

**PERENCANAAN TEROWONGAN PENGELAK PADA
BENDUNGAN KUALU KABUPATEN TOBA SAMOSIR PROVINSI
SUMATRA UTARA**

SKRIPSI

TEKNIK PENGAIRAN KONSENTRASI PERENCANAAN TEKNIK BANGUNAN AIR

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**AFAN ALLAIL ROFIKHA
NIM. 155060400111036**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2019**

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan petunjuk serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi yang berjudul **“Perencanaan Terowongan Pengelak pada Bendungan Kualu Kabupaten Toba Samosir Provinsi Sumatra Utara”** tidak akan berakhir dengan baik tanpa restu-Nya, serta sholawat dan salam senantiasa tercurah kepada junjungan kita semua Nabi Besar Muhammad SAW beserta kepada keluarga dan sahabat - sahabatnya.

Laporan skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat yang harus ditempuh mahasiswa Jurusan Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam pengerjaan laporan ini masih banyak kekurangan, sehingga laporan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, hal ini dikarenakan keterbatasan pengetahuan dan pengalaman yang dimiliki penulis dalam proses penulisan laporan yang memakan waktu dan tenaga.

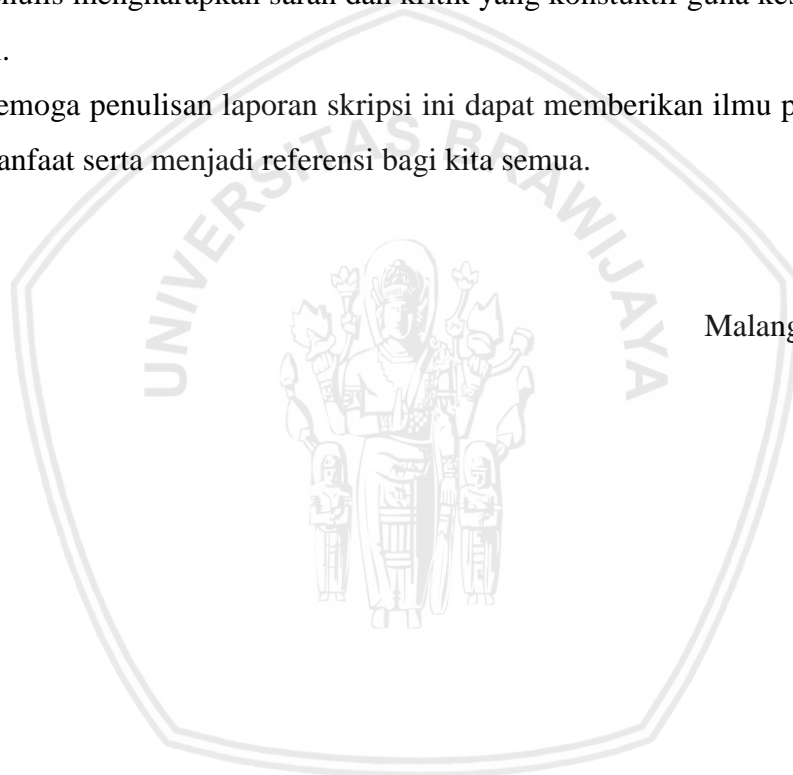
Dalam pengerjaan laporan skripsi ini tentu saja banyak pihak yang turut membantu dalam kelancaran penulisan, untuk itu penulis ingin berterima kasih sebesar – besarnya antara lain kepada :

1. Ayah dan Ibu tercinta atas do'a, perhatian, kasih sayang, serta motivasi yang tak henti-hentinya dalam penulisan laporan skripsi dan selama masa studi di Universitas Brawijaya.
2. Kedua kakakku Aviv dan Andris, Kedua Adikku Aizul dan Anas, dan terutama untuk Dewi Amalia atas perhatian, motivasi serta dukungan yang tak henti-hentinya selama masa studi ini.
3. Bapak Ir. Suwanto Marsudi, MS., dan Ibu Dr. Eng. Evi Nur Cahya, ST., MT., selaku dosen pembimbing skripsi yang dengan kesabarannya telah membimbing, memberi masukan serta motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
4. Bapak Ir. M. Taufik, MT., dan Bapak Prima Hadi Wicaksono, ST., MT., selaku dosen penguji I dan II yang telah memberi kritik dan saran kepada penulis dalam penyempurnaan skripsi ini.
5. Bapak Ir. Heri Suprijanto, MS., selaku dosen Ketua Kelompok Dosen Keahlian (KKDK) yang telah memberikan kritik, saran dan ilmunya yang sangat berguna dalam penulisan skripsi ini.
6. Kepada UUK BPP Fakultas Teknik Universitas Brawijaya atas ketersediaannya dalam penyajian data – data yang penulis butuhkan dalam penyelesaian laporan skripsi ini.

7. Mas Dimas, Mas Riza, Mbak Santi, Mbak Dyah yang selalu memberikan masukan dan bantuan dalam proses pengerjaan skripsi ini.
6. Teman-teman Terbaikku di Arfin Fansclub, kemudian Dessy, Acik, Andy, Bayu, dan Aqsha atas segala dukungan, motivasi serta canda tawa selama perkuliahan di Teknik Pengairan ini.
8. Rekan – rekan Keluarga Besar Mahasiswa Pengairan, khususnya kepada rekan Pengairan 2015 atas bantuan dan dukungannya yang luar biasa.
9. Dan seluruh pihak yang namanya tidak bisa disebutkan satu – persatu yang telah membantu penulis baik secara moril dan materil.

Dengan ini penulis mengharapkan saran dan kritik yang konstruktif guna kesempurnaan laporan skripsi ini.

Akhir kata, semoga penulisan laporan skripsi ini dapat memberikan ilmu pengetahuan yang sangat bermanfaat serta menjadi referensi bagi kita semua.



Malang, Juni 2019

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xv
RINGKASAN	xvii
SUMMARY	xix
 BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi masalah	1
1.3 Rumusan masalah	2
1.4 Batasan masalah	2
1.5 Tujuan	2
1.6 Manfaat / kegunaan	3
 BAB II KAJIAN PUSTAKA	
2.1 Umum	5
2.2 Pemilihan Debit Banjir Rencana	6
2.3 Metode Pengelakan	8
2.3.1 Terowongan	8
2.3.2 Konduit	9
2.4 Analisis Penelusuran Banjir pada Saluran Pengelak	9
2.5 <i>Coferdam</i>	14
2.5.1 Tinggi <i>Cofferdam</i>	14
2.5.2 Lebar Puncak	15
2.5.3 Kemiringan <i>Cofferdam</i>	15
2.6 Karakteristik batuan	16
2.7 Perhitungan koefisien gempa	16
2.8 <i>Rock Quality Designation (RQD)</i>	18
2.9 Teori Pembebanan Batuan	20



2.9.1 Klasifikasi Batuan	20
2.9.2 Faktor Pembebanan Batuan	21
2.9.3 Teori Pembebanan Terzaghi	22
2.9.4 Pembebanan pada Terowongan.....	24
2.9.4.1 Tekanan Batuan Vertikal	25
2.9.4.2 Tekanan Batuan Horizontal.....	25
2.9.4.3 Tekanan Air Horizontal.....	27
2.9.4.4 Beban Air Vertikal	28
2.9.4.5 Beban Akibat Konstruksi Terowongan Sendiri.....	28
2.9.4.6 Tekanan Air dalam Terowongan.....	29
2.9.4.7 Tekanan <i>Uplift</i>	29
2.9.4.8 Beban Kendaraan	30
2.10 Kondisi Perencanaan	31
2.11 Bentuk-Bentuk Konstruksi Terowongan	32
2.12 Software Staad Pro untuk Analisa Struktur	37
2.12.1 Input	38
2.12.2 Output.....	39
2.12.3 Sistem Koordinat.....	39
2.12.4 Kelebihan Software Staad Pro.....	40
2.12.5 Kekurangan Software Staad Pro	40
2.13 Penulangan pada Konstruksi Dinding Terowongan.....	41
2.13.1 Fungsi beton dan Tulangan	41
2.13.2 Tulangan Utama	41
2.13.3 Tulangan Geser	41
2.13.4 Langkah Perencanaan Penulangan	42
2.13.5 Mutu Beton.....	44
2.13.6 Mutu Baja dan Tulangan	44
2.13.7 Tebal Selimut Beton.....	46
BAB III KONDISI DAERAH STUDI	
3.1 Deskripsi Daerah Studi	47
3.1.1 Kondisi Topografi.....	48
3.1.2 Kondisi Geologi.....	48
3.1.3 Statigrafafi	49

3.2 Data yang diperlukan	49
3.3 Langkah-langkah Perencanaan.....	50
3.4 Diagram Alir Penyelesaian Studi.....	51
3.5 Diagram Alir Perhitungan Menggunakan Staad Pro.....	51

