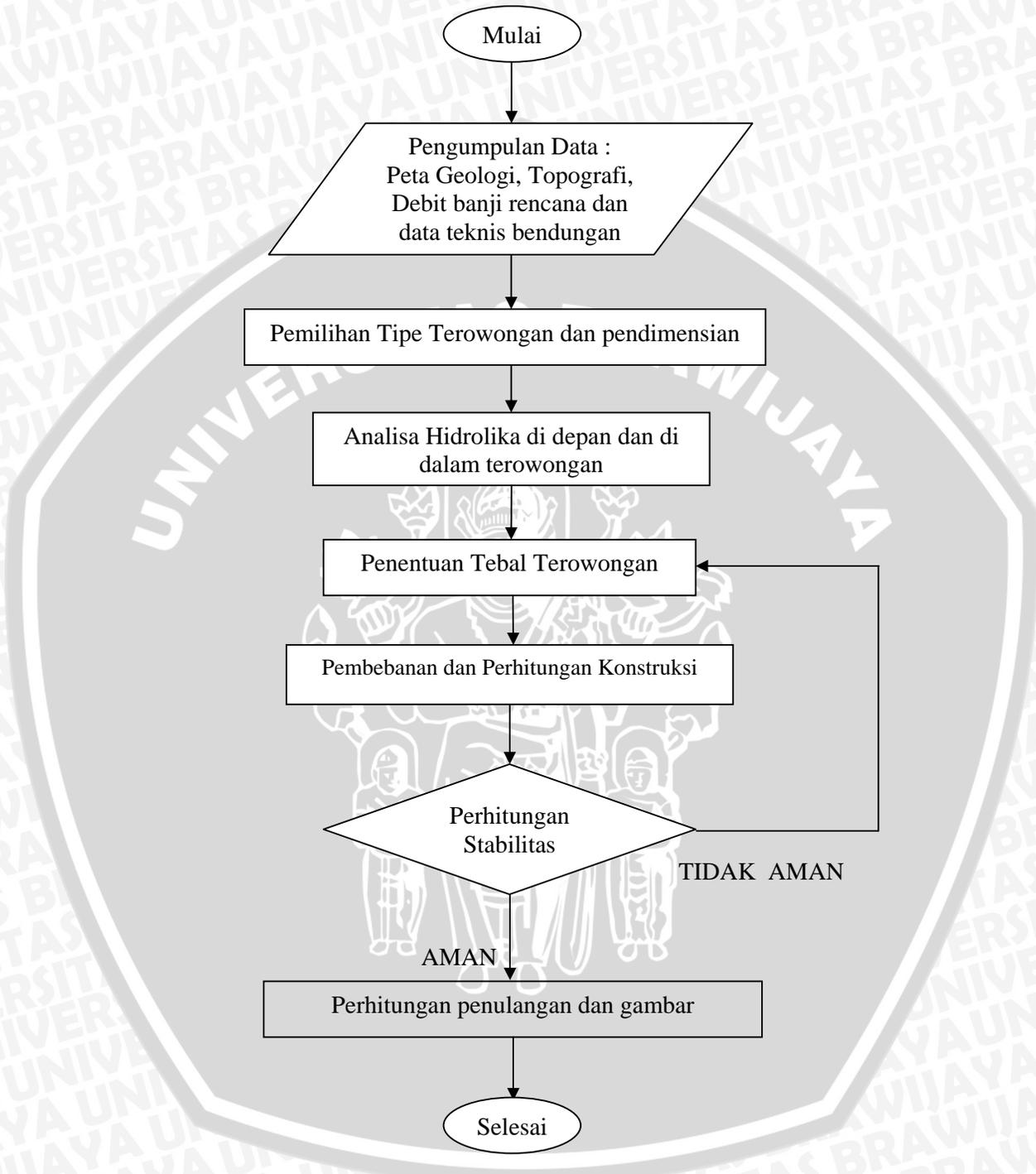
- Kondisi 5, kondisi pada saat pengoperasian sebagai terowongan pengelak (kondisi terowongan penuh air) ketika terjadi gempa

Beban yang bekerja : beban tanah + beban mati + beban hidup + tekanan aktif horizontal tanah (kondisi gempa) + tekanan air kondisi penuh

Kemudian dilakukan perhitungan konstruksi dan pembebanan terowongan dengan analisis *Column Analogy*

6. Kontrol Stabilitas Konstruksi Terowongan. Jika aman maka dapat diteruskan pada proses pengerjaan penulangan dan gambar, tetapi jika tidak aman maka harus ditinjau kembali pemilihan tipe terowongan dan pendimensian ulang.

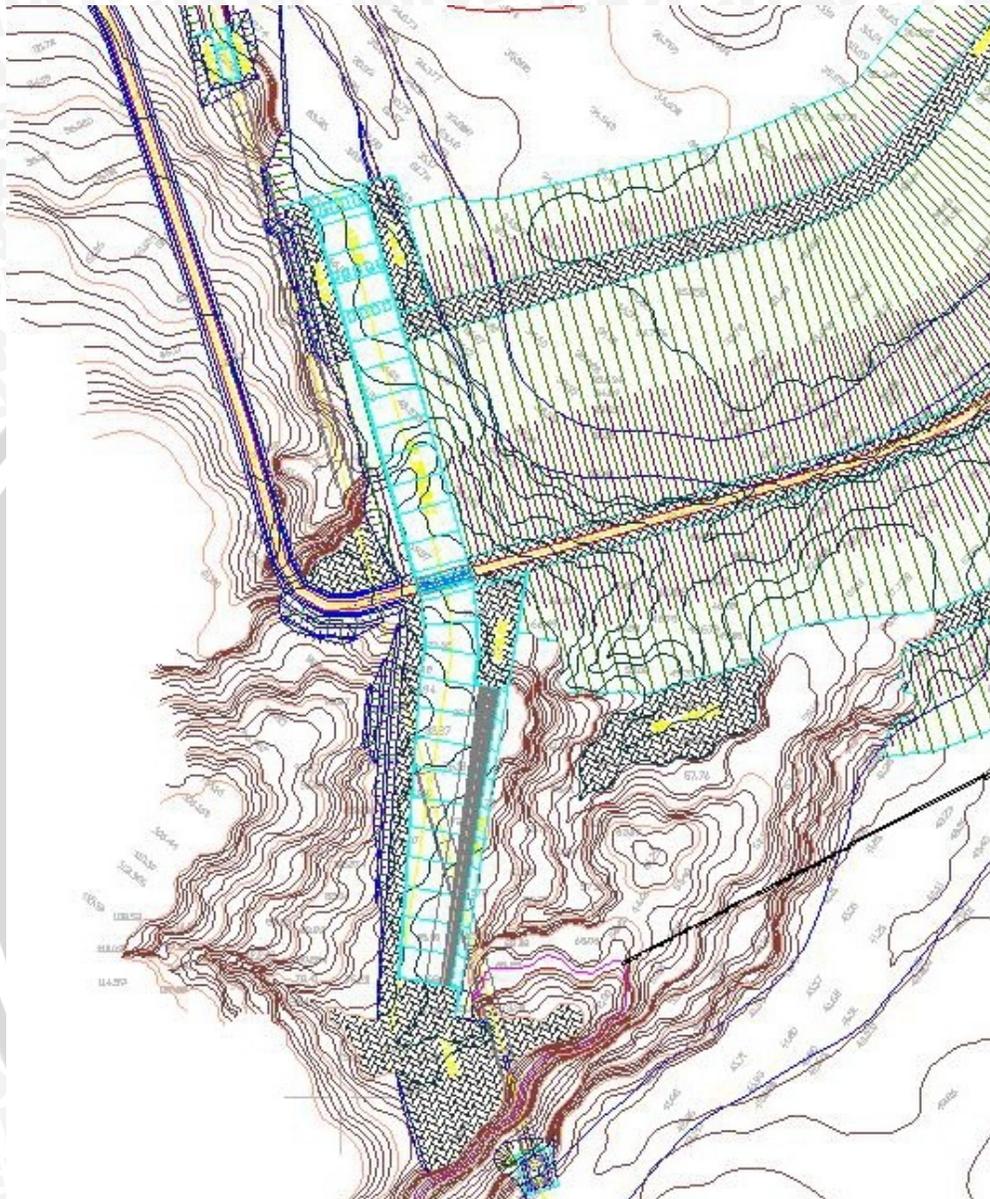
3.6 Flowchart



Gambar 3.2 Diagram Alur Pengerjaan Skripsi



Site Plan Bendungan Lolak di Kabupaten Bolaang Mongondow



Gambar 3.3 Site Plan Bendungan Lolak



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Perencanaan

Data perencanaan pada proyek terowongan pengelak bendungan Lolak :

a. Data Teknis

Tipe Terowongan	: Lingkaran
Elevasi Dasar Inlet Pengelak	: EL. 43,00 m
Elevasi Dasar Outlet Pengelak	: EL. 34,00 m
Kemiringan terowongan	: 0,0243
Panjang terowongan	: 371,00 m

b. Data Topografi dan Geologi

- Jenis tanah permukaan = Gravelly Silt
- Terzaghi's rock class = IV
- $\gamma_{\text{wet tanah}} = 19,5 \text{ kN/m}^3 = 1,95 \text{ t/m}^3$
- Kadar air $\omega = 15 \%$
- $\gamma_{\text{sat tanah}} = 20,0 \text{ kN/m}^3 = 2,0 \text{ t/m}^3$
- $\gamma_{\text{concrete}} = 2,4 \text{ t/m}^3$
- ϕ_1 (sudut geser) = $34,7^\circ$
- Poisson's ratio $\nu = 0,25$
- Kohesi tanah = $2,5 \text{ t/m}$

c. Karakteristik material beton

- Mutu beton f_c' = $350 \text{ kg/cm}^2 = 35 \text{ Mpa}$
- Tegangan geser beton = $1/6 \sqrt{f_c'} = 0,986 \text{ Mpa}$
= $9,86 \text{ kg/cm}^2$
- Tegangan torsi leleh beton = $1/24 \sqrt{f_c'} = 0,2465 \text{ Mpa}$
= $2,465 \text{ kg/cm}^2$

Karakteristik material baja

- Mutu baja f_y (deform/ulir) = 400 Mpa = 4000 kg/cm²
- Mutu baja f_y (polos) = 240 Mpa = 2400 kg/cm²
- Tegangan leleh baja polos(plastis)= 2400 kg/cm²
- Tegangan ijin tarik baja (elastis) = 0.667 f_y = 0.667 . 240 Mpa
= 160 Mpa = 1600 kg/cm²
- Tegangan ijin tekan baja (elastis) = 1600 kg/cm²

d. Modulus Elastisitas dan Rasio Poisson

- Poisson Ratio Beton, ν_c = 0.3
- Modulus Elastisitas Beton, E_c = $4700 \sqrt{f_c}$
= $4700 \sqrt{35}$ MPa = 27805,575 MPa
= 278055,75 kg/cm²
- Poisson Ratio Baja, ν_s = 0.25
- Modulus Elastisitas Baja, E_s = $2.1 \cdot 10^6$ kg/cm²

Terowongan ini direncanakan pada dua kondisi pengaliran, yaitu aliran bebas (*free flow*) dan aliran tertekan (*pressure flow*)

4.2 Penentuan Dimensi Terowongan

Terowongan direncanakan berpenampang Lingkaran dari inlet sampai outlet. Sebagai alternatif perencanaan terowongan pengelak, dimensi terowongan ditentukan $D = 5$ m. Desain perencanaan terowongan pengelak ini direncanakan untuk banjir rancangan dengan kala ulang 25 tahunan, sehingga diperoleh debit banjir rancangan maksimum 25 tahunan yang akan melalui terowongan sebesar 259,70 m³/dt. Dari debit tersebut dilakukan perhitungan penelusuran banjir melalui terowongan, analisisnya dilakukan ketika kondisi alirannya bebas ataupun kondisi maksimum aliran tekan dalam terowongan.

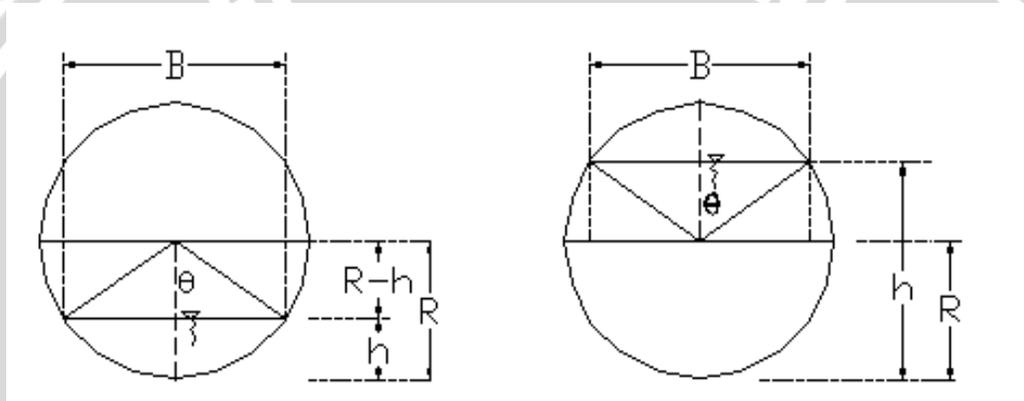
4.3 Perhitungan Hidraulika

Untuk mengetahui karakter aliran dalam terowongan maka harus diketahui tinggi permukaan air di bagian pemasukan. Elevasi dasar inlet pengelak +43 m diatas muka air laut. Debit yang akan mengalir ke dalam terowongan tergantung pada ketinggian air di depan lubang pemasukkan.

4.3.1 Aliran bebas (Free Flow)

Pada kondisi ini terowongan belum terisi penuh. Debit yang mengalir ke dalam terowongan tergantung dari muka air di bagian pemasukan.

Langkah-langkah perhitungan sebagai berikut :



Gambar 1

Gambar 2

a. Untuk h di bawah setengah lingkaran, persamaan yang digunakan :

Misalkan h = 1,25 m

1. Menghitung sudut (θ) dengan persamaan (2-18)

$$\theta = \text{arc. cos} \left[\frac{2,5 - 1,25}{2,5} \right] = 60^\circ$$

2. Menghitung luas penampang (A) dengan persamaan (2-15)

$$A = 2,5^2 \left[\frac{.60.\pi}{180} - \sin 60. \cos 60 \right] = 3,835 m^2$$

3. Menghitung keliling basah (P) dengan persamaan (2-16)

$$P = \left[\frac{2.60.\pi 2,5}{180} \right] = 5,233 m$$

4. Menghitung lebar penampang (B) dengan persamaan (2-17)

$$B = 2.2,5 \sin 60 = 4,33m$$

5. Menghitung jari-jari hidrolis (R) dengan persamaan (2-2)

$$R = A/P = 3,853/5,233 = 0,736m$$

6. Menghitung kecepatan (V) dengan persamaan (2-1)

$$V = \frac{1}{0,014} \times 0,736^{2/3} \times 0,0243^{1/2} = 9,077m / \text{det}$$

7. Menghitung debit (Q) dengan persamaan (2-3)

$$Q = 3,853 \cdot 9,077 = 34,972m^3 / \text{det}$$

- b. Untuk h di atas setengah lingkaran, persamaan yang digunakan :

1. Menghitung sudut (θ) dengan persamaan (2-18)

$$\theta = \arccos \left[\frac{4,5 - 2,5}{2,5} \right] = 36,87^\circ$$

2. Menghitung luas penampang (A) dengan persamaan (2-15)

$$A = \pi \cdot 2,5^2 - 2,5^2 \left[\frac{36,87\pi}{180} - \sin 36,87 \cdot \cos 36,87 \right] = 18,613m^2$$

3. Menghitung keliling basah (P) dengan persamaan (2-16)

$$P = 2\pi \cdot 2,5 \left[1 - \frac{2 \cdot 36,87}{360} \right] = 12,49m$$

4. Menghitung lebar penampang (B) dengan persamaan (2-17)

$$B = 2.2,5 \cdot \sin 36,87 = 3m$$

5. Menghitung jari-jari hidrolis (R) dengan persamaan (2-2)

$$R = A/P = 18,613/12,49 = 1,49m$$

6. Menghitung kecepatan (V) dengan persamaan (2-1)

$$V = \frac{1}{0,014} \times 1,49^{2/3} \times 0,0243^{1/2} = 14,526m / \text{det}$$

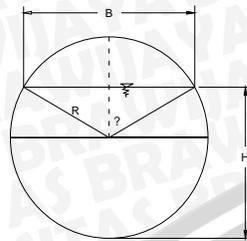
7. Menghitung debit (Q) dengan persamaan (2-3)

$$Q = 18,61 \cdot 14,526 = 270,32m^3 / \text{det}$$

Diperoleh Q_{banjir} pada saat kondisi aliran bebas sebesar $270,32 \text{ m}^3/\text{dtk}$

Karena $Q_{\text{max.rencana}} >$ dari Q_{banjir} maka dimensinya masih mencukupi.

Perhitungan karakteristik aliran terowongan pada kondisi aliran bebas dapat dilihat pada tabel 4.5



$D = 5 \text{ m}$

$n = 0,014$

$R = 2,5 \text{ m}$

El.inlet = + 43,00 m

$L = 371,00 \text{ m}$

El.outlet = + 34,00 m

$S = 0,0243$

- Keterangan :
- P = keliling basah (m)
 - A = luas penampang basah (m²)
 - B = lebar permukaan air (m)
 - r = jari-jari lingkaran (m)
 - θ = sudut antara garis tengah lingkaran dengan muka air

Tabel 4.1 Kapasitas Pengaliran Saat Kondisi Aliran Bebas

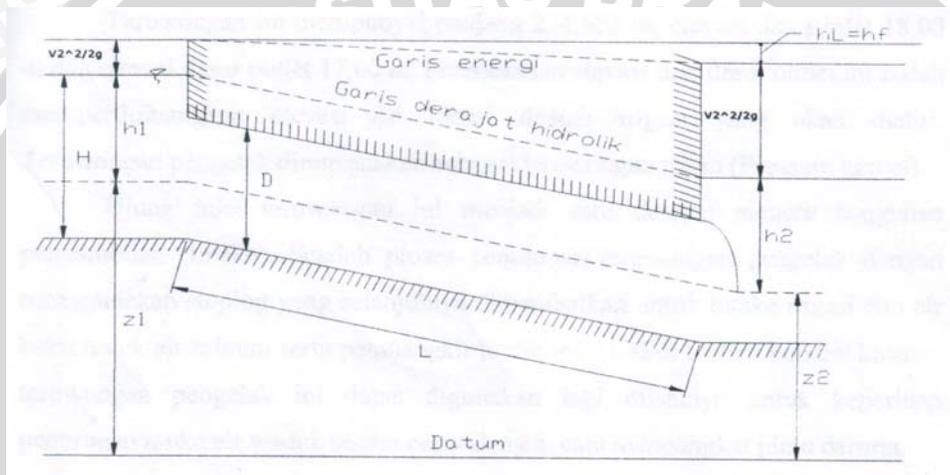
h (m)	El. (m)	θ (°)	sin θ	cos θ	B (m)	P (m)	A (m ²)	R (m)	V(m/det)	Q (m ³ /det)
0.5	43.5	36.870	0.6	0.8	3	3.218	1.022	0.318	5.183	5.297
1	44	53.130	0.8	0.6	4	4.636	2.796	0.603	7.947	22.216
1.25	44.25	60	0.866	0.5	4.33	5.233	3.835	0.736	9.077	34.972
1.5	44.5	66.422	0.917	0.4	4.583	5.796	4.954	0.855	10.028	49.681
2	45	78.463	0.980	0.2	4.899	6.847	7.334	1.071	11.657	85.492
2.5	45.5	90	1	0	5	7.854	9.817	1.250	12.921	126.847
3	46	78.463	0.980	0.2	4.899	8.861	12.301	1.388	13.856	170.442
3.5	46.5	66.422	0.917	0.4	4.583	9.912	14.681	1.481	14.468	212.403
4	47	53.130	0.8	0.6	4	11.071	16.839	1.521	14.726	247.978
4.5	47.5	36.870	0.6	0.8	3	12.490	18.613	1.490	14.527	270.387

4.3.2 Aliran tertekan (*Pressure Flow*)

Pada kondisi ini terowongan terisi penuh, debit yang masuk tergantung dari tinggi muka air yang di bagian pemasukan.

1. f_e = koefisien kehilangan energi yang besarnya tergantung bentuk inlet = 0,5
2. f_r = koefisien kehilangan energi akibat kekasaran penampang = 1,484
3. f_o = koefisien kehilangan energi di outlet = 0
4. f_b = koefisien kehilangan energi akibat belokan = 0
5. f_p = koefisien kehilangan energi akibat perubahan penampang = 0

$$\Sigma f = 0,5 + 1,484 + 0 + 0 + 0 = 1,984$$



Gambar 4.1 Diagram Kondisi Aliran Tertekan

Pada kondisi ini terowongan terisi penuh. Debit yang mengalir ke dalam terowongan tergantung dari muka air di bagian pemasukkan, untuk mencari debit pada waktu aliran tertekan dicari debit terbesar yaitu pada saat h setinggi muka air banjir maksimum yaitu pada saat El +54,19 m. Langkah-langkah perhitungannya sebagai berikut:

Kondisi muka air pada $H > 1,2D$ ($H = 6$ m)

1. Menentukan elevasi muka air minimum

$$\begin{aligned} \text{El. MA} &= \text{El. Dasar saluran} + H \\ &= 43,00 + 6 \\ &= 49 \text{ m} \end{aligned}$$

2. Menghitung beda tinggi air (h)

$$\begin{aligned} h &= H + \text{Beda tinggi outlet dan inlet} - \text{Titik pusat penampang outlet} \\ &= 6 + 9 - 2,5 = 12,5 \text{ m} \end{aligned}$$

3. Menghitung luas penampang A

$$A = \frac{1}{4} \pi \times D^2 = 19,635 \text{ m}^2$$

4. Menghitung kecepatan (V)

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h}{\sum f}}$$

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 12,5}{2,984}}$$

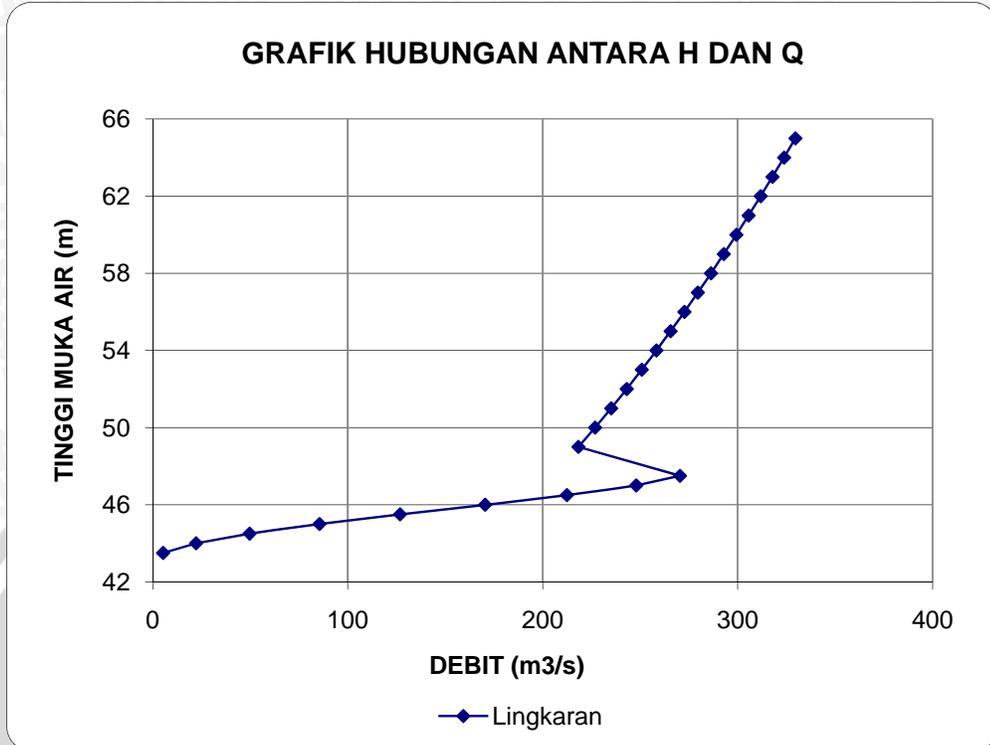
$$= 11,118 \text{ m/dtk}$$

5. Menghitung Debit (Q)

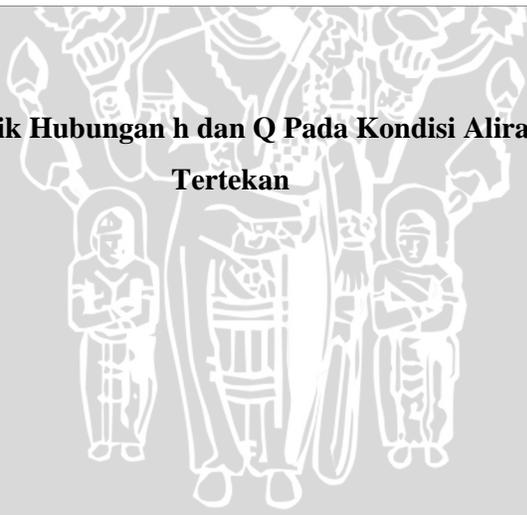
$$Q = V \times A = 11,118 \times 19,635 = 218,305 \text{ m}^3/\text{det}$$