BAB IV Pembahasan

4.1 Data Perencanaan.....	53
4.1.1 Data Teknis Terowongan Pengelak	53
4.1.2 Data Debit Banjir Rancangan	54
4.2 Penentuan Dimensi Terowongan	55
4.3 Lengkung Kapasitas Waduk	55
4.4 Perhitungan Penelusuran Banjir	56
4.4.1 Perhitungan Penelusuran Banjir Diameter 6m	58
4.4.2 Perhitungan Penelusuran Banjir Diameter 7m	66
4.4.3 Perhitungan Penelusuran Banjir Diameter 8m	75
4.4.4 Perhitungan Penelusuran Banjir Diameter 9m	82
4.4.5 Perhitungan Penelusuran Banjir Diameter 10m	89
4.4.6 Analisa Pemilihan Dimensi Terowongan Pengelak	95
4.5 <i>Cofferdam</i>	96
4.5.1 Perhitungan Tinggi <i>Cofferdam</i>	96
4.5.1 Perhitungan Lebar Puncak <i>Cofferdam</i>	97
4.5.2 Perhitungan Kemiringan Lereng	97
4.5.4 Material Tubuh <i>Cofferdam</i>	97
4.6 Perhitungan Konstruksi	98
4.7 Perhitungan Pembebanan.....	99
4.8 Kondisi Perencanaan	114
4.9 Perhitungan Momen, Lintang, dan Normal	119
4.9.1 Kondisi Setelah Dibangun	121
4.9.2 Kondisi Setelah Dibangun (Gempa).....	124
4.9.3 Kondisi Setelah Beroperasi.....	126
4.9.4 Kondisi Setelah Beroperasi (Gempa)	129
4.10 Perhitungan Momen, Lintang, dan Normal Menggunakan Staad Pro	133
4.11 Rekapitulasi Momen, Normal, dan Lintang Maksimum Metode Beggs	155
4.12 Penulangan pada Terowongan	161



4.12.1 Penulangan Utama.....	161
4.12.2 Penulangan Geser	162
4.13 Alternatif Desain Terowongan Pengelak.....	166

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan.....	179
5.2 Saran	181

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Pemilihan Kala Ulang Banjir Rancangan.....	7
Tabel 2.2	<i>Velocity head and discharge at critical depth</i>	11
Tabel 2.3	<i>Uniform Flow in Horshoe Sections Flowing Party full</i>	12
Tabel 2.4	Standard Ruang Bebas Menurut Jancold.....	15
Tabel 2.5	Kemiringan Lereng yang Dianjurkan.....	16
Tabel 2.6	<i>Probabilistic Hazard Maps</i>	17
Tabel 2.7	Implementasi dari Peta Hazard Indonesia.....	17
Tabel 2.8	Hubungan Indeks RQD dengan Kualitas Batuan.....	20
Tabel 2.9	Klasifikasi tinggi muatan batuan (H_p) pada kedalaman lebih dari 1,5.....	23
Tabel 2.10	Konversi Mutu Beton $f'c$ ke K.....	44
Tabel 2.11	Mutu Baja Tulangan.....	46
Tabel 4.1	Debit Banjir Rancangan.....	54
Tabel 4.2	Lengkung Kapasitas Waduk.....	55
Tabel 4.3	Kapasitas Pengaliran Saat Kondisi Aliran Bebas $h < 1,2$ Diameter 6m.....	59
Tabel 4.4	Perhitungan Debit pada Saat Kondisi Kritis Diameter 6m.....	60
Tabel 4.5	Kapasitas Aliran Saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$ Diameter 6m.....	60
Tabel 4.6	Hubungan Antara H, Q, Psi dan Phi Terowongan Pengelak Diameter 6m.....	63
Tabel 4.7	Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak Diameter 6m.....	64
Tabel 4.8	Kapasitas Pengaliran Saat Kondisi Aliran Bebas $h < 1,2$ Diameter 7m.....	67
Tabel 4.9	Perhitungan Debit pada Saat Kondisi Kritis Diameter 7m.....	68
Tabel 4.10	Kapasitas Aliran Saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$ Diameter 7m.....	68
Tabel 4.11	Hubungan Antara H, Q, Psi dan Phi Terowongan Pengelak Diameter 7m.....	71
Tabel 4.12	Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak Diameter 7m.....	72
Tabel 4.13	Kapasitas Pengaliran Saat Kondisi Aliran Bebas $h < 1,2$ Diameter 8m.....	75
Tabel 4.14	Perhitungan Debit pada Saat Kondisi Kritis Diameter 8m.....	76

Tabel 4.15	Kapasitas Aliran Saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$ Diameter 8m.....	76
Tabel 4.16	Hubungan Antara H, Q, Psi dan Phi Terowongan Pengelak Diameter 8m	79
Tabel 4.17	Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak Diameter 8m	79
Tabel 4.18	Kapasitas Pengaliran Saat Kondisi Aliran Bebas $h < 1,2$ Diameter 9m	82
Tabel 4.19	Perhitungan Debit pada Saat Kondisi Kritis Diameter 9m	83
Tabel 4.20	Kapasitas Aliran Saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$ Diameter 9m.....	84
Tabel 4.21	Hubungan Antara H, Q, Psi dan Phi Terowongan Pengelak Diameter 9m	86
Tabel 4.22	Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak Diameter 9m	86
Tabel 4.23	Kapasitas Pengaliran Saat Kondisi Aliran Bebas $h < 1,2$ Diameter 10m ..	89
Tabel 4.24	Perhitungan Debit pada Saat Kondisi Kritis Diameter 10m	90
Tabel 4.25	Kapasitas Aliran Saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$ Diameter 10m.....	91
Tabel 4.26	Hubungan Antara H, Q, Psi dan Phi Terowongan Pengelak Diameter 10m	93
Tabel 4.27	Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak Diameter 10m	93
Tabel 4.28	Rekapitulasi Hasil Penelusuran Banjir.....	96
Tabel 4.29	Standard Ruang Bebas Menurut JANCOLD	96
Tabel 4.30	Sketsa Rencana pada Terowongan Pengelak	100
Tabel 4.31	Korelasi N SPT	102
Tabel 4.32	Nilai Percepatan Gempa.....	106
Tabel 4.33	Reaksi Pondasi Kondisi Setelah Dibangun	113
Tabel 4.34	Reaksi Pondasi Kondisi Pengoperasian	113
Tabel 4.35	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Berat Sendiri Kondisi Setelah Dibangun	121
Tabel 4.36	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Vertikal Kondisi Setelah Dibangun.....	123
Tabel 4.37	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Horizontal Kondisi Setelah Dibangun	123
Tabel 4.38	Total Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Kondisi Setelah Dibangun.....	124
Tabel 4.39	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Berat Sendiri Kondisi Setelah Dibangun (gempa)	124

Tabel 4.40	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Vertikal Kondisi Setelah Dibangun (gempa)	125
Tabel 4.41	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Horizontal Kondisi Setelah Dibangun (gempa)	125
Tabel 4.42	Total Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Kondisi Setelah Dibangun (gempa).....	126
Tabel 4.43	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Berat Sendiri Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi	126
Tabel 4.44	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Vertikal Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi.....	127
Tabel 4.45	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Air Horizontal Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi	127
Tabel 4.46	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Air Vertikal Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi	128
Tabel 4.47	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi.....	128
Tabel 4.48	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Air dari Dalam Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi	129
Tabel 4.49	Total Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi	129
Tabel 4.50	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Berat Sendiri Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi (gempa).....	130
Tabel 4.51	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Vertikal Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi (gempa)	130
Tabel 4.52	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Air Horizontal Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi (gempa)	131
Tabel 4.53	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Air Vertikal Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi (gempa)	131
Tabel 4.54	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Horizontal Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi (gempa) .	132
Tabel 4.55	Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Air dari Dalam Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi (gempa)	132
Tabel 4.56	Total Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi (gempa).....	133



Tabel 4.57	Momen Maksimum Searah Sumbu x (m_x) untuk tebal plat 75 cm	150
Tabel 4.58	Momen Maksimum Searah Sumbu y (m_y) untuk tebal plat 75 cm	150
Tabel 4.59	Rekapitulasi Momen, Normal, dan Lintang Maksimum.....	155
Tabel 4.60	Perbandingan Perhitungan Antara Metode Beggs dan Staad Pro	163
Tabel 4.61	Momen Maksimum Searah Sumbu x dengan Tebal Plat 40 cm	168
Tabel 4.62	Momen Maksimum Searah Sumbu y dengan Tebal Plat 40 cm	168
Tabel 4.63	Momen Maksimum Searah Sumbu x dengan Tebal Plat 50 cm	171
Tabel 4.64	Momen Maksimum Searah Sumbu y dengan Tebal Plat 50 cm	171



DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Hidrolika Aliran dalam Pengelak saat Aliran Bebas	10
Gambar 2.2	Sketsa Aliran Bebas pada Terowongan bentuk lingkaran	10
Gambar 2.3	Hidrolika Aliran dalam Pengelak saat Aliran Tertekan.....	14
Gambar 2.4	Peta Zona Gempa Indonesia 2017	17
Gambar 2.5	Modifikasi Pengambilan Ulang Inti sebagai Indeks Kualitas (RQD) Massa Batuan	19
Gambar 2.6	Contoh Prosedur Perekaman inti RQD.....	20
Gambar 2.7	Konsep Pembebanan Batuan Terzaghi pada Terowongan	22
Gambar 2.8	Diagram Tekanan Batuan Vertikal	25
Gambar 2.9	Diagram Tekanan Batuan Horizontal	26
Gambar 2.10	Diagram Tekanan Air Horizontal	27
Gambar 2.11	Diagram Tekanan Air Vertikal	28
Gambar 2.12	Diagram Tekanan Air dari Dalam Terowongan	29
Gambar 2.13	Diagram Tekanan <i>Uplift</i>	30
Gambar 2.14	Bentuk Terowongan A, B dan C.....	32
Gambar 2.15	Bentuk Terowongan D, E, dan F	33
Gambar 2.16	Bentuk Terowongan <i>Circular</i> , <i>Square</i> dan G.....	33
Gambar 2.17	Koefisien Pembebanan Beban Akibat Berat Sendiri	34
Gambar 2.18	Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Batuan Vertikal	35
Gambar 2.19	Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Air Horizontal	35
Gambar 2.20	Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Air Vertikal	36
Gambar 2.21	Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Air Horizontal	36
Gambar 2.22	Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Air dari Dalam	37
Gambar 2.23	<i>Graphic User Interface</i> dari <i>StaadPro</i>	38
Gambar 2.24	Sistem Koordinat Global.....	39
Gambar 2.25	Sistem Koordinat Lokal	40
Gambar 2.26	Desain Terowongan Pengelak	42
Gambar 3.1	Lokasi Daerah Studi	47
Gambar 3.2	Kondisi Topografi Daerah Studi.....	49

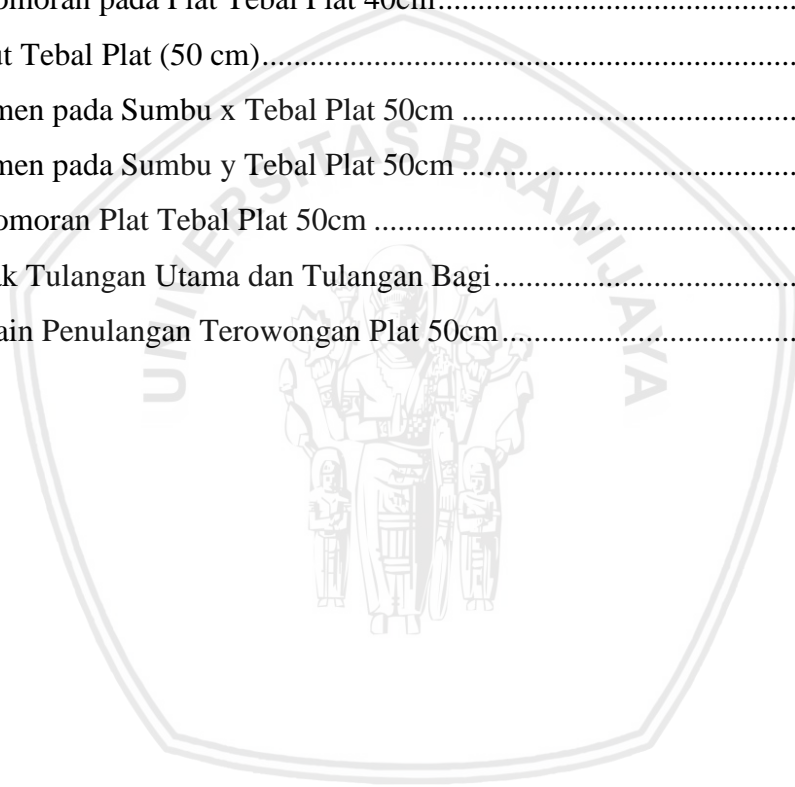


Gambar 3.3	Diagram Alir Penyelesaian Studi	51
Gambar 3.4	Diagram Alir Perhitungan Menggunakan Software Staad Pro	52
Gambar 4.1	Desain Terowongan Pengelak Shape F	53
Gambar 4.2	Sketsa Memanjang Terowongan Pengelak.....	54
Gambar 4.3	Sketsa Desain Terowongan Pengelak.....	55
Gambar 4.4	Karakteristik Hidrolika Aliran Bebas.....	57
Gambar 4.5	Karakteristik Hidrolika Aliran Tertekan	58
Gambar 4.6	Grafik Perhitungan <i>Rating Curve</i> Saluran Pengelak Diameter 6m.....	63
Gambar 4.7	Grafik Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak Diameter 6m.....	66
Gambar 4.8	Grafik Perhitungan <i>Rating Curve</i> Saluran Pengelak Diameter 7m.....	71
Gambar 4.9	Grafik Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak Diameter 7m.....	74
Gambar 4.10	Grafik Perhitungan <i>Rating Curve</i> Saluran Pengelak Diameter 8m.....	78
Gambar 4.11	Grafik Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak Diameter 8m.....	81
Gambar 4.12	Grafik Perhitungan <i>Rating Curve</i> Saluran Pengelak Diameter 9m.....	85
Gambar 4.13	Grafik Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak Diameter 9m.....	88
Gambar 4.14	Grafik Perhitungan <i>Rating Curve</i> Saluran Pengelak Diameter 10m.....	92
Gambar 4.15	Grafik Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak Diameter 10m.....	95
Gambar 4.16	Desain <i>Cofferdam</i>	98
Gambar 4.17	Potongan Melintang Rencana Desain Terowongan Pengelak.....	99
Gambar 4.18	Potongan Memanjang Terowongan Pengelak dan Letak <i>Borehole</i>	100
Gambar 4.19	Desain Terowongan Pengelak pada <i>Borehole</i> 16.....	101
Gambar 4.20	Diagram Tekanan Batuan Vertikal.....	103
Gambar 4.21	Sketsa δ pada terowongan pengelak.....	104
Gambar 4.22	Diagram Tekanan Batuan Horizontal.....	105
Gambar 4.23	Peta Zona Gempa Indonesia 2017.....	105
Gambar 4.24	Tekanan Batuan Horizontal (gempa)	108
Gambar 4.25	Tekanan Air Horizontal.....	108
Gambar 4.26	Diagram Tekanan Air Vertikal.....	109
Gambar 4.27	Tekanan Air dari Dalam	110
Gambar 4.28	Tekanan <i>Uplift</i>	111
Gambar 4.29	Kedalaman Terowongan dari Permukaan Tanah	112
Gambar 4.30	Diagram Reaksi Pondasi	114
Gambar 4.31	Diagram pada Saat Kondisi Setelah Dibangun	115
Gambar 4.32	Diagram pada Saat Kondisi Setelah Dibangun (gempa).....	116



Gambar 4.33 Diagram pada Saat Beroperasi.....	117
Gambar 4.34 Diagram pada Saat Beroperasi (gempa)	118
Gambar 4.35 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Berat Sendiri	119
Gambar 4.36 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Batuan Vertikal	119
Gambar 4.37 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Air Horizontal	120
Gambar 4.38 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Air Vertikal	120
Gambar 4.39 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Batuan Horizontal	120
Gambar 4.40 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Air dari Dalam	121
Gambar 4.41 Jendela <i>New Model</i>	134
Gambar 4.42 Bentuk Terowongan Tapal Kuda <i>Shape F</i> Tampak Depan	135
Gambar 4.43 Jendela <i>Translational Repeat</i>	135
Gambar 4.44 Bentuk Terowongan Tapal Kuda <i>Shape F</i> Tampak <i>Isometric</i>	136
Gambar 4.45 Jendela <i>Plate Element</i>	137
Gambar 4.46 Bentuk Terowongan Tapal Kuda <i>Shape F</i> Tampak 3D <i>Rendered</i>	137
Gambar 4.47 <i>Input Load Case</i>	138
Gambar 4.48 Input Beban Akibat Berat Sendiri	139
Gambar 4.49 Beban Akibat Berat Sendiri	139
Gambar 4.50 Input Beban Batuan Vertikal	140
Gambar 4.51 Bentuk Beban Batuan Vertikal	140
Gambar 4.52 Input Beban Batuan Horizontal	141
Gambar 4.53 Bentuk Beban Batuan Horizontal	141
Gambar 4.54 Input Beban Akibat Tekanan Tanah Horizontal	142
Gambar 4.55 Bentuk Tekanan Tanah Horizontal	142
Gambar 4.56 Input Beban Akibat Tekanan Air dari Dalam.....	143
Gambar 4.57 Bentuk Tekanan Air dari Dalam	143
Gambar 4.58 Input Beban Akibat Tekanan <i>Uplift</i>	144
Gambar 4.59 Bentuk Beban Akibat Tekanan <i>Uplift</i>	144
Gambar 4.60 Input Beban Akibat Tekanan Air Vertikal.....	145
Gambar 4.61 Bentuk Tekanan Air Vertikal.....	145
Gambar 4.62 <i>Result Setup</i>	147
Gambar 4.63 <i>Diagrams</i>	148
Gambar 4.64 Hasil Perhitungan M_x Plat Setebal 75 cm	149
Gambar 4.65 Hasil Perhitungan M_y Plat Setebal 75 cm	149
Gambar 4.66 Penomoran pada Plat Plat Setebal 75 cm	150

Gambar 4.67 Sketsa Penulangan pada Terowongan Pengelak	155
Gambar 4.68 Gambar Momen Tabel Beggs Kondisi Setelah Dibangun	155
Gambar 4.69 Gambar Momen Tabel Beggs Kondisi Setelah Dibangun (Gempa)	156
Gambar 4.70 Gambar Momen Tabel Beggs Kondisi Setelah Beroperasi	157
Gambar 4.71 Gambar Momen Tabel Beggs Kondisi Setelah Dibangun (gempa)	158
Gambar 4.72 Sketsa Penulangan pada Terowongan Pengelak	163
Gambar 4.73 Input Tebal Plat (40 cm)	166
Gambar 4.74 Momen pada Sumbu x Tebal Plat 40cm	166
Gambar 4.75 Momen pada Sumbu y Tebal Plat 40cm	167
Gambar 4.76 Penomoran pada Plat Tebal Plat 40cm	167
Gambar 4.77 Input Tebal Plat (50 cm)	169
Gambar 4.78 Momen pada Sumbu x Tebal Plat 50cm	170
Gambar 4.79 Momen pada Sumbu y Tebal Plat 50cm	170
Gambar 4.80 Penomoran Plat Tebal Plat 50cm	171
Gambar 4.70 Letak Tulangan Utama dan Tulangan Bagi	177
Gambar 4.71 Desain Penulangan Terowongan Plat 50cm	177



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Gambar Perencanaan	183
Lampiran 2.	Perhitungan Hidrologi	188
Lampiran 3.	<i>Cross Geologi Kualu</i>	202
Lampiran 4.	<i>Detail Engineering Desain (DED) Kualu</i>	208
Lampiran 5.	Data Bor pada Terowongan Pengelak	262
Lampiran 6.	Hasil Perhitungan Software Staad Pro	291