Tabel 4.2 Kapasitas Pengaliran Saat Kondisi Aliran Tertekan

Elevasi	h (m)	V (m/det)	A (m ²)	Q (m ³ /det)
49	12.5	11.118	19.635	218.305
50	13.5	11.554	19.635	226.869
51	14.5	11.975	19.635	235.122
52	15.5	12.381	19.635	243.094
53	16.5	12.774	19.635	250.813
54	17.5	13.155	19.635	258.302
55	18.5	13.526	19.635	265.579
56	19.5	13.887	19.635	272.663
57	20.5	14.238	19.635	279.567
58	21.5	14.581	19.635	286.304
59	22.5	14.917	19.635	292.887
60	23.5	15.244	19.635	299.325
61	24.5	15.565	19.635	305.627
62	25.5	15.880	19.635	311.802
63	26.5	16.188	19.635	317.857
64	27.5	16.491	19.635	323.799
65	28.5	16.788	19.635	329.633



Gambar 4.2 Grafik Hubungan h dan Q Pada Kondisi Aliran Bebas dan Tertekan



Tabel 4.3 Perhitungan Fungsi Tampang Untuk Penelusuran Banjir Melalui Terowongan Pengelak

No.	Elevasi (m)	H (m)	Q m ³ /det	Q/2 m ³ /det	S Juta m ³	Δ S Juta m ³	Δ S / Δ t m ³ /det	Psi $\psi = \frac{\Delta S}{\Delta t} - \frac{Q}{2}$ (m ³ /det)	Phi $\phi = \frac{\Delta S}{\Delta t} + \frac{Q}{2}$ (m ³ /det)
1	43	-	-	-	0.04	-	-	-	-
2	43.50	0.50	5.30	2.65	0.05	0.01	3.32	0.67	5.97
3	44.00	1.00	22.22	11.11	0.07	0.03	7.49	(3.61)	18.60
4	44.50	1.50	49.68	24.84	0.08	0.05	12.60	(12.24)	37.44
5	45.00	2.00	85.49	42.75	0.11	0.07	18.72	(24.03)	61.46
6	45.50	2.50	126.85	63.42	0.13	0.09	25.91	(37.52)	89.33
7	46.00	3.00	170.44	85.22	0.16	0.12	34.24	(50.98)	119.47
8	46.50	3.50	212.40	106.20	0.20	0.16	43.80	(62.40)	150.00
9	47.00	4.00	247.98	123.99	0.23	0.20	54.65	(69.34)	178.64
10	47.50	4.50	270.39	135.19	0.28	0.24	66.86	(68.34)	202.05
11	49.00	6.00	218.30	109.15	0.44	0.40	112.34	3.18	221.49
12	50.00	7.00	226.87	113.43	0.58	0.54	150.71	37.27	264.14
13	51.00	8.00	235.12	117.56	0.74	0.71	196.12	78.56	313.68
14	52.00	9.00	243.09	121.55	0.93	0.90	249.08	127.53	370.63
15	53.00	10.00	250.81	125.41	1.15	1.12	310.05	184.64	435.45
16	54.00	11.00	258.30	129.15	1.40	1.37	379.46	250.31	508.61
17	55.00	12.00	265.58	132.79	1.69	1.65	457.71	324.92	590.50
18	56.00	13.00	272.66	136.33	2.00	1.96	545.18	408.85	681.51
19	57.00	14.00	279.57	139.78	2.35	2.31	642.18	502.39	781.96
20	58.00	15.00	286.30	143.15	2.73	2.70	748.98	605.83	892.14
21	59.00	16.00	292.89	146.44	3.16	3.12	865.83	719.38	1,012.27
22	60.00	17.00	299.32	149.66	3.61	3.57	992.88	843.22	1,142.54
23	61.00	18.00	305.63	152.81	4.11	4.07	1,130.27	977.45	1,283.08
24	62.00	19.00	311.80	155.90	4.64	4.60	1,278.04	1,122.13	1,433.94
25	63.00	20.00	317.86	158.93	5.21	5.17	1,436.19	1,277.26	1,595.11
26	64.00	21.00	323.80	161.90	5.81	5.78	1,604.64	1,442.74	1,766.54
27	65.00	22.00	329.63	164.82	6.46	6.42	1,783.26	1,618.44	1,948.07

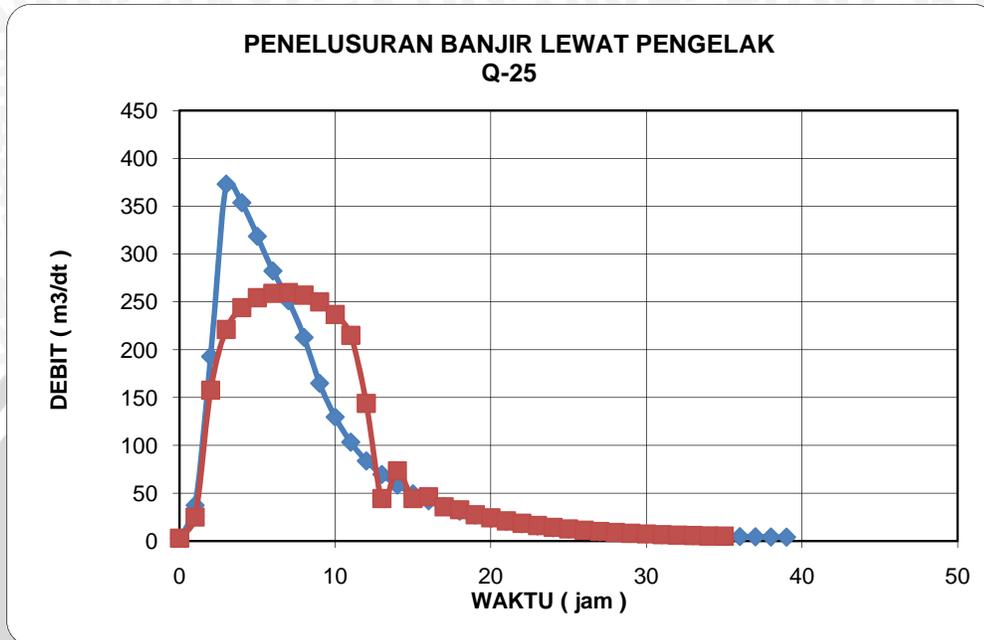
Catatan :

$$S = -0.1117 h^5 + 24.452 h^4 - 1794.1 h^3 + 54648 h^2 - 93912 h$$

Tabel 4.4 Perhitungan Elevasi Muka Air Maksimum dan Outflow Maksimum yang Melalui Terowongan Pengelak

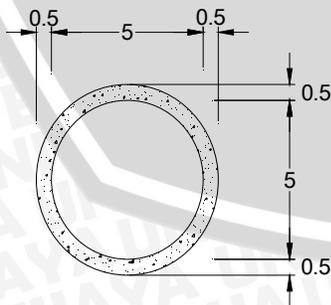
No	Waktu t jam	Inflow I m ³ /det	0,5 (I ₁ + I ₂) m ³ /det	Psi Ψ m ³ /det	Phi φ m ³ /det	Outflow Q m ³ /det	H (m)	Elevasi (m)
1	0	3.00	1.5	0	0	3.00	0.28	43.28
2	1	37.29	20.15	0.38	20.52	25.02	0.16	43.16
3	2	192.91	115.10	-4.49	110.61	157.63	2.85	45.85
4	3	373.17	283.04	-47.02	236.02	221.22	6.34	49.34
5	4	353.75	363.46	14.80	378.26	244.00	9.12	52.12
6	5	318.66	336.21	134.26	470.47	254.40	10.48	53.48
7	6	282.28	300.47	216.07	516.54	259.01	11.10	54.10
8	7	251.26	266.77	257.53	524.30	259.70	11.19	54.19
9	8	212.88	232.07	264.60	496.67	257.08	10.84	53.84
10	9	164.86	188.87	239.59	428.46	249.98	9.89	52.89
11	10	129.55	147.21	178.48	325.69	236.80	8.21	51.21
12	11	103.33	116.44	88.89	205.33	215.06	5.62	48.62
13	12	83.66	93.49	7.64	101.13	143.92	2.70	45.70
14	13	69.52	76.59	-42.79	33.80	44.38	1.40	44.40
15	14	58.36	63.94	-10.57	53.37	73.42	1.83	44.83
16	15	49.36	53.86	-20.05	33.80	44.37	1.40	44.40
17	16	42.06	45.71	-10.57	35.14	46.32	1.44	44.44
18	17	36.10	39.08	-11.18	27.90	35.76	1.25	44.25
19	18	31.21	33.65	-7.87	25.79	32.69	1.19	44.19
20	19	27.06	29.14	-6.90	22.23	27.51	1.10	44.10
21	20	23.52	25.29	-5.28	20.01	24.27	1.04	44.04
22	21	20.50	22.01	-4.26	17.75	21.07	0.97	43.97
23	22	17.92	19.21	-3.32	15.89	18.58	0.89	43.89
24	23	15.73	16.82	-2.69	14.13	16.23	0.82	43.82
25	24	13.85	14.79	-2.10	12.69	14.30	0.77	43.77
26	25	12.26	13.05	-1.61	11.44	12.63	0.72	43.72
27	26	10.89	11.57	-1.19	10.39	11.22	0.67	43.67
28	27	9.73	10.31	-0.83	9.48	10.01	0.64	43.64
29	28	8.74	9.24	-0.52	8.71	8.98	0.61	43.61
30	29	7.90	8.32	-0.26	8.06	8.10	0.58	43.58
31	30	7.18	7.54	-0.04	7.50	7.35	0.56	43.56
32	31	6.56	6.87	0.15	7.02	6.71	0.54	43.54
33	32	6.04	6.30	0.31	6.61	6.16	0.53	43.53
34	33	5.59	5.81	0.45	6.26	5.70	0.51	43.51
35	34	5.21	5.40	0.57	5.97	5.30	0.50	43.50
36	35	4.88	5.05	0.67	5.71	5.07	0.48	43.48
37	36	4.61	4.75					
38	37	4.37	4.49					
39	38	4.17	4.27					
40	39	4.00	4.08					
Maks		373.17				259.70	11.19	54.19

Gambar 4.3 Grafik Hubungan Q Inflow dan Q Outflow yang Melalui Terowongan Pengelak



Dari hasil perhitungan penelusuran banjir melalui terowongan diperoleh debit banjir maksimum yang akan masuk ke terowongan sebesar = 259,70 m³/dtk, dengan elevasi maksimum +54,20 m, dengan tinggi jagaan di depan cofferdam 2,80 m untuk dimensi terowongan diameter 5 m.

Oleh karena itu, untuk perhitungan selanjutnya dipakai dimensi terowongan dengan diameter 5 m.