Halaman ini sengaja dikosongkan



RINGKASAN

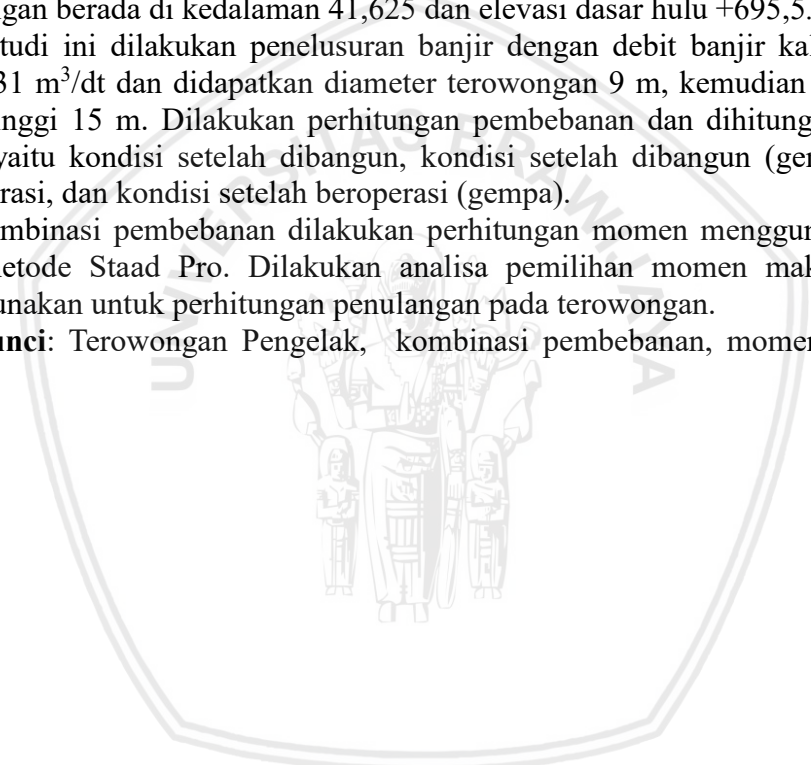
Afan Allail Rofikha, Jurusan Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juni 2019, *Perencanaan Terowongan Pengelak pada Bendungan Kualu Kabupaten Toba Samosir Provinsi Sumatra Utara*. Dosen Pembimbing: Ir. Suwanto Marsudi, MS. dan Dr. Eng. Evi Nur Cahya, ST., MT.

Bangunan pengelak terdiri dari terowongan pengelak dan bendungan pengelak. Bangunan yang harus dibangun pada awal konstruksi sebuah bendungan memiliki fungsi untuk mengalihkan aliran air sungai selama periode pembangunan bendungan. Perencanaan terowongan pengelak Bendungan Kualu didesain menggunakan bentuk tapal kuda *shape F*, hulu terowongan berada di kedalaman 41,625 dan elevasi dasar hulu +695,5.

Dalam studi ini dilakukan penelusuran banjir dengan debit banjir kala ulang 25th sebesar 709,331 m³/dt dan didapatkan diameter terowongan 9 m, kemudian direncanakan *cofferdam* setinggi 15 m. Dilakukan perhitungan pembebanan dan dihitung 4 kombinasi pembebanan yaitu kondisi setelah dibangun, kondisi setelah dibangun (gempa), kondisi setelah beroperasi, dan kondisi setelah beroperasi (gempa).

Hasil kombinasi pembebanan dilakukan perhitungan momen menggunakan metode Beggs dan metode Staad Pro. Dilakukan analisa pemilihan momen maksimum yang kemudian digunakan untuk perhitungan penulangan pada terowongan.

Kata kunci: Terowongan Pengelak, kombinasi pembebanan, momen maksimum, penulangan.



Halaman ini sengaja dikosongkan



SUMMARY

Afan Allail Rofikha, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, June 2019, *Diversion Tunnels Design of Kualu Dam Toba Samosir District North Sumatra Province*. Academic Supervisor: Ir. Heri Suprijanto, MS. and Dr. Eng Andre Primantyo H, ST., MT.

Diversion building consists of diversion tunnel and Cofferdam. The building should built in the early construction of the dam, have function to divert the river flow during the period of dam construction. The plans of Kualu dam diversion tunnel designed using horseshoe shape F, upstream of the tunnel at a depth of 41.625 and upstream elevation + 695.5.

In this study there was flood routing with Q25th which is 709,331 m³/s and obtained using a 9 m diameter, then a cofferdam is planned to built as high as 15 m. Based on the calculation of loading and calculated four load combinations, they are : conditions after being built, conditions after being built (with earthquake), conditions after operation, and conditions after operation (with earthquake).

The results of the load combinations, moment calculation obtained using Beggs method and Staad Pro method. There is an analysis to choose the maximum moment, then it used to calculate reinforcement in the tunnel.

Keywords: *Diversion Tunnel, Load Combination, Maximum Moment, Reinforcement.*

Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bendungan merupakan sebuah konstruksi yang didesain agar kuat untuk menahan dan menyimpan air, sehingga air dapat digunakan sesuai dengan keperluan. Permasalahan terhadap penyediaan berbagai kebutuhan air dapat terpenuhi dengan dibangunnya sebuah bendungan. Permasalahan yang dapat diatasi seperti penyediaan kebutuhan air untuk irigasi dan kebutuhan air baku. Selain itu dengan memanfaatkan energi potensial dan kinetik yang dimiliki air akan dapat menghasilkan energi listrik, maka untuk menambah pasokan listrik dapat dilakukan dengan membangun PLTA pada sebuah bendungan.

Pemerintah saat ini sedang sangat gencar memperbaiki ketertinggalan Indonesia di bidang infrastruktur. Ketertinggalan infrastruktur juga mengakibatkan pembangunan ekonomi nasional yang tidak merata. Oleh karena itu selain pembangunan jalan, jembatan, kereta, pemerintah juga membangun infrastruktur seperti waduk dan bendungan. Untuk meningkatkan produksi pertanian, penyediaan air baku dan penyediaan listrik, pemerintah saat ini menargetkan penyelesaian pembangunan 49 bendungan.

Bendungan Kualu adalah sebuah bendungan yang akan dibangun di Kabupaten Toba Samosir Provinsi Sumatra Utara. Proses pembangunan Bendungan Kualu memerlukan sebuah terowongan pengelak yang berfungsi untuk mengalihkan aliran sungai selama proses pembangunan bendungan berlangsung. Terowongan pengelak sangat penting dan wajib untuk dibangun untuk mendukung pelaksanaan konstruksi bendungan agar berjalan dengan lancar. Oleh karena itu, pada skripsi ini akan dibahas mengenai perencanaan terowongan pengelak Bendungan Kualu.

1.2 Identifikasi Masalah

Saluran pengelak memiliki fungsi untuk memindahkan aliran air sungai selama proses konstruksi bendungan. Saluran pengelak dapat berupa saluran terbuka (*diversion channel*), dan berbentuk saluran tertutup (*diversion tunnel*). Kedua jenis tersebut memiliki perbedaan dalam konsep perencanaannya, namun tujuannya tetap sama yaitu untuk memindahkan aliran sungai selama periode pembangunan bendungan. Pemilihan jenis saluran pengelak bergantung pada kondisi di lapangan. Selain dipilih konstruksi yang aman, perlu juga

memperhatikan pengeluaran biaya yang efisien.

Saluran pengelak pada Bendungan Kualu berupa terowongan (*diversion tunnel*). Karena letaknya berada di dalam tanah, maka terowongan akan menerima pembebanan secara vertikal dan horizontal. Selain itu, dalam perencanaan desain dari terowongan pengelak perlu memperhatikan beberapa faktor terkait, yaitu aspek hidrologi, hidrolika dan struktur dari terowongan tersebut. Faktor-faktor tersebut perlu diperhitungkan agar terowongan dapat berfungsi dengan baik sehingga proses pembangunan tubuh bendungan dapat berjalan dengan lancar.

1.3 Rumusan Masalah

Dengan pemaparan yang sudah tersebut di atas, maka permasalahan yang ada dapat dirumuskan sebagai berikut :

1. Berapakah dimensi terowongan pengelak yang direncanakan?
2. Bagaimana hasil perhitungan pembebanan pada terowongan tersebut?
3. Bagaimana hasil perhitungan momen, lintang dan normal pada terowongan menggunakan tabel beggs dan software Staad Pro?
4. Bagaimana penulangan yang direncanakan pada terowongan pengelak?

1.4 Batasan Masalah

Agar kajian yang dilakukan dapat fokus pada pembahasan, maka perlu dilakukan pembatasan masalah agar pembahasan tidak melebar. Beberapa batasan masalah pada kajian ini adalah sebagai berikut :

1. Pada studi ini hanya dilakukan perencanaan terowongan pengelak, tidak membahas bangunan-bangunan lain pada bendungan.
2. Perhitungan hidrologi mengikuti hasil perhitungan dari konsultan.
3. Perhitungan gaya momen, lintang dan normal menggunakan perhitungan manual dan software Staad Pro.
4. Kajian yang dilakukan tidak membahas rencana anggaran biaya (RAB).
5. Tidak membahas *grouting*.
6. Tidak membahas mengenai AMDAL.

1.5 Tujuan

Tujuan dari dilakukannya perencanaan terowongan pengelak pada Bendungan Kualu adalah:

1. Kajian ini bertujuan untuk mengetahui dimensi terowongan pengelak.
2. Kajian ini bertujuan untuk mengetahui hasil perhitungan pembebanan pada terowongan.

3. Kajian ini bertujuan untuk mengetahui hasil perhitungan gaya momen, lintang dan normal menggunakan cara manual dan Software Staad Pro.
4. Kajian ini bertujuan untuk mengetahui penulangan pada terowongan pengelak.

1.6 Manfaat atau kegunaan

Dengan dilakukannya kajian dalam skripsi, maka kajian yang dilakukan diharapkan dapat memberikan manfaat bagi para pembaca dan untuk meningkatkan pengetahuan dalam kaitannya dengan perencanaan terowongan pengelak. Selain itu, kajian ini juga dapat menjadi referensi bagi para praktisi yang terlibat dalam perencanaan terowongan pengelak.



Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Umum

Saluran pengelak diperlukan untuk mengalihkan aliran sungai selama periode pelaksanaan konstruksi bendungan. Pada awal tahap konstruksi, perlu dikaji ulang periode ulang banjir yang ditetapkan pada saat desain dengan mempertimbangkan jadwal pelaksanaan konstruksi riil. Apabila jadwal pelaksanaan berubah maka periode ulang debit banjir desain pengelak perlu ditinjau kembali.

Pelaksanaan pengelakan mengacu pada Metode Pengontrolan Sungai Selama Pelaksanaan Konstruksi Bendungan, SNI 03-6456.1.2000 bagian 1, Pengendalian Sungai Selama Pelaksanaan Konstruksi Bendungan dan Bagian 2, Penutupan Alur Sungai dan Pembuatan Bendungan Pengelak. Beberapa jenis pengelak sungai yang lazim adalah sebagai berikut (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017):

1. Pengelakan seluruh lebar sungai dengan kombinasi bendungan pengelak (*cofferdam*) dan saluran tertutup berupa konduit atau terowong pengelak (*diversion tunnel*)
2. Pengelakan dengan saluran terbuka (*diversion channel*)
3. Pengelakan pada sebagian lebar sungai dan membiarkan bagian sungai yang lain untuk melewati air.

Dalam mendesain suatu bendungan yang menutup suatu sungai perlu mempertimbangkan cara atau metode untuk mengalihkan sungai tersebut selama konstruksi bendungan berlangsung. Permasalahan yang akan timbul sangat bervariasi, tergantung ukuran dan potensi banjir dari sungai tersebut. Meskipun demikian, pemilihan metode pengalihan sungai untuk menangani banjir selama konstruksi sangat penting ditinjau dari aspek ekonomi. Metode yang dipilih, biasanya merupakan suatu kombinasi antara biaya pengalihan / pengelakan sungai dengan resiko yang dihadapi. Oleh karena itu perlu dilakukan perencanaan dengan baik dan benar untuk mengurangi bahaya potensi kerusakan akibat banjir. Beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan metode pengelakan adalah sebagai berikut (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017):

1. Karakteristik aliran sungai

2. Banjir desain yang digunakan, sesuai dengan resiko yang dihadapi
3. Metode pengalihan/ pengelakan sungai
4. Spesifikasi yang diperlukan

2.2 Pemilihan Debit Banjir Rencana

Dalam pemilihan debit banjir rancangan untuk perencanaan terowongan pengelak secara ekonomis tidak mungkin untuk menggunakan debit banjir terbesar yang pernah terjadi. Hal ini dikarenakan terowongan pengelak dan bendungan pengelak hanya memberikan manfaat sementara. Oleh karena itu, perlu dilakukan pemilihan banjir rencana yang disesuaikan dengan resiko yang dihadapi. Untuk bendungan tipe urugan, bangunan harus didesain agar aman terhadap bahaya *overtopping*. Beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan besarnya banjir rencana yang akan digunakan, adalah (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017):

1. Waktu konstruksi yang diperlukan.
2. Biaya yang ditimbulkan akibat kerusakan bila terjadi banjir.
3. Biaya akibat tertundanya pekerjaan.
4. Keselamatan pekerja dan daerah banjir di hilirnya.

Untuk bendungan kecil yang dapat diselesaikan dalam waktu satu musim kering, dapat mempertimbangkan untuk menggunakan debit banjir tahunan saat musim kering terjadi. Namun, dengan pertimbangan faktor keamanan, biasanya diambil banjir rencana minimal 5 tahunan. Perencanaan pengelakan yang baik dapat meminimalkan potensi kerusakan akibat banjir yang berarti juga meminimalkan biaya yang diakibatkannya. Oleh karena itu, perencanaan sistim pengelak harus mempertimbangkan hal-hal sebagai berikut (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017):

1. Karakteristik atau sifat dari aliran sungai, aliran permukaan pada setiap daerah aliran sungai, masing-masing mempunyai aliran puncak dan periode aliran rendah pada waktu berbeda untuk setiap tahun, kondisi aliran permukaan tersebut akan mempengaruhi pemilihan atau penentuan sistem pengelakan sungai.
2. Debit banjir yang direncanakan. Penentuan debit banjir rencana untuk pengelakan sungai bergantung pada hal-hal yang tersebut dibawah ini:
 - Waktu pelaksanaan konstruksi, untuk mengantisipasi berapa kali terjadi banjir.
 - Biaya kerugian akibat banjir selama konstruksi.
 - Biaya akibat tidak beroperasinya tenaga atau peralatan berat dan selama perbaikan akibat banjir.

- Keselamatan kerja dan kerugian di bagian hilir saat terjadi banjir.
3. Metode atau cara pengelakan sungai dan pemilihan metode pengelakan adalah sebagai berikut:
- Besar banjir yang akan dialihkan,
 - Karakter fisik dari lokasi.
 - Tipe/ jenis bangunan pengelak yang akan digunakan.
 - Kondisi bangunan-bangunan pelengkap lainnya (spillway, outlet, dll).
 - Urutan/ tahapan pekerjaan konstruksi.

Pemilihan bergantung pada data-data yang tersedia dan dari jenis bangunan air tersebut. Kriteria pemilihan banjir dengan meninjau kemungkinan terjadinya banjir yang lebih besar atau sama dengan banjir rencana. Kriteria pemilihan banjir rancangan dapat dilihat seperti pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.1
Pemilihan Kala Ulang Banjir Rancangan

No	Jenis Bangunan Air	Kala Ulang Banjir (tahun)
1	Bendungan urugan tanah / batu	1000
2	Bendungan beton / batu kali	500 – 1000
3	Bendung	50 – 100
4	Saluran pengelak banjir	20 – 50
5	Tanggul sungai	10 – 20
6	Drainase saluran di sawah / pemukiman	5 – 10

Sumber : Loebis (1984, Hal.196)

2.3 Metode Pengelakan

Cara praktis untuk mengalihkan aliran sungai selama konstruksi berlangsung adalah menggunakan salah satu atau kombinasi dari cara berikut (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017):

1. Terowongan (tunnel) yang digali melalui bukit tumpuan.
2. Konduit yang melalui pondasi bendungan.

Konduit atau terowongan kadang-kadang dibuat cukup besar untuk mengalihkan aliran sungai. Untuk aliran sungai yang kecil, aliran sungai dapat *di-bypass* dengan menggunakan pipa-pipa baja atau beton. Biaya dan waktu pelaksanaan konstruksi terowongan pengelak, saluran dan gorong-gorong akan lebih besar untuk sungai yang lebih besar, disamping ditentukan oleh debit rencana, dimensi terowong dan elevasi muka air sesuai dengan aliran yang dielakkan.

Pemilihan tipe bendungan akan tergantung dari metode pengendalian sungai selama pelaksanaan, misalnya untuk bendungan urugan tanah tidak layak bila bangunan

pengelaknya tidak dapat menghindari limpasan sebelum pekerjaan selesai. Kadang-kadang lokasi bendungan perlu dipindahkan ke lembah yang lebih lebar untuk memberi fasilitas dalam pelaksanaan bangunan pengelak, meskipun terdapat tambahan volume pada bendungan utama. Hal ini penting khususnya pada sungai yang besar, tidak hanya pada pembangunan bendungan dengan *head* rendah, tetapi juga bendungan dengan *head* yang tinggi, dimana pada bagian lembah yang lebih sempit tidak selalu merupakan lokasi yang terbaik, jika pembuatan bangunan pengelak terlalu sulit dan mahal.

Kadang-kadang perlu diatur agar batang kayu, atau sampah lainnya dapat melewati bangunan pengelak dengan tanpa terjadi penyumbatan atau pengurangan kapasitas pengelak. Sampah tersebut mungkin dialirkan melalui terowong pengelak, tetapi bila diperkirakan terdapat tumpukan pohon tertentu, perencana harus menjamin bahwa terowong mempunyai dimensi yang longgar dengan jagaan yang cukup antara permukaan air bebas dan puncak terowongan.

2.3.1 Terowongan

Pada suatu lembah yang sempit, tidak mungkin untuk melakukan penggalian pondasi bendungan tanpa mengalihkan aliran sungai terlebih dahulu. Untuk kondisi lembah sempit ini, pengelakan sungai melalui terowongan akan lebih layak dibandingkan saluran konduit. Terowongan tersebut dapat dibuat pada satu sisi bukit tumpuan atau pada dua bukit tumpuannya. Terowongan pengelak ini dapat dimanfaatkan dan dikombinasikan sebagai bangunan pelimpah, sehingga dapat menekan biaya proyek secara keseluruhan.

Pada umumnya penggunaan terowongan dibatasi oleh kondisi lembah yang terdiri dari batuan dengan tebing yang curam. Keuntungannya adalah bahwa terowongan tidak mengganggu galian pondasi dan pelaksanaan pembuatan bendungan. Untuk lembah datar dan pada batuan lunak, konduit atau gorong-gorong di bawah bendungan urugan lebih menguntungkan, tetapi pengelakan sungai dengan terowong paling sering digunakan. Kecuali pada sungai yang lebih kecil, terowongan kembar (misalnya, satu pada setiap tebing) sering digunakan untuk alasan keamanan dan kemudahan. Pelaksanaan pembuatan terowongan dan pintu masuk di udik sering merupakan langkah yang kritis.