$Q_{max.rencana}$	=	259,70	m ³ /dtk
D	=	5	m
r	=	2,5	m
L	=	371,00	m
EL.inlet	=	43,00	m
EL.outlet	=	34,00	m
Slope (S)	=	0.0243	
KoefisienManning(n)	=	0.014	

4.4 Perhitungan Konstruksi

4.4.1 Kondisi perencanaan

Konstruksi terowongan direncanakan sama mulai dari inlet sampai outlet.

Batasan kondisi yang digunakan dalam perencanaan terowongan adalah :

- Kondisi tanah di atas terowongan adalah berupa tanah lepas (bukan berupa batuan keras / *hard rock*) yang akan segera runtuh apabila terdapat rongga di bawahnya, sehingga konstruksi terowongan didesain tidak hanya berfungsi untuk mengalirkan air dalam terowongan, namun juga harus mampu menahan beban tanah di atasnya.
- Kondisi 1, Kondisi perencanaan normal sebelum terowongan beroperasi
Beban yang bekerja : beban tanah + beban mati + beban hidup + tekanan aktif horizontal tanah (kondisi normal)
- Kondisi 2, Perencanaan khusus (gempa) sebelum terowongan beroperasi
Beban yang bekerja : beban tanah + beban mati + beban hidup + tekanan aktif horizontal tanah (kondisi gempa)
- Kondisi 3, kondisi pada saat pengoperasian sebagai terowongan pengelak (kondisi aliran bebas)
Beban bekerja : beban tanah + beban mati + beban hidup + tekanan aktif horizontal tanah + tekanan air ketika belum penuh (separuh penampang)
- Kondisi 4, kondisi pada saat pengoperasian sebagai terowongan pengelak (kondisi terowongan penuh air)
Beban bekerja : beban tanah + beban mati + beban hidup + tekanan aktif horizontal tanah + tekanan air kondisi penuh
- Kondisi 5, kondisi pada saat pengoperasian sebagai terowongan pengelak (kondisi terowongan penuh air) ketika terjadi gempa
Beban bekerja : beban tanah + beban mati + beban hidup + tekanan aktif horizontal tanah (kondisi gempa) + tekanan air kondisi penuh

4.4.2 Struktur Geometri Terowongan Pengelak

Elevasi Bendung Pengelak +57.00

Keterangan :

El. puncak bendung = +57,00

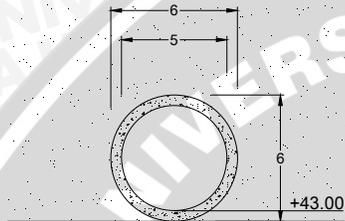
El. Puncak menara differsion = +75,00

El. dasar terowongan = +43,00

Tinggi bukaan tunnel = 5 m

Luas bukaan tunnel = 19,635 m²

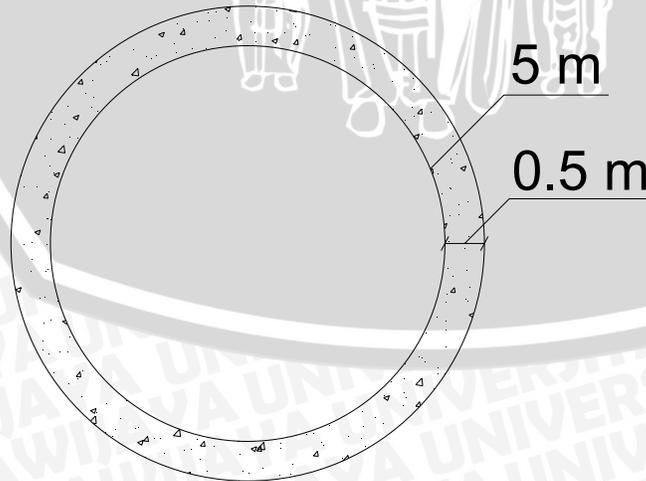
Tebal dinding terowongan = 0,5 m



- $\gamma_{\text{sat tanah}} = 2,0 \text{ t/m}^3$
- $\gamma_{\text{wet tanah}} = 1,95 \text{ t/m}^3$
- $C(\text{kohesi}) = 2,5 \text{ t/m}^2$
- $\gamma_{\text{concrete}} = 2,4 \text{ t/m}^3$
- $\gamma_{\text{steel}} = 7,85 \text{ t/m}^3$
- $\phi_1 (\text{sudut geser}) = 34,7^\circ$
- $K_a = 0,2745$
- $K_{a_c} = 0,4455$

Gambar 4.4 Struktur Geometri Terowongan Pengelak

4.4.3 Design Section Terowongan Pengelak



Gambar 4.5 Design Section Terowongan Pengelak

4.4.4 Perhitungan pembebanan (*design load*)

Beban yang bekerja pada terowongan pada beberapa kondisi :

Kondisi I

- a. Beban tanah (*Loosen Rock load*) = q_1

$$q_1 = \gamma_{sat} \cdot h_c \cdot 1 \text{ m}$$

dimana :

$$\gamma_{sat} = \text{ketika kondisi jenuh} = 2,0 \text{ t/m}^3$$

Dari data lapangan didapatkan bahwa kondisi tanah masuk dalam klasifikasi Terzaghi tipe IV (*moderately blocky and seamy*), sehingga faktor beban tanah bernilai :

$$h_c = \text{Loosen Rock Height (m)}$$

$$= 0,35 \times (B+Ht)$$

$$= 0,35 (5+5) = 3,5 \text{ m}$$

$$h = \text{jarak tinggi puncak muka tanah terhadap puncak terowongan} = 42,3 \text{ m}$$

karena $h > h_c$, maka yang digunakan $h_c = 3,5 \text{ m}$

$$B = \text{lebar terowongan (m)}$$

$$H = \text{tinggi terowongan (m)}$$

$$q_1 = 2,0 \cdot 3,5 \cdot 1$$

$$q_1 = 7,0 \text{ t/m}$$

- b. Beban mati (*Dead load*) = q_2

$$q_2 = \gamma_c \cdot A_{beton}/B \times 1 \text{ m}$$

dimana :

$$\gamma_c = \text{berat isi beton (Unit Weight of Concrete)} = 2,4 \text{ t/m}^3$$

$$A = \text{luas beton pada terowongan (m)}$$

$$B = \text{lebar terowongan (m)}$$

$$q_2 = 2,4 \cdot 8,639 / 6$$

$$q_2 = 3,456 \text{ t/m}$$

- c. Beban hidup (*Live Load*) = q_3

$$\text{Beban hidup (} q_3 \text{)} = 1 \text{ t/m}$$

d. Tekanan aktif horizontal tanah di samping terowongan (kondisi normal)

$h_1 =$ Elevasi tanah max (pada jarak 156 m dari inlet) – Elevasi tertinggi terowongan

$$= 87,00 - 44,70 = 42,3 \text{ m}$$

$h_2 = 42,3 + 6$

$$= 48,3 \text{ m}$$

$$\gamma_{\text{wet tanah}} = 1,95 \text{ t/m}^3$$

$$K_a = 0,2745$$

$$K_{ae} = 0,4455$$

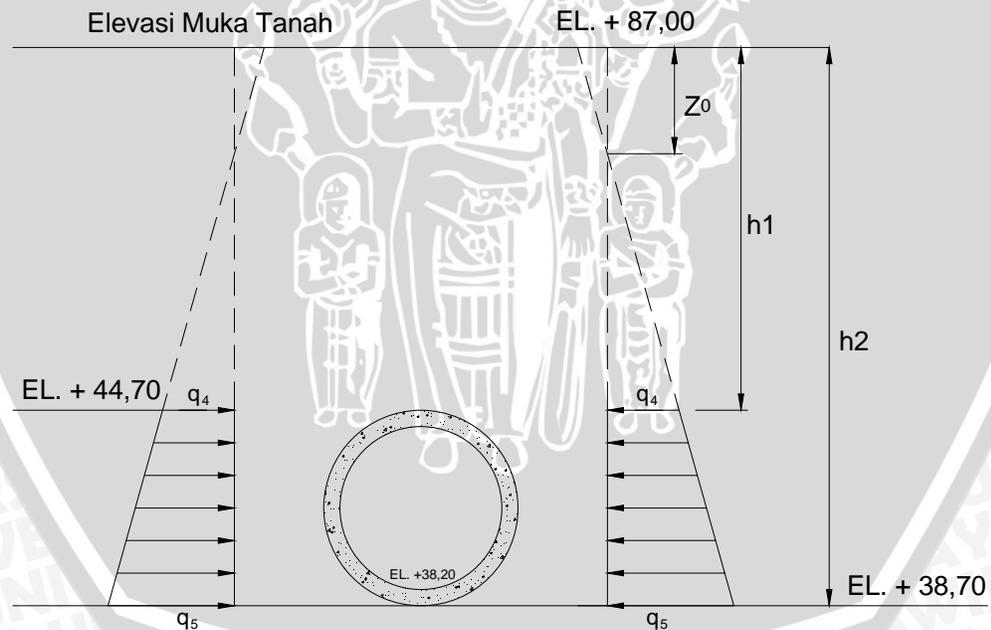
Dari data proyek didapatkan K_a dan γ_{wet}

$$\begin{aligned} q_4 &= (K_a \times \gamma_{\text{wet}} \times (h_1 - Z_o)) \\ &= (0,2745 \times 1,95 \times (42,3 - 4,894)) \\ &= 20,02 \text{ t/m} \end{aligned}$$

$$Z_o = \frac{2C \cdot \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2})}{1,95}$$

$$Z_o = 4,894 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} q_5 &= (K_a \times \gamma_{\text{wet}} \times (h_2 - Z_o)) \\ &= (0,2745 \times 1,95 \times (48,3 - 4,894)) \\ &= 23,23 \text{ t/m} \end{aligned}$$



e. Reaksi pondasi = q_6

$$\text{Reaksi pondasi } (q_6) = 7,0 \text{ t/m} + 3,456 \text{ t/m} + 1 \text{ t/m} = 11,456 \text{ t/m}$$

Kondisi II

- a. Beban tanah (*Loosen Rock load*) = q_1

$$q_1 = \gamma_{sat} \cdot h_c \cdot 1 \text{ m}$$

dimana :

$$\gamma_{sat} = \text{ketika kondisi jenuh} = 2,0 \text{ t/m}^3$$

Dari data lapangan didapatkan bahwa kondisi tanah masuk dalam klasifikasi Terzaghi tipe IV (*moderately blocky and seamy*), sehingga faktor beban tanah bernilai :

$$h_c = \text{Loosen Rock Height (m)}$$

$$= 0,35 \times (B+Ht)$$

$$= 0,35 (5+5) = 3,5 \text{ m}$$

$$h = \text{jarak tinggi puncak bendung terhadap puncak terowongan} = 42,3 \text{ m}$$

karena $h > h_c$, maka yang digunakan $h_c = 3,5 \text{ m}$

$$B = \text{lebar terowongan (m)}$$

$$H = \text{tinggi terowongan (m)}$$

$$q_1 = 2,0 \cdot 3,5 \cdot 1$$

$$q_1 = 7,0 \text{ t/m}$$

- b. Beban mati (*Dead load*) = q_2

$$q_2 = \gamma_c \cdot \text{Abeton/B} \times 1 \text{ m}$$

dimana :

$$\gamma_c = \text{berat isi beton (Unit Weight of Concrete)} = 2,4 \text{ t/m}^3$$

$$A = \text{luas beton pada terowongan (m)}$$

$$B = \text{lebar terowongan (m)}$$

$$q_2 = 2,4 \cdot 8,639 / 6$$

$$q_2 = 3,456 \text{ t/m}$$

- c. Beban hidup (*Live Load*) = q_3

$$\text{Beban hidup (} q_3 \text{)} = 1 \text{ t/m}$$

d. Tekanan aktif horizontal tanah di samping terowongan (kondisi gempa)

$$h_1 = \text{Elevasi tanah max (pada jarak 156 m dari inlet)} - \text{Elevasi tertinggi terowongan}$$