Penutupan permanen terowongan pengelak dapat dilakukan menggunakan beton penyumbat (*concrete plugging*) di dalam terowongan. Apabila terowongan pengelak (sementara) ini nantinya akan digunakan sebagai *spillway*, penyumbat biasanya diletakkan di bagian hulu dari bagian pertemuan terowongan. Kunci penahan (*keyways*) terhadap geser dapat dibuat pada batuan pondasi atau lining terowongan. Untuk perkuatan dan menjamin kekedapannya, disekeliling penyumbat biasanya dilakukan *grouting*.

Secara sebagian atau keseluruhan terowongan pengelak biasanya dapat digunakan menjadi bangunan permanen misalnya sebagai bangunan pengeluaran, terowongan pembangkit tenaga listrik atau pelimpah. Hal ini khususnya pada bendungan urugan tanah yang desainnya lebih sulit dari pada bendungan beton. Penghematan biaya yang berasal dari hal di atas mungkin seimbang dengan tambahan harga satuan akibat bentuk yang lebih rumit atau adanya penambahan waktu pelaksanaan. Apabila diperkirakan penghematan yang diperoleh hanya terbatas, maka lebih baik pekerjaan-pekerjaan tersebut dilaksanakan sendiri-sendiri (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017).

2.3.2 Konduit

Terowongan cocok diterapkan pada kondisi lapisan pondasi bendungan yang cukup bagus, sedangkan konduit atau gorong-gorong cocok diterapkan pada pondasi batuan yang lebih jelek dan pada lembah yang cukup lebar, sehingga mungkin biaya konstruksinya akan lebih tinggi. Konduit dibangun di daerah kering di bagian hilir bendungan pengelak dan bila sudah siap, aliran sungai dialihkan melalui konduit dan sistem penutupan dapat dilakukan seperti penutupan pada terowongan.

Bila kebutuhan pengelakan lebih besar dari kapasitas bangunan outlet yang sudah jadi, peningkatan kapasitas dapat dilakukan dengan melakukan penundaan terhadap pemasangan-pemasangan pintu, katup, pipa atau saringan sampah (*trashrack*) sampai kebutuhan tersebut selesai. Peningkatan kapasitas juga dapat dilakukan dengan meninggikan bendungan pengelak (*cofferdam*). Biasanya, dengan pertimbangan ekonomis, dilakukan optimalisasi terhadap diameter bukaan (ukuran konduit atau terowongan) dengan tinggi bendungan pengelak (*cofferdam*) (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017).

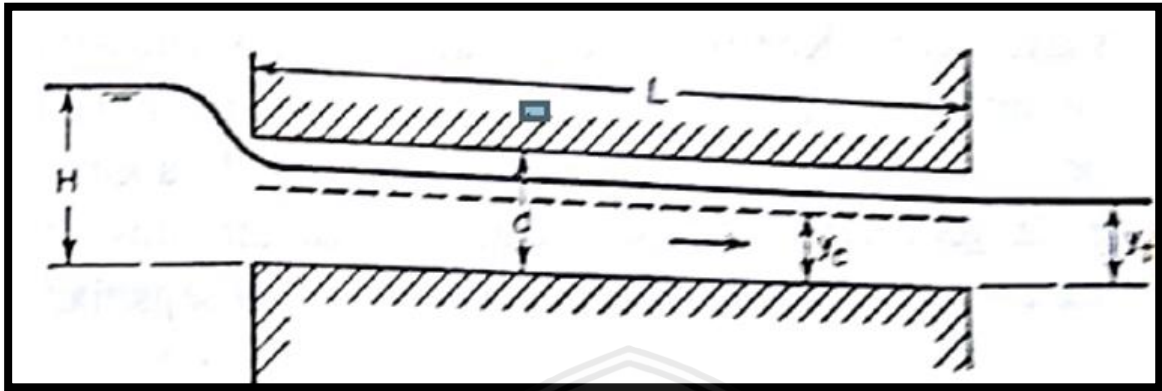
2.4 Analisis Penelusuran Banjir pada Saluran Pengelak

Perhitungan penelusuran banjir pada saluran pengelak wajib dilakukan agar terowongan dapat mengelakkan air selama periode pembangunan tubuh bendungan sesuai dengan debit banjir rancangan yang digunakan. Selain itu, dengan melakukan penelusuran banjir maka akan dapat direncanakan diameter dari terowongan pengelak yang paling sesuai dan kemudian dapat digunakan untuk menentukan tinggi *cofferdam* bagian hulu.

Analisis hidrolika pada terowongan pengelak didasarkan pada kapasitas pengalirannya. Ada tiga kondisi yang akan diperhitungkan yaitu kondisi bebas, kondisi transisi dan kondisi tertekan. Penjelasan terhadap ketiga jenis kondisi tersebut adalah sebagai berikut :

1. Perhitungan Aliran bebas (*free Flow*)

Aliran bebas terjadi ketika perbandingan tinggi muka air dan tinggi saluran kurang dari 1,2 D. Untuk penentuan tinggi muka air dan diameter terowongan pengelak digunakan rumus Manning (Chow, 1992) seperti pada gambar 2.1 berikut:

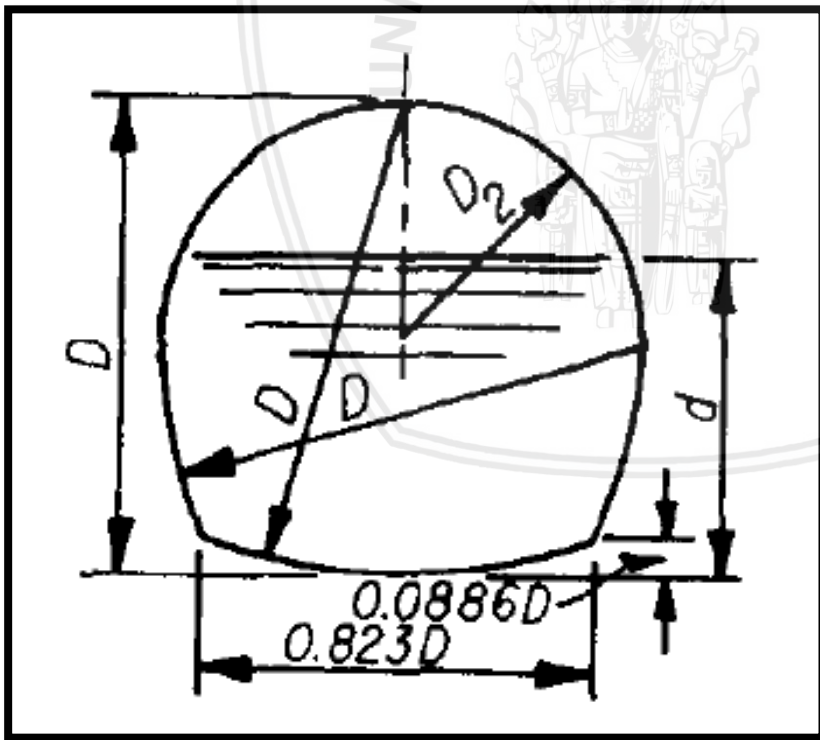


Gambar 2.1 Hidrolika Aliran dalam Pengelak saat Aliran Bebas

Sumber: Chow (1992, p.491)

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

Desain yang digunakan dalam perhitungan Hidrolika adalah sebagai berikut:



Gambar 2.2 Sketsa Desain Melintang Terowongan Pengelak

Sumber: United States Departement of the Interior (1987, p.580)

Perhitungan nilai A, P, hc, Qc dilakukan dengan interpolasi pada buku *design of small dam*. Tabel yang tersedia dapat dilihat pada tabel 2.2 dan tabel 2.3 di bawah ini.