$$= 87,00 - 44,70 = 42,3 \text{ m}$$

$$h_2 = 42,3 + 6$$

$$= 48,3 \text{ m}$$

$$\gamma_{\text{wet tanah}} = 1,95 \text{ t/m}^3$$

$$K_a = 0,2745$$

$$K_{a_e} = 0,4455$$

Dari data proyek didapatkan K_{a_e} dan γ_{wet}

$$q_4 = (K_{a_e} \times \gamma_{\text{wet}} \times (h_1 - Z_0))$$

$$= (0,4455 \times 1,95 \times (42,3 - 4,894))$$

$$= 32,5 \text{ t/m}$$

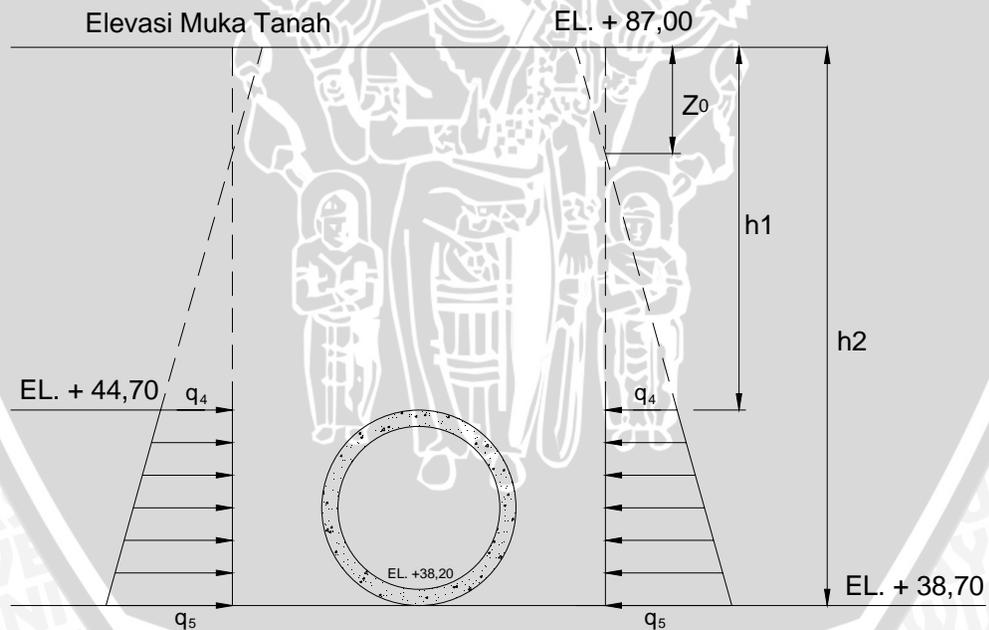
$$Z_0 = \frac{2C \cdot \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2})}{1,95}$$

$$Z_0 = 4,894 \text{ m}$$

$$q_5 = (K_{a_e} \times \gamma_{\text{wet}} \times (h_2 - Z_0))$$

$$= (0,4455 \times 1,95 \times (48,3 - 4,894))$$

$$= 37,71 \text{ t/m}$$



e. Reaksi pondasi = q_6

$$\text{Reaksi pondasi } (q_6) = 7,0 \text{ t/m} + 3,456 \text{ t/m} + 1 \text{ t/m} = 11,456 \text{ t/m}$$

Kondisi III

- a. Beban tanah (*Loosen Rock load*) = q_1

$$q_1 = \gamma_{sat} \cdot h_c \cdot 1 \text{ m}$$

dimana :

$$\gamma_{sat} = \text{ketika kondisi jenuh} = 2,0 \text{ t/m}^3$$

Dari data lapangan didapatkan bahwa kondisi tanah masuk dalam klasifikasi Terzaghi tipe IV (*moderately blocky and seamy*), sehingga faktor beban tanah bernilai :

$$h_c = \text{Loosen Rock Height (m)}$$

$$= 0,35 \times (B+Ht)$$

$$= 0,35 (5+5) = 3,5 \text{ m}$$

$$h = \text{jarak tinggi puncak muka tanah terhadap puncak terowongan} = 42,3 \text{ m}$$

karena $h > h_c$, maka yang digunakan $h_c = 3,5 \text{ m}$

$$B = \text{lebar terowongan (m)}$$

$$H = \text{tinggi terowongan (m)}$$

$$q_1 = 2,0 \cdot 3,5 \cdot 1$$

$$q_1 = 7,0 \text{ t/m}$$

- b. Beban mati (*Dead load*) = q_2

$$q_2 = \gamma_c \cdot \text{Abeton/B} \times 1 \text{ m}$$

dimana :

$$\gamma_c = \text{berat isi beton (Unit Weight of Concrete)} = 2,4 \text{ t/m}^3$$

$$A = \text{luas beton pada terowongan (m)}$$

$$B = \text{lebar terowongan (m)}$$

$$q_2 = 2,4 \cdot 8,639 / 6$$

$$q_2 = 3,456 \text{ t/m}$$

- c. Beban hidup (*Live Load*) = q_3

$$\text{Beban hidup (} q_3 \text{)} = 1 \text{ t/m}$$

- d. Tekanan aktif horizontal tanah di samping terowongan (kondisi normal)

$$h_1 = \text{Elevasi tanah max (pada jarak 156 m dari inlet)} - \text{Elevasi tertinggi terowongan}$$

$$= 87,00 - 44,70 = 42,3 \text{ m}$$

$$h_2 = 42,3 + 6 = 48,2 \text{ m}$$

$$\gamma_{\text{wet tanah}} = 1,95 \text{ t/m}^3$$

$$K_a = 0,2745$$

$$K_{ae} = 0,4455$$

Dari data proyek didapatkan K_a dan γ_{wet}

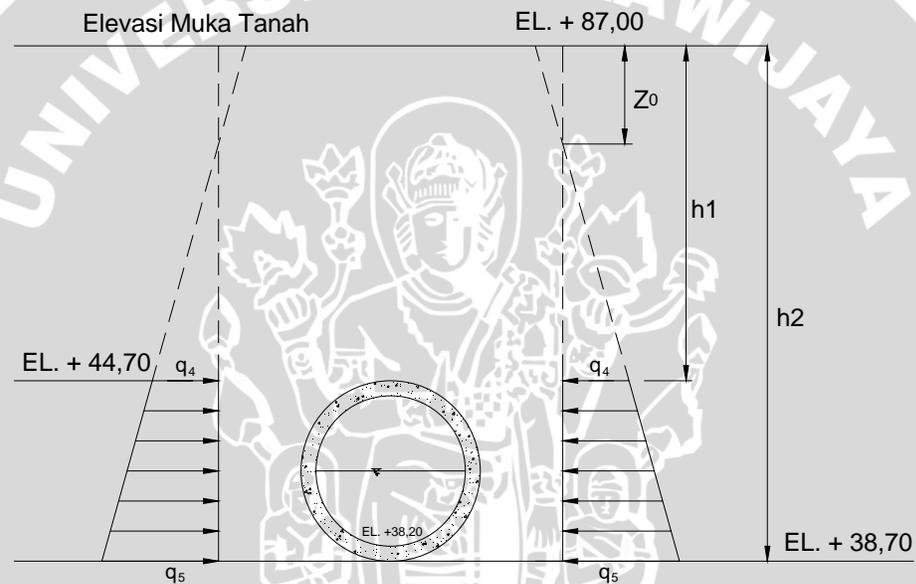
$$\begin{aligned} q_4 &= (K_a \times \gamma_{\text{wet}} \times (h_1 - Z_0)) \\ &= (0,2745 \times 1,95 \times (42,3 - 4,894)) \\ &= 20,02 \text{ t/m} \end{aligned}$$

$$Z_0 = \frac{2C \cdot \tan(45^\circ + \phi/2)}{\gamma}$$

$$= 1,95$$

$$Z_0 = 4,894 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} q_5 &= (K_a \times \gamma_{\text{wet}} \times (h_2 - Z_0)) \\ &= (0,2745 \times 1,95 \times (48,3 - 4,894)) \\ &= 23,23 \text{ t/m} \end{aligned}$$



e. Reaksi pondasi = q_6

$$\text{Reaksi pondasi } (q_6) = 7,0 \text{ t/m} + 3,456 \text{ t/m} + 1 \text{ t/m} = 11,456 \text{ t/m}$$

f. Gaya tekan air internal (kondisi air separuh terowongan)

$$I_{\text{max}} = \gamma_{\text{water}} \cdot h_{\text{air max}}$$

$$= 1,0 \times 2,5$$

$$= 2,5 \text{ t/m}^2$$

Kondisi IV

- a. Beban tanah (*Loosen Rock load*) = q_1

$$q_1 = \gamma_{sat} \cdot h_c \cdot 1 \text{ m}$$

dimana :

$$\gamma_{sat} = \text{ketika kondisi jenuh} = 2,0 \text{ t/m}^3$$

Dari data lapangan didapatkan bahwa kondisi tanah masuk dalam klasifikasi Terzaghi tipe IV (*moderately blocky and seamy*), sehingga faktor beban tanah bernilai :

$$h_c = \text{Loosen Rock Height (m)}$$

$$= 0,35 \times (B+Ht)$$

$$= 0,35 (5+5) = 3,5 \text{ m}$$

$$h = \text{jarak tinggi puncak muka tanah terhadap puncak terowongan} = 42,3 \text{ m}$$

karena $h > h_c$, maka yang digunakan $h_c = 3,5 \text{ m}$

$$B = \text{lebar terowongan (m)}$$

$$H = \text{tinggi terowongan (m)}$$

$$q_1 = 2,0 \cdot 3,5 \cdot 1$$

$$q_1 = 7,0 \text{ t/m}$$

- b. Beban mati (*Dead load*) = q_2

$$q_2 = \gamma_c \cdot \text{Abeton/B} \times 1 \text{ m}$$

dimana :

$$\gamma_c = \text{berat isi beton (Unit Weight of Concrete)} = 2,4 \text{ t/m}^3$$

$$A = \text{luas beton pada terowongan (m)}$$

$$B = \text{lebar terowongan (m)}$$

$$q_2 = 2,4 \cdot 8,639 / 6$$

$$q_2 = 3,456 \text{ t/m}$$

- c. Beban hidup (*Live Load*) = q_3

$$\text{Beban hidup (} q_3 \text{)} = 1 \text{ t/m}$$

- d. Tekanan aktif horizontal tanah di samping terowongan (kondisi normal)

$$h_1 = \text{Elevasi tanah max (pada jarak 156 m dari inlet) - Elevasi tertinggi terowongan}$$

$$= 87,00 - 44,70 = 42,3 \text{ m}$$

$$h_2 = 42,3 + 6 = 48,2 \text{ m}$$

$$\gamma_{\text{wet tanah}} = 1,95 \text{ t/m}^3$$

$$K_a = 0,2745$$

$$K_{ae} = 0,4455$$

Dari data proyek didapatkan K_a dan γ_{wet}

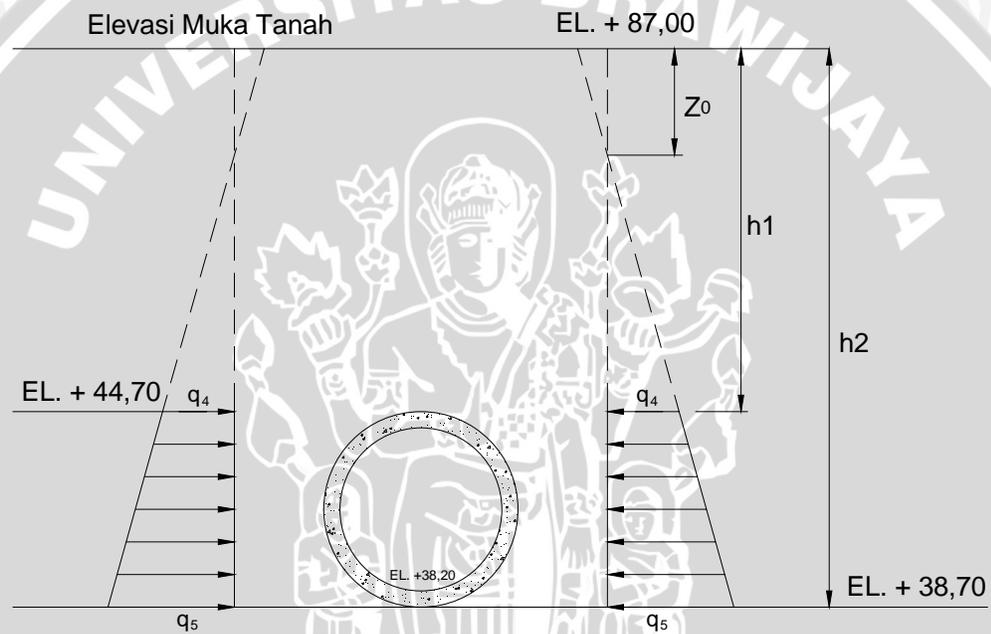
$$\begin{aligned} q_4 &= (K_a \times \gamma_{\text{wet}} \times (h_1 - Z_0)) \\ &= (0,2745 \times 1,95 \times (42,3 - 4,894)) \\ &= 20,02 \text{ t/m} \end{aligned}$$