Tabel 2.2
Velocity Head and Discharge at Critical Depths

d/D	hc / D	Qc / D ^{5/2}	P/D ²	d/D	h.c / D	Qc / D ^{5/2}	P/D ²
0,01	0,0033	0,0009	0,0000	0,51	0,2234	1,6928	0,1036
0,02	0,0067	0,0035	0,0000	0,52	0,2285	1,7505	0,1081
0,03	0,0100	0,0079	0,0001	0,53	0,2337	1,8092	0,1127
0,04	0,0134	0,0139	0,0002	0,54	0,2391	1,8688	0,1174
0,05	0,0168	0,0217	0,0004	0,55	0,2445	1,9294	0,1223
0,06	0,0201	0,0312	0,0007	0,56	0,2500	1,9911	0,1272
0,07	0,0235	0,0425	0,0010	0,57	0,2557	2,0537	0,1322
0,08	0,0269	0,0554	0,0014	0,58	0,2615	2,1174	0,1373
0,09	0,0305	0,0703	0,0018	0,59	0,2674	2,1821	0,1425
0,10	0,0351	0,0879	0,0024	0,60	0,2735	2,2479	0,1478
0,11	0,0397	0,1069	0,0030	0,61	0,2797	2,3148	0,1532
0,12	0,0443	0,1272	0,0037	0,62	0,2861	2,3828	0,1587
0,13	0,0489	0,1487	0,0045	0,63	0,2926	2,4519	0,1643
0,14	0,0534	0,1714	0,0054	0,64	0,2994	2,5221	0,1700
0,15	0,0579	0,1953	0,0063	0,65	0,3063	2,5936	0,1758
0,16	0,0624	0,2203	0,0074	0,66	0,3134	2,6663	0,1817
0,17	0,0669	0,2465	0,0085	0,67	0,3208	2,7402	0,1877
0,18	0,0714	0,2736	0,0098	0,68	0,3283	2,8155	0,1937
0,19	0,0758	0,3019	0,0111	0,69	0,3362	2,8922	0,1999
0,20	0,0803	0,3312	0,0125	0,70	0,3443	2,9702	0,2062
0,21	0,0847	0,3615	0,0140	0,71	0,3528	3,0499	0,2125
0,22	0,0891	0,3928	0,0156	0,72	0,3615	3,1311	0,2190
0,23	0,0936	0,4251	0,0173	0,73	0,3707	3,2140	0,2255
0,24	0,0980	0,4583	0,0191	0,74	0,3802	3,2987	0,2321
0,25	0,1024	0,4926	0,0210	0,75	0,3902	3,3853	0,2385
0,26	0,1069	0,5227	0,0229	0,76	0,4006	3,4740	0,2457
0,27	0,1113	0,5638	0,0250	0,77	0,4116	3,5650	0,2525
0,28	0,1158	0,6000	0,0271	0,78	0,4232	3,6584	0,2595
0,29	0,1202	0,6389	0,0294	0,79	0,4354	3,7544	0,2666
0,30	0,1247	0,6777	0,0317	0,80	0,4484	3,8534	0,2737
0,31	0,1292	0,7175	0,0342	0,81	0,4623	3,9557	0,2809
0,32	0,1337	0,7582	0,0367	0,82	0,4771	4,0616	0,2882
0,33	0,1382	0,7997	0,0393	0,83	0,4930	4,1716	0,2956
0,34	0,1427	0,8421	0,0421	0,84	0,5102	4,2863	0,3030
0,35	0,1472	0,8854	0,0449	0,85	0,5289	4,4063	0,3105
0,36	0,1518	0,9296	0,0478	0,86	0,5494	4,5325	0,3181
0,37	0,1563	0,9746	0,0508	0,87	0,5719	4,6660	0,3258
0,38	0,1609	1,0205	0,0540	0,88	0,5969	4,8080	0,3335

Lanjutan Tabel 2.2

Velocity Head and Discharge at Critical Depths

d/D	hc / D	Qc / D ^{5/2}	P/D ²	d/D	h.c / D	Qc / D ^{5/2}	P/D ²
0,39	0,1655	1,0673	0,0572	0,89	0,6251	4,9605	0,3413
0,40	0,1702	1,1148	0,0605	0,90	0,657	5,1256	0,3492
0,41	0,1749	1,1633	0,0639	0,91	0,6939	5,3065	0,3572
0,42	0,1795	1,2125	0,0675	0,92	0,7371	5,5077	0,3653
0,43	0,1843	1,2626	0,0711	0,93	0,7889	5,7354	0,3733
0,44	0,1890	1,3135	0,0748	0,94	0,8528	5,9996	0,3813
0,45	0,1938	1,3652	0,0786	0,95	0,9345	6,3157	0,3894
0,46	0,1986	1,4178	0,0825	0,96	1,0446	6,7114	0,3976
0,47	0,2035	1,4712	0,0865	0,97	1,2053	7,2417	0,4058
0,48	0,2084	1,5253	0,0907	0,98	1,4742	8,0892	0,414
0,49	0,2133	1,5803	0,0949	0,99	2,0804	9,578	0,4223
0,50	0,2183	1,6361	0,0992	1,00	-	-	0,43

Sumber: *United States Departement of the Interior* (1987, 580)

Tabel 2.3

Uniform Flow in Horseshoe Sections Flowing Party Full

d/D	A/D ²	r/D	Qn/(D ^{8/3} · S ^{1/2})	d/D	A/D ²	r/D	Qn/(D ^{8/3} · S ^{1/2})
0,01	0,0019	0,0066	0,0001	0,51	0,4466	0,2602	0,270
0,02	0,0053	0,0132	0,0004	0,52	0,4566	0,2630	0,278
0,03	0,0097	0,0198	0,0010	0,53	0,4666	0,2657	0,286
0,04	0,0150	0,0264	0,0019	0,54	0,4766	0,2683	0,294
0,05	0,0200	0,0329	0,0031	0,55	0,4865	0,2707	0,303
0,06	0,0275	0,0304	0,0047	0,56	0,4955	0,2733	0,311
0,07	0,0346	0,0459	0,0065	0,57	0,5064	0,2757	0,319
0,08	0,0421	0,0524	0,0087	0,58	0,5163	0,2781	0,327
0,09	0,0502	0,0590	0,0111	0,59	0,5261	0,2804	0,335
0,10	0,0585	0,0670	0,0143	0,60	0,5359	0,2824	0,343
0,11	0,0670	0,0748	0,0176	0,61	0,5457	0,2844	0,351
0,12	0,0763	0,0823	0,0211	0,62	0,5555	0,2864	0,350
0,13	0,0839	0,8950	0,0249	0,63	0,5651	0,2884	0,367
0,14	0,0925	0,0964	0,0289	0,64	0,5748	0,2902	0,374
0,15	0,1012	0,1031	0,0331	0,65	0,5848	0,2920	0,382
0,16	0,1100	0,1097	0,0375	0,66	0,5938	0,2937	0,390
0,17	0,1188	0,1161	0,0420	0,67	0,6033	0,2953	0,398
0,18	0,1277	0,1222	0,0467	0,68	0,6126	0,2067	0,405
0,19	0,1307	0,1282	0,0516	0,69	0,6219	0,2981	0,412
0,20	0,1457	0,1341	0,0567	0,70	0,6312	0,2994	0,420
0,21	0,1549	0,1398	0,0620	0,71	0,6403	0,3000	0,427
0,22	0,1640	0,1454	0,0674	0,72	0,6493	0,3018	0,434
0,23	0,1733	0,1508	0,0730	0,73	0,6582	0,3028	0,441
0,24	0,1825	0,1560	0,0786	0,74	0,6671	0,3036	0,448

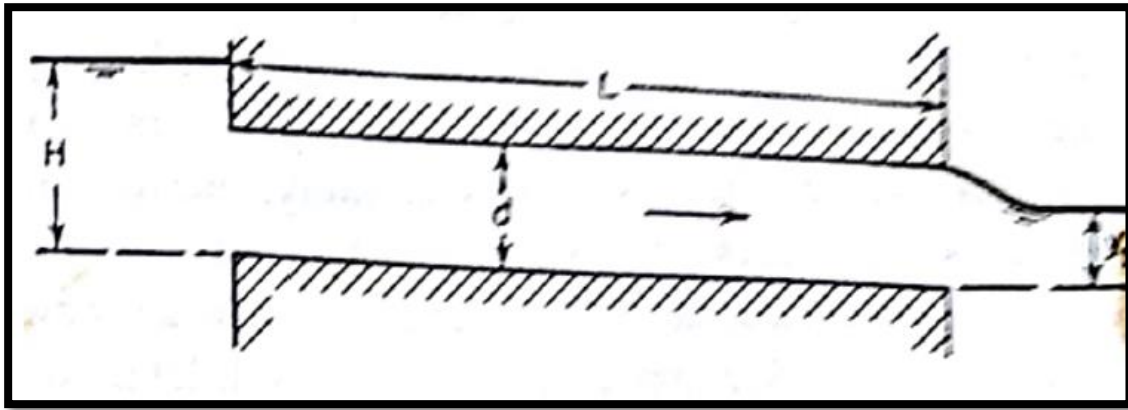
Lanjutan Tabel 2.3
Uniform Flow in Horseshoe Sections Flowing Party Full

d/D	A/D2	r/D	Qn/(D8/3 . S1/2)	d/D	A/D2	r/D	Qn/(D8/3 . S1/2)
0,25	0,1919	0,1611	0,0844	0,75	0,6758	0,3044	0,454
0,26	0,2013	0,1662	0,0904	0,76	0,6844	0,3050	0,461
0,27	0,2107	0,1710	0,0965	0,77	0,6929	0,3055	0,467
0,28	0,2202	0,1758	0,1027	0,78	0,7012	0,3060	0,473
0,29	0,2297	0,1804	0,1090	0,79	0,7094	0,3064	0,479
0,30	0,2303	0,1850	0,1155	0,80	0,7175	0,3067	0,485
0,31	0,2489	0,1895	0,1220	0,81	0,7254	0,3067	0,490
0,32	0,2586	0,1938	0,1287	0,82	0,7332	0,3066	0,495
0,33	0,2683	0,1981	0,1355	0,83	0,7408	0,3064	0,500
0,34	0,2780	0,2023	0,1424	0,84	0,7482	0,3061	0,505
0,35	0,2878	0,2063	0,1493	0,85	0,7554	0,3056	0,509
0,36	0,2975	0,2103	0,1563	0,86	0,7625	0,3050	0,513
0,37	0,3074	0,2142	0,1635	0,87	0,7693	0,3042	0,517
0,38	0,3172	0,2181	0,1708	0,88	0,7759	0,3032	0,520
0,39	0,3271	0,2217	0,1781	0,89	0,7823	0,3020	0,523
0,40	0,3370	0,2252	0,1854	0,90	0,7884	0,3005	0,526
0,41	0,3469	0,2287	0,1928	0,91	0,7943	0,2988	0,528
0,42	0,3568	0,2322	0,2003	0,92	0,7999	0,2969	0,529
0,43	0,3667	0,2356	0,2079	0,93	0,8052	0,2947	0,530
0,44	0,3767	0,2390	0,2156	0,94	0,8101	0,2922	0,530
0,45	0,3867	0,2422	0,2233	0,95	0,8146	0,2893	0,529
0,46	0,3966	0,2454	0,2310	0,96	0,8188	0,2858	0,528
0,47	0,4066	0,2484	0,2388	0,97	0,8224	0,2816	0,525
0,48	0,4166	0,2514	0,2466	0,98	0,8256	0,2766	0,521
0,49	0,4266	0,2544	0,2545	0,99	0,8280	0,2696	0,513
0,50	0,4366	0,2574	0,2625	1,00	0,8293	0,2538	0,494

Sumber: *United States Departement of the Interior* (1987, 580)

2. Aliran tertekan (*pressure flow*)

Aliran ini terjaid ketika terowongan terisi penuh atau ujung hulu terowongan tenggelam.