$$Z_0 = \frac{2C \cdot \tan(45^\circ + \phi/2)}{\gamma}$$

$$Z_0 = \frac{2 \cdot 1,95}{1,95}$$

$$Z_0 = 4,894 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} q_5 &= (K_a \times \gamma_{\text{wet}} \times (h_2 - Z_0)) \\ &= (0,2745 \times 1,95 \times (48,3 - 4,894)) \\ &= 23,23 \text{ t/m} \end{aligned}$$



e. Reaksi pondasi = q_6

$$\text{Reaksi pondasi } (q_6) = 7,0 \text{ t/m} + 3,456 \text{ t/m} + 1 \text{ t/m} = 11,456 \text{ t/m}$$

f. Gaya tekan air internal (kondisi air penuh)

$$\begin{aligned} I_{\text{max}} &= \gamma_{\text{water}} \cdot h_{\text{muka air max}} \cdot A \\ &= 1,0 \times (54,2 - (38,7 + 3)) \\ &= 12,5 \text{ t/m}^2 \text{ (segala arah)} \end{aligned}$$

Kondisi V

- a. Beban tanah (*Loosen Rock load*) = q_1

$$q_1 = \gamma_{sat} \cdot h_c \cdot 1m$$

dimana :

$$\gamma_{sat} = \text{ketika kondisi jenuh} = 2,0 \text{ t/m}^3$$

Dari data lapangan didapatkan bahwa kondisi tanah masuk dalam klasifikasi Terzaghi tipe IV (*moderately blocky and seamy*), sehingga faktor beban tanah bernilai :

$$h_c = \text{Loosen Soil Height (m)}$$

$$= 0,35 \times (B+Ht)$$

$$= 0,35 (5+5) = 3,5 \text{ m}$$

$$h = \text{jarak tinggi puncak bendung terhadap puncak terowongan} = 42,3 \text{ m}$$

karena $h > h_c$, maka yang digunakan $h_c = 3,5 \text{ m}$

$$B = \text{lebar terowongan (m)}$$

$$H = \text{tinggi terowongan (m)}$$

$$q_1 = 2,0 \cdot 3,5 \cdot 1$$

$$q_1 = 7,0 \text{ t/m}$$

- b. Beban mati (*Dead load*) = q_2

$$q_2 = \gamma_c \cdot \text{Abeton/B} \times 1m$$

dimana :

$$\gamma_c = \text{berat isi beton (Unit Weight of Concrete)} = 2,4 \text{ t/m}^3$$

$$A = \text{luas beton pada terowongan (m)}$$

$$B = \text{lebar terowongan (m)}$$

$$q_2 = 2,4 \cdot 8,639 / 6$$

$$q_2 = 3,456 \text{ t/m}$$

- c. Beban hidup (*Live Load*) = q_3

$$\text{Beban hidup (} q_3 \text{)} = 1 \text{ t/m}$$

- d. Tekanan aktif horizontal tanah di samping terowongan (kondisi gempa)

$$h_1 = \text{Elevasi tanah max (pada jarak 156 m dari inlet) - Elevasi tertinggi terowongan}$$

$$= 87,00 - 44,70 = 42,3 \text{ m}$$

$$h_2 = 42,3 + 6 = 48,3 \text{ m}$$

$$\gamma_{\text{wet tanah}} = 1,95 \text{ t/m}^3$$

$$K_a = 0,2745$$

$$K_{ae} = 0,4455$$

Dari data proyek didapatkan K_{ae} dan γ_{wet}

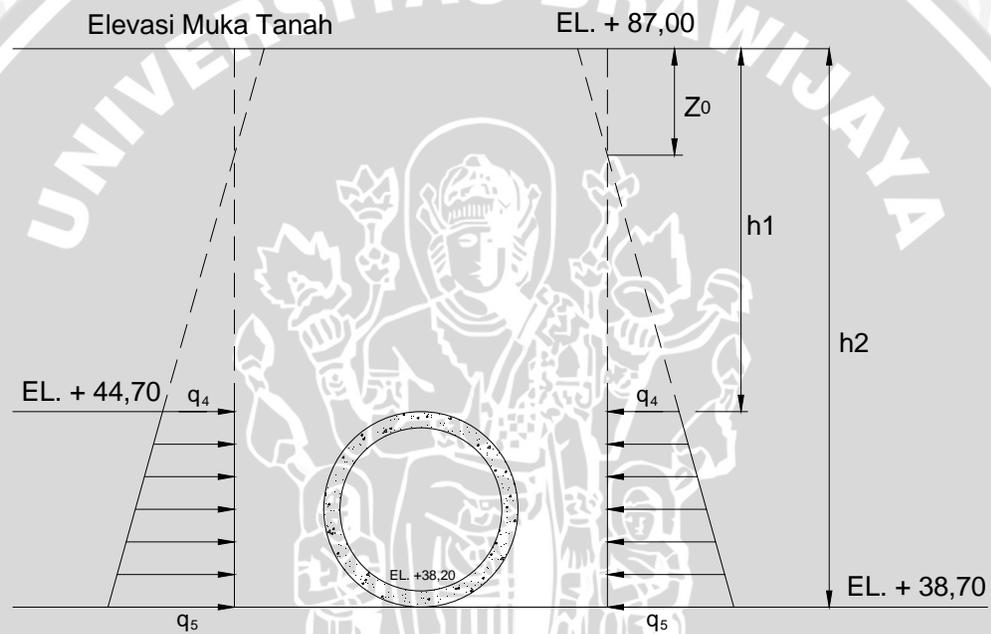
$$\begin{aligned} q_4 &= (K_{ae} \times \gamma_{\text{wet}} \times (h_1 - Z_0)) \\ &= (0,4455 \times 1,95 \times (42,3 - 4,894)) \\ &= 32,5 \text{ t/m} \end{aligned}$$

$$Z_0 = \frac{2C \cdot \tan(45^\circ + \phi/2)}{\gamma}$$

$$1,95$$

$$Z_0 = 4,894 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} q_5 &= (K_{ae} \times \gamma_{\text{wet}} \times (h_2 - Z_0)) \\ &= (0,4455 \times 1,95 \times (48,3 - 4,894)) \\ &= 37,71 \text{ t/m} \end{aligned}$$



e. Reaksi pondasi = q_5

$$\text{Reaksi pondasi } (q_5) = 7,0 \text{ t/m} + 3,456 \text{ t/m} + 1 \text{ t/m} = 11,456 \text{ t/m}$$

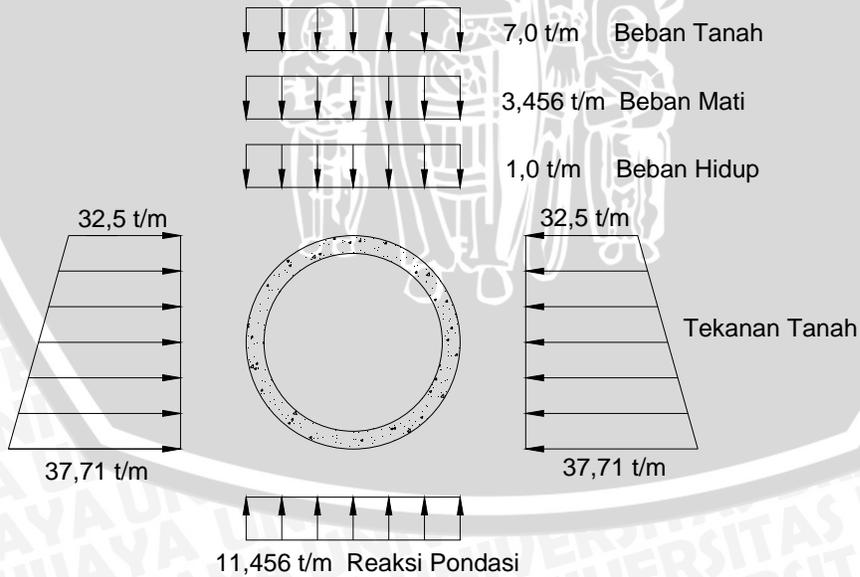
f. Gaya tekan air internal (kondisi air penuh)

$$\begin{aligned} I_{\text{max}} &= \gamma_{\text{water}} \cdot h_{\text{muka air max}} \cdot A \\ &= 1,0 \times (54,2 - (38,7 + 3)) \\ &= 12,5 \text{ t/m}^2 \text{ (segala arah)} \end{aligned}$$

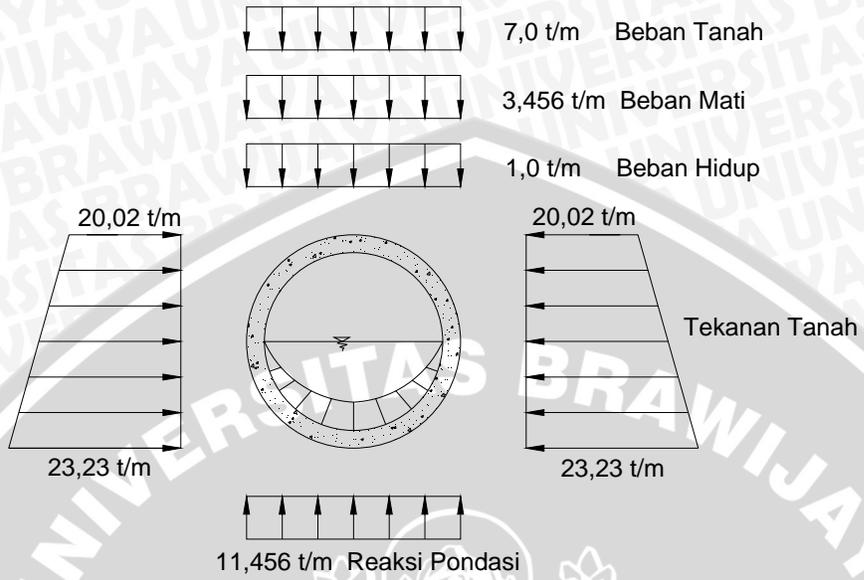
4.4.5 Diagram Pembebanan Terowongan Pengelak



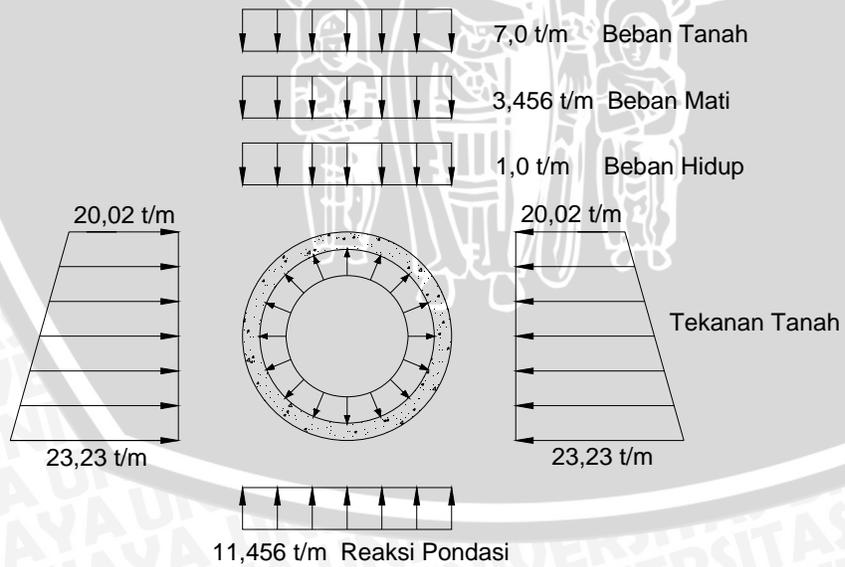
Gambar 4.6 Diagram Pembebanan Pada Kondisi I



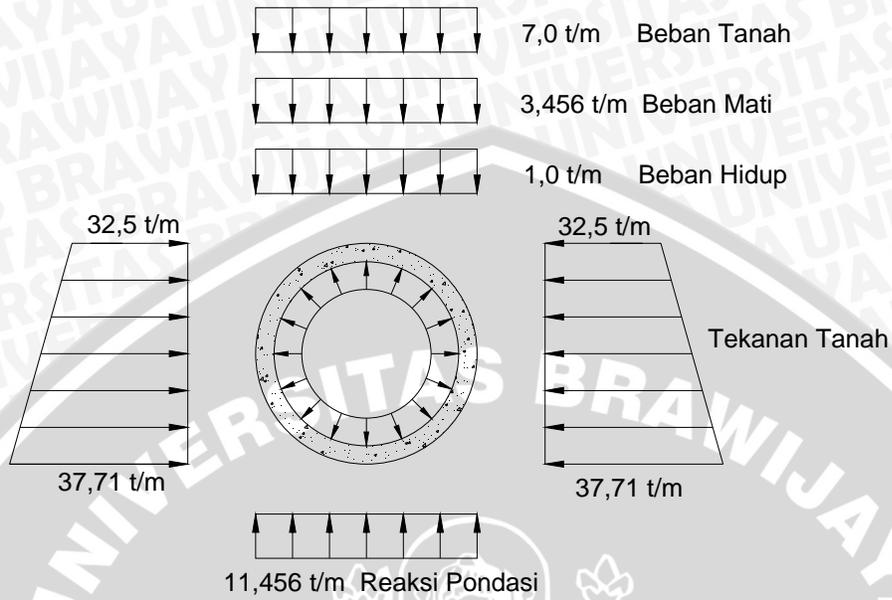
Gambar 4.7 Diagram Pembebanan Pada Kondisi II



Gambar 4.8 Diagram Pembebanan Pada Kondisi III



Gambar 4.9 Diagram Pembebanan Pada Kondisi IV



Gambar 4.10 Diagram Pembebanan Pada Kondisi V



4.4.6 Kontrol Stabilitas Konstruksi Terowongan

$$h_c = 0,35 \times (B+Ht) = 0,35 (5+5) = 3,5 \text{ m}$$

$$h = \text{jarak tinggi puncak bendung terhadap puncak terowongan} = 42,3 \text{ m}$$

karena $h > h_c$, maka yang digunakan $h_c = 3,5 \text{ m}$

Gaya pembebanan terowongan untuk menghitung daya dukung tanah / batuan

W_1 = berat tanah / batuan yang membebani dinding terowongan bagian atas

$$= \gamma_{\text{sat}} \text{ tanah} \times h_c \times b \times l$$

$$= 2,0 \times 3,5 \times 6 \times 1$$

$$= 42 \text{ t}$$

W_2 = berat sendiri konstruksi

$$= \gamma_c \times A_c \times l$$

$$= 2,4 \times (28,274 - 19,635) \times 1$$

$$= 20,735 \text{ t}$$

W_3 = berat air kondisi penuh

$$= \gamma_w \times A_w \times l$$

$$= 1 \times 19,635 \times 1$$

$$= 19,635 \text{ t}$$

4.4.6.1 Perhitungan Stabilitas Terowongan Pada Kondisi Kosong

Gaya yang terjadi adalah akibat berat tanah / batuan yang membebani dinding terowongan bagian atas dan berat sendiri konstruksi, yang besarnya adalah :

$$\Sigma W = W_1 + W_2$$

$$= 42 + 20,375$$

$$= 62,375 \text{ t}$$

Tegangan tanah yang terjadi adalah :

$$\sigma = \frac{62,375}{6 \times 1} = 10,396 \text{ t/m}^2 = 1,0396 \text{ kg/cm}^2 < \bar{\sigma} = 8 \text{ kg/cm}^2 \text{ (tabel 2.2)}$$

dari perhitungan di atas, diperoleh bahwa tegangan tanah ketika memikul beban pada kondisi kosong masih lebih kecil dari tegangan ijin tanah, sehingga konstruksi masih aman.

4.4.6.2 Perhitungan Stabilitas Terowongan Pada Kondisi Penuh

Gaya yang terjadi adalah akibat berat tanah / batuan yang membebani dinding terowongan bagian atas, berat air, dan berat sendiri konstruksi, yang besarnya adalah :

$$\begin{aligned}\sum W &= W_1 + W_2 + W_3 \\ &= 42 + 20,375 + 19,635 \\ &= 82,01 \text{ t}\end{aligned}$$

Tegangan tanah yang terjadi adalah :

$$\sigma = \frac{82,01}{6 \times 1} = 13,668 \text{ t/m}^2 = 1,367 \text{ kg/cm}^2 < \bar{\sigma} = 8 \text{ kg/cm}^2 \text{ (tabel 2.2)}$$

dari perhitungan di atas, diperoleh bahwa tegangan tanah ketika memikul beban pada kondisi penuh masih lebih kecil dari tegangan ijin tanah, sehingga konstruksi masih aman.



4.4.7 Hasil perhitungan StaadPro 2004

Tabel 4.5 Tabel Ringkasan Maksimum dan Minimum Gaya Geser, Gaya Normal dan Momen Terowongan Pengelak

	Beam	L/C	Node	Axial Fx (ton)	Geser Fy (ton)	Momen Mz (Ton-m)
Max Fx	4	KONDISI 2	4	83.517	4.973	11.937
Min Fx	14	KONDISI 2	15	-13.597	11.1	-1.779
Max Fy	18	KONDISI 2	18	38.346	40.29	15.292
Min Fy	8	KONDISI 2	9	38.346	-40.289	15.292
Max Fz	1	KONDISI 1	1	32.44	13.439	-1.991
Min Fz	1	KONDISI 1	1	32.44	13.439	-1.991
Max Mx	1	KONDISI 1	1	32.44	13.439	-1.991
Min Mx	1	KONDISI 1	1	32.44	13.439	-1.991
Max My	1	KONDISI 1	1	32.44	13.439	-1.991
Min My	1	KONDISI 1	1	32.44	13.439	-1.991
Max Mz	18	KONDISI 2	18	38.346	40.29	15.292
Min Mz	17	KONDISI 2	18	2.229	32.584	-15.292



4.5 Penulangan Konstruksi Terowongan

Dalam perhitungan penulangan konstruksi terowongan ini, digunakan pedoman standar perencanaan beton bertulang Indonesia (SNI03-2847-2002). Perhitungan ditinjau berdasarkan momen yang terjadi, yaitu pada momen maksimum.

Beberapa parameter yang digunakan dalam perencanaan penulangan konstruksi terowongan adalah sebagai berikut :

a. Data Terowongan

$$\text{Bentang Terowongan (b)} = 1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$$

$$\text{Tebal dinding Terowongan (h)} = 500 \text{ mm}$$

$$\text{Tebal selimut beton (d')} = 100 \text{ mm}$$

b. Modulus Elastisitas dan Rasio Poisson

$$\text{Poisson Ratio Beton, } \nu_c = 0.3$$

$$\text{Modulus Elastisitas Beton, } E_c = 4700 \sqrt{f_c'}$$

$$= 4700 \sqrt{35 \text{ MPa}}$$

$$= 27805.575 \text{ Mpa} = 278055.75 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Poisson Ratio Baja, } \nu_s = 0.25$$

$$\text{Modulus Elastisitas Baja, } E_s = 2.1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

c. Tegangan Izin Beton

$$\text{Mutu beton } f_c' = 35 \text{ Mpa} = 350 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Tegangan tekan leleh beton} = 350 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Tegangan geser leleh beton} = 1/6 \sqrt{f_c'} = 0.986 \text{ Mpa}$$

$$= 9.86 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Tegangan torsi leleh beton} = 1/24 \sqrt{f_c'} = 0.2465 \text{ Mpa}$$

$$= 2.465 \text{ kg/cm}^2$$

d. Tegangan Izin Baja

$$\text{Mutu baja } f_y \text{ (deform/ulir)} = 400 \text{ Mpa} = 4000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Mutu baja } f_y \text{ (polos)} = 240 \text{ Mpa} = 2400 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Tegangan leleh baja polos} = 2400 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Tegangan ijin tarik baja} = 0.667 f_y = 0.667 \cdot 240 \text{ Mpa}$$

$$= 160 \text{ Mpa} = 1600 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Tegangan ijin tekan baja} = 1600 \text{ kg/cm}^2$$

4.5.1 Penulangan Terowongan Pengelak

Pelat/cangkang yang menerima aksial dan lentur didesain menggunakan desain analogi kolom.

Penulangan Arah Vertikal Terowongan

Dari hasil perhitungan StaadPro diperoleh gaya aksial dan momen yang terjadi untuk semua kondisi pembebanan :

$$M_u = M_y \text{ max.} = 15,292 \text{ tm}$$

$$P_u = F_x \text{ max.} = 83,517 \text{ ton}$$

$$f'_c = 35 \text{ MPa} = 350 \text{ kg/cm}^2 \quad b = 1000 \text{ mm} = 100 \text{ cm}$$

$$f_y = 400 \text{ MPa} = 4000 \text{ kg/cm}^2 \quad h = 500 \text{ mm}$$

$$d' = 100 \text{ mm} = 10 \text{ cm} \quad d = h - d' = 500 - 100 = 400 \text{ mm} = 40 \text{ cm}$$

Berdasarkan SNI03-2847-2002 luas tulangan longitudinal komponen struktur tekan non-komposit tidak boleh kurang 1% atau lebih dari 8% kali luas bruto penampang.

Digunakan $\rho = 0,015$, maka:

$$A_{st} = \rho \cdot b \cdot h = 0,015 \cdot 1000 \cdot 500 = 7500 \text{ mm}^2$$

Direncana memakai tulangan **D – 22**, maka jumlah tulangan :

$$n = \frac{7500 \text{ mm}^2}{387,1 \text{ mm}^2} = 20 \rightarrow 20\text{-D22}$$

Digunakan tulangan 2 sisi, sehingga :

$$\text{Tulangan tarik} = 10 - \text{D22} (3871 \text{ mm}^2)$$

$$\text{Tulangan tekan} = 10 - \text{D22} (3871 \text{ mm}^2)$$

Cek Keadaan Seimbang

$$C_b = \frac{600d}{600 + f_y} = \frac{600 \cdot 400}{600 + 400} = 240 \text{ mm}$$

$$a_b = 0,85 \cdot C_b = 0,85 \cdot 240 = 204 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s = \frac{C_b - d'}{C_b} \cdot \varepsilon_s = \frac{240 - 100}{240} \cdot 0,003 = 0,00175$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{210000} = 0,0019$$

Karena $\varepsilon_s < \varepsilon_y$, maka tulangan baja tekan belum meleleh, sehingga

$$f_s = \epsilon_s \cdot E_s = 0,00175 \times 210000 = 367,5 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} P_{u_b} &= 0,85 \cdot f'_c \cdot a_b \cdot b \\ &= 0,85 \cdot 350 \cdot 20,4 \cdot 100 \\ &= 606900 \text{ kg} > P_u = 83517 \text{ kg} \end{aligned}$$

Maka : kolom hancur diawali dengan lelehnya tulangan

Cek Momen Kapasitas Kolom

- $A_s = A_s' \rightarrow \bar{y} = \frac{1}{2}h = 25\text{cm} = 250\text{mm}$
- $\frac{c}{d} = \frac{600}{600 + f_y} \rightarrow c = \frac{600}{600 + f_y} \cdot d$

$$c = \frac{600}{600 + 400} \cdot 400 = 240 \text{ mm}$$
- $a = \beta \cdot c = 0,85 \cdot 240 = 204 \text{ mm}$
- $T = A_s \cdot f_y = 38,71 \cdot 4000 = 154840 \text{ kg}$
- $C_s = A_s' \cdot f_y = 38,71 \cdot 4000 = 154840 \text{ kg}$
- $C_c = 0,85 f'_c \cdot b \cdot a = 0,85 \cdot 350 \cdot 100 \cdot 20,4 = 606900 \text{ kg}$
- $M_n = C_s (d - d') + C_c (d - a/2) - T (d - \bar{y})$

$$= 154840 (40 - 10) + 606900 (40 - 20,4/2) - 154840 (40 - 25)$$

$$= 20408220 \text{ kg cm}$$

$$= 204082,2 \text{ kg m}$$
- $\phi_b \cdot M_n = 0,85 \times 204082,2 = 173469,87 \text{ kgm}$

Cek Penampang Kolom

$$e = \frac{M_u}{P_u} = \frac{15,292}{83,571} = 0,1831 \text{ m} = 183,1 \text{ mm}$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f'_c} = \frac{400}{0,85 \cdot 350} = 13,445$$

$$e' = e + \left(d + \frac{h}{2} \right) = 183,1 + \left(400 + \frac{500}{2} \right) = 833,1 \text{ mm}$$

$$1 - \frac{e'}{d} = 1 - \frac{833,1}{400} = -1,08275$$

$$1 - \frac{d'}{d} = 1 - \frac{100}{400} = 0,75$$

$$\rho = 0,05$$

$$P_n = C_s + C_c - T$$

$$= 154840 + 606900 - 154840 = 606900 \text{ kg}$$

$$\phi P_n = 0,65 \times 606900 = 394485 \text{ kg} > P_u = 83571 \text{ kg}$$

(penulangan tarik yang menentukan)

- Kontrol :

$$e_b = \frac{M_n}{P_n} = \frac{204082,2}{606900} = 0,33627 \text{ m} = 336,27 \text{ mm}$$

Digunakan persamaan berdasarkan tarik :

$$P_n = 0,85 \cdot f'c \cdot b \cdot d \left[\left(1 - \frac{e'}{d} \right) + \sqrt{\left(1 - \frac{e'}{d} \right)^2 + 2 \cdot m \cdot \rho \left(1 - \frac{d'}{d} \right)} \right]$$

$$= 0,85 \cdot 350 \cdot 100 \cdot 40 \left[(-1,08275) + \sqrt{(-1,08275)^2 + 2 \cdot 13,445 \cdot 0,015 \cdot (0,75)} \right]$$

$$= 156708,92 \text{ kg}$$

$$\phi P_n = 0,65 \times 156708,92 = 101860,8 \text{ kg} > P_u = 83571 \text{ kg} \dots \text{ OK !!!}$$

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

Kebutuhan Jumlah Tulangan Geser per meter = 10 buah
maka digunakan D22-100

Penulangan Arah Horizontal Terowongan

Penulangan arah horizontal terowongan diperhitungkan untuk menahan gaya geser yang terjadi, komponen penahan gaya geser disumbangkan oleh dua bagian, yaitu berasal dari tulangan geser dan juga beton itu sendiri. Dalam kasus ini, diasumsikan beton tidak memberi kontribusi dalam menahan geser, sehingga gaya geser yang terjadi murni ditahan oleh tulangan geser. Berikut ini perhitungan penulangan geser konstruksi terowongan. Dari hasil perhitungan StaadPro diperoleh :

$$V_u \text{ max.} = F_y \text{ max.} = 40,29 \text{ t} = 402900 \text{ N}$$

s = jarak antar tulangan geser

Diambil section plat yang direncana gesernya, maka $d = 1000 \text{ mm}$ dan $b = 500 \text{ mm}$

Perhitungan Kapasitas Geser yang Tersedia

$$\phi (V_s + V_c) = V_u$$

$$\phi (V_s + 0) = V_u$$

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} = \frac{402900}{0,75} = 537200$$

$$A_s = \frac{V_s \times s}{f_y \times d}$$

$$A_s = \frac{537200 \times 200}{400 \times 1000}$$

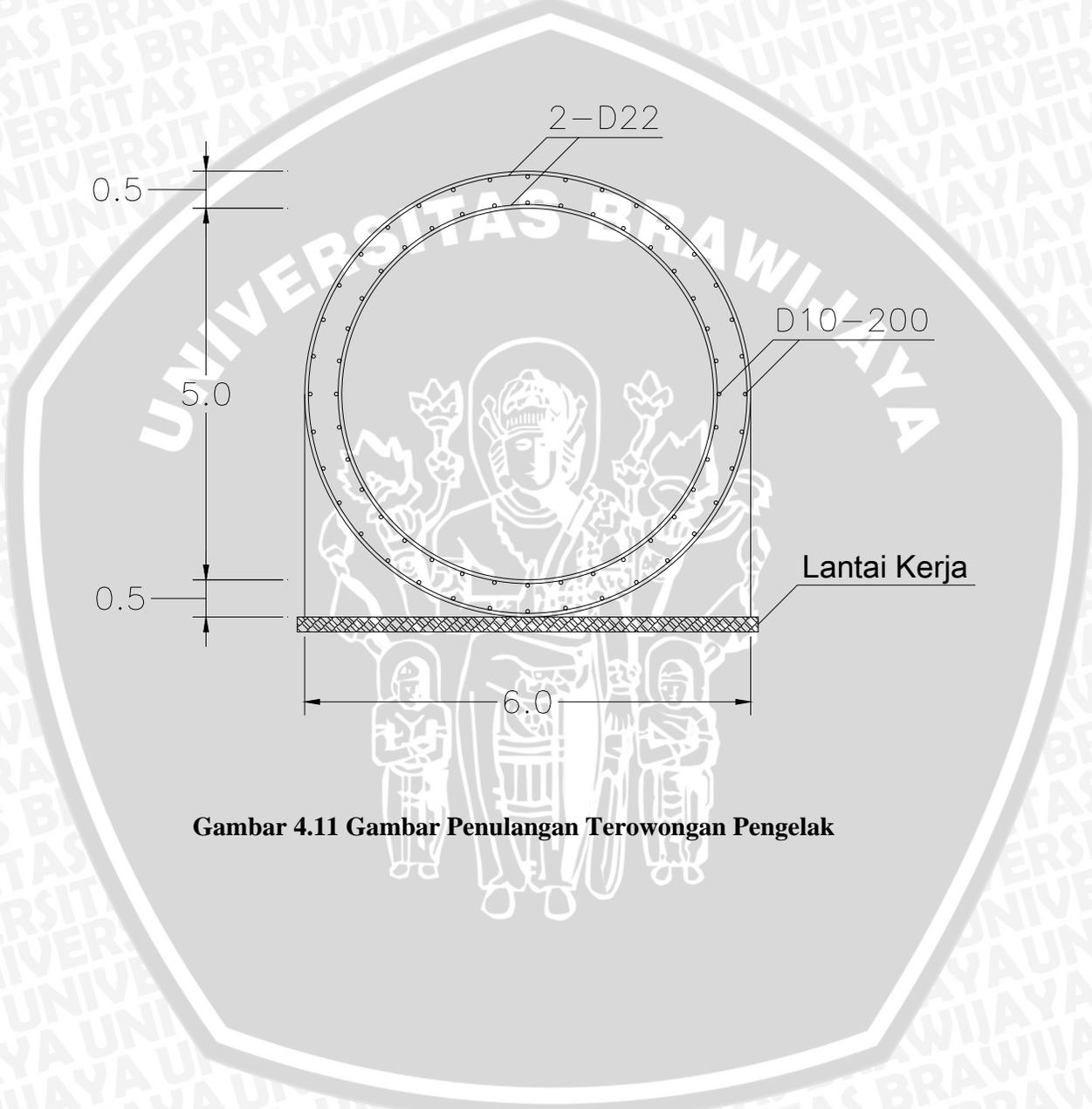
$$A_s = 268,6 \text{ mm}^2$$

Digunakan tulangan geser 2D10-200 (357 mm^2)



4.5.2 Gambar Penulangan Terowongan Pengelak

Setelah dilakukan perhitungan penulangan maka didapatkan dimensi dan jarak tulangan yang akan dipasang dalam konstruksi terowongan, berikut ini disajikan gambar penulangan terowongan pengelak berbentuk lingkaran.



Gambar 4.11 Gambar Penulangan Terowongan Pengelak



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Terowongan pengelak bendungan Lolak direncanakan berbentuk lingkaran. Dari data penelusuran banjir melalui terowongan diperoleh debit banjir maksimum yang akan masuk ke terowongan sebesar $= 373,17 \text{ m}^3/\text{dtk}$, dengan tinggi jagaan di depan coverdam 2,8 m untuk dimensi terowongan diameter 5 m.
2. Berdasarkan dimensi terowongan yang sudah direncanakan menggunakan penelusuran banjir, diperoleh terowongan lingkaran dengan diameter 5 m, selanjutnya ditinjau terhadap kondisi hidrolika yang terjadi pada terowongan yaitu pada kondisi aliran bebas dan aliran tertekan. Didapatkan Q outflow pada elevasi muka air maksimum 54,2 m yaitu sebesar $259,70 \text{ m}^3/\text{dtk}$, karena debit banjir yang terjadi lebih kecil atau sama dengan debit banjir maksimum yang akan masuk, maka dimensi yang direncanakan masih mencukupi dan aman.
3. Pemilihan alternatif bentuk terowongan pengelak ini didasarkan atas beberapa pertimbangan, dilihat dari bentuknya, bentuk lingkaran yang tidak ada sikunya maka jalannya air akan lebih lancar dibanding bentuk bujur sangkar yang terdapat siku-siku sehingga air mengalami hambatan. Bentuk lingkaran cocok digunakan untuk aliran dengan kecepatan tinggi, sedangkan bentuk persegi atau tapal kuda biasanya digunakan untuk aliran dengan kecepatan rendah.
4. Kontrol stabilitas ditinjau pada 2 kondisi, yaitu kondisi kosong dan kondisi penuh. Dari perhitungan dapat disimpulkan bahwa konstruksi yang direncanakan masih aman, karena tegangan tanah yang terjadi lebih kecil dari tegangan ijin tanah.
 - Tegangan tanah saat terowongan kosong $= 1,0396 \text{ kg/cm}^2 < \bar{\sigma} = 8 \text{ kg/cm}^2$
 - Tegangan tanah saat terowongan penuh $= 1,367 \text{ kg/cm}^2 < \bar{\sigma} = 8 \text{ kg/cm}^2$
5. Berdasarkan kombinasi pembebanan yang ada didapatkan kondisi yang paling membahayakan terhadap struktur terowongan yaitu pada saat kondisi II, ketika terowongan belum beroperasi dengan perencanaan kondisi gempa. Dari

perhitungan dengan menggunakan *software* Staad Pro didapatkan gaya-gaya dalam yang bekerja pada terowongan:

- $M_{max} = 15,292 \text{ Ton-m}$
- $F_x \text{ max} = 83,517 \text{ Ton}$
- $F_y \text{ max} = 40,29 \text{ Ton}$

Dari perhitungan penulangan pada terowongan dengan menggunakan teori *column analogy* dan tata cara perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SNI03-2847-2002) diperoleh penulangan sebagai berikut :

- Penulangan arah vertikal menggunakan tulangan 2-D22
- Penulangan arah horizontal menggunakan tulangan D10-200

5.2 Saran

Panjang terowongan pengelak yang mencapai 371 meter tidak mungkin dapat dicor langsung sepanjang terowongan dalam sekali pembetonan. Oleh karena itu, harus diperhatikan siar pelaksanaannya, atau pada setiap sambungan sebaiknya dipasang *concrete water stop*. Hal ini diperlukan untuk mencegah terjadinya kebocoran pada daerah sambungan yang akan menyebabkan rembesan air ke dalam tulangan sehingga menimbulkan korosi. Rembesan dan kebocoran tersebut juga akan menyebabkan ketidakefisienan pengaliran air dalam terowongan serta mengganggu kestabilan terowongan akibat rembesan pada tanah dan mempengaruhi tumpuan struktur terowongan tersebut.