Gambar 2.3 Hidrolika Aliran dalam Pengelak saat Aliran Tertekan

Sumber: Chow (1992, p.491)

Syarat-syarat yang harus dipenuhi untuk aliran tekan adalah $h > 1,5 d$ (Chow, 1992).

- Menghitung kecepatan (V)

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (\text{elevasi muka air} - \text{elevasi hulu} - \frac{D}{2} + \text{panjang saluran} \cdot \sin\theta)}{(1 + C_i + C_f + C_o + C_b)}} \dots\dots\dots(2-2)$$

- Menghitung debit (Q)

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

Keterangan :

θ = sudut dalam lingkaran

A = luas persamaan

V = kecepatan aliran

Q = debit

C_i = koefisien kehilangan energi pada inlet

C_o = koefisien kehilangan energi pada outlet

C_f = koefisien kehilangan energi akibat adanya gesekan

C_b = koefisien kehilangan energi akibat belokan

2.5 Cofferdam

Cofferdam atau bendungan pengelak merupakan sebuah bangunan penutup sementara yang dibangun untuk memungkinkan pengerjaan konstruksi. Tujuan utama dari sebuah *cofferdam* adalah untuk menciptakan lingkungan yang kering agar proyek dapat dilanjutkan.

2.5.1 Tinggi Cofferdam

Penetapan tinggi mercu bendungan pengelak udik (*cofferdam* hulu), biasanya didasarkan pada elevasi permukaan air yang terdapat di depan pintu pemasukan saluran pengelak ditambah tinggi jagaan yang diperlukan untuk keamanan *cofferdam* tersebut.

The Japanese National Committee on Large Dams (JANCOLD) telah menyusun standar minimal tinggi ruang bebas seperti pada tabel 2.2. Di dalam standar ini maka yang di ambil sebagai permukaan air tertinggi adalah *FSL*.

Tabel 2.4
Standar Ruang Bebas Menurut *JANCOLD*

No	Tinggi bendungan (m)	Bendungan beton	Bendungan urugan
1.	< 50	1 m	2 m
2.	50 – 100	2 m	3 m
3.	> 100	2,5 m	3,5 m

Sumber : Soediby (1993, p.86)

2.5.2 Lebar Puncak *Cofferdam*

Agar dapat memperoleh lebar minimum mercu bendungan, biasanya dihitung dengan rumus sebagai berikut (Sosrodarsono & Takeda, 2016) :

$$B = 3,6 \cdot H^{1/3} - 3 \dots\dots\dots(2-4)$$

Keterangan:

B = lebar mercu (m), H = tinggi *cofferdam* (m)

2.5.3 Kemiringan *Cofferdam*

Pada tubuh bendungan urugan mempunyai kemiringan lereng tertentu, dalam perencanaannya dapat menggunakan persamaan berikut :

$$F_s \text{ hulu} = \frac{m-k \cdot \gamma}{1+k \cdot \gamma \cdot m} \text{tg } \phi \geq 1,1 \dots\dots\dots(2-5)$$

$$F_s \text{ hilir} = \frac{n-k}{1+k \cdot m} \text{tg } \phi \geq 1,1 \dots\dots\dots(2-6)$$

Keterangan :

F_s = faktor keamanan lereng

m = kemiringan lereng hulu

n = kemiringan lereng hilir

k = koefisien gempa

ϕ = sudut geser dalam

Tabel 2.5
Kemiringan Lereng yang Dianjurkan

Material Urugan	Material Utama	Kemiringan Lereng	
		Vertikal : Horizontal Hulu	Horizontal Hilir
Urugan homogen	CH	1 : 3	1 : 2,25
	CL		
	SC		
	GC		
	GM		
	SM		
Urugan Majemuk	CH	1 : 1,5	1 : 1,25
	CL		
	SC		
	GC		
	GM		
	SM		
Urugan batu dengan inti lempung	Pecahan Batu	1 : 1,5	1 : 1,25
Kerikil – kerakal dengan inti lempung	Kerikil-kerakal	1 : 2,5	1 : 1,75

Sumber : Kodoatie (2002, p.170)

2.6 Karakteristik Batuan

Setiap batuan memiliki karakteristik tersendiri dengan besaran gaya aksial yang dihasilkan pada tiap kedalaman tertentu. Berdasarkan cara terbentuknya, batuan terbagi menjadi tiga jenis, yaitu:

- a. Batuan beku
- b. Batuan sedimen
- c. Batuan metamorf

Jenis tersebut masih memiliki tipe batuan yang bermuara pada tiga jenis batuan tersebut. Pada ilmu geologi teknik tipe batuan memiliki kekuatan gaya aksial yang berbeda-beda pada proses perhitungan desain terowongan memiliki pengaruh yang besar pada faktor pembebanan (*load faktor*).

2.7 Perhitungan Koefisien Gempa

Keluarnya SNI 1726-2012 tentang Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung secara langsung menggantikan peraturan SNI sebelumnya yakni SNI 1726-2002. Wilayah Indonesia dipetakan berdasarkan tingkat resiko gempanya, yang ditentukan atas dasar besarnya percepatan puncak batuan (*Peak Ground Acceleration*, PGA). Peta gempa Indonesia dirilis dan dikembangkan oleh Tim Revisi Peta Gempa Indonesia (Setiawan, 2016).

Tabel 2.6
Probabilistic Hazard Maps

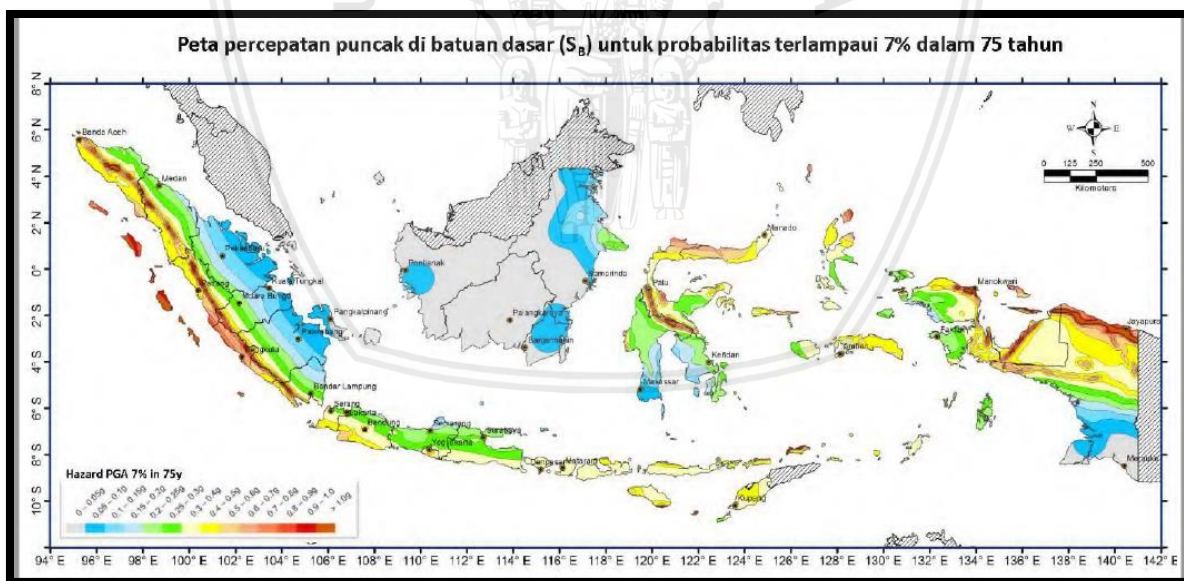
PE in yrs	20%	10 %	5 %	10 %	7 %	2 %	2 %	2 %
	10 yrs	10 yrs	10 yrs	50 yrs	75 yrs	50 yrs	100 yrs	100 yrs
Return Period (yrs)	50	100	200	500	1000	2500	5000	10000

Sumber : BNPB (2017, p.52)

Tabel 2.7
Implementasi dari Peta Hazard Indonesia

No	Jenis Bangunan	Periode Ulang Gempa (tahun)
1.	Bangunan gedung	2500
2.	Jembatan jalan raya	1000
3.	Dermaga	500
4.	Bangunan air	50 – 10000
5.	Jembatan kereta api	500
6.	Offshore platform	2500
7.	Tunnel	1000

Sumber: BNPB (2017, p.15)



Gambar 2.4 Peta Zona Gempa Indonesia 2017

Sumber: BNPB (2017, p.51)

Persamaan yang digunakan dalam perhitungan koefisien gempa adalah sebagai berikut:

$$PGAM = F_{PGA} \times PSA \dots \dots \dots (2-7)$$

Keterangan:

PGA_M = nilai percepatan puncak dipermukaan tanah berdasarkan klasifikasi site

F_{PGA} = faktor amplifikasi untuk PGA

PSA = Nilai PGA di batuan dasar (Sb) mengacu pada Peta Gempa Indonesia

$$Kh = PGA_M / g \dots \dots \dots (2-8)$$

Keterangan:

Kh = Koefisien gempa

g = Percepatan gravitasi (cm/det^2)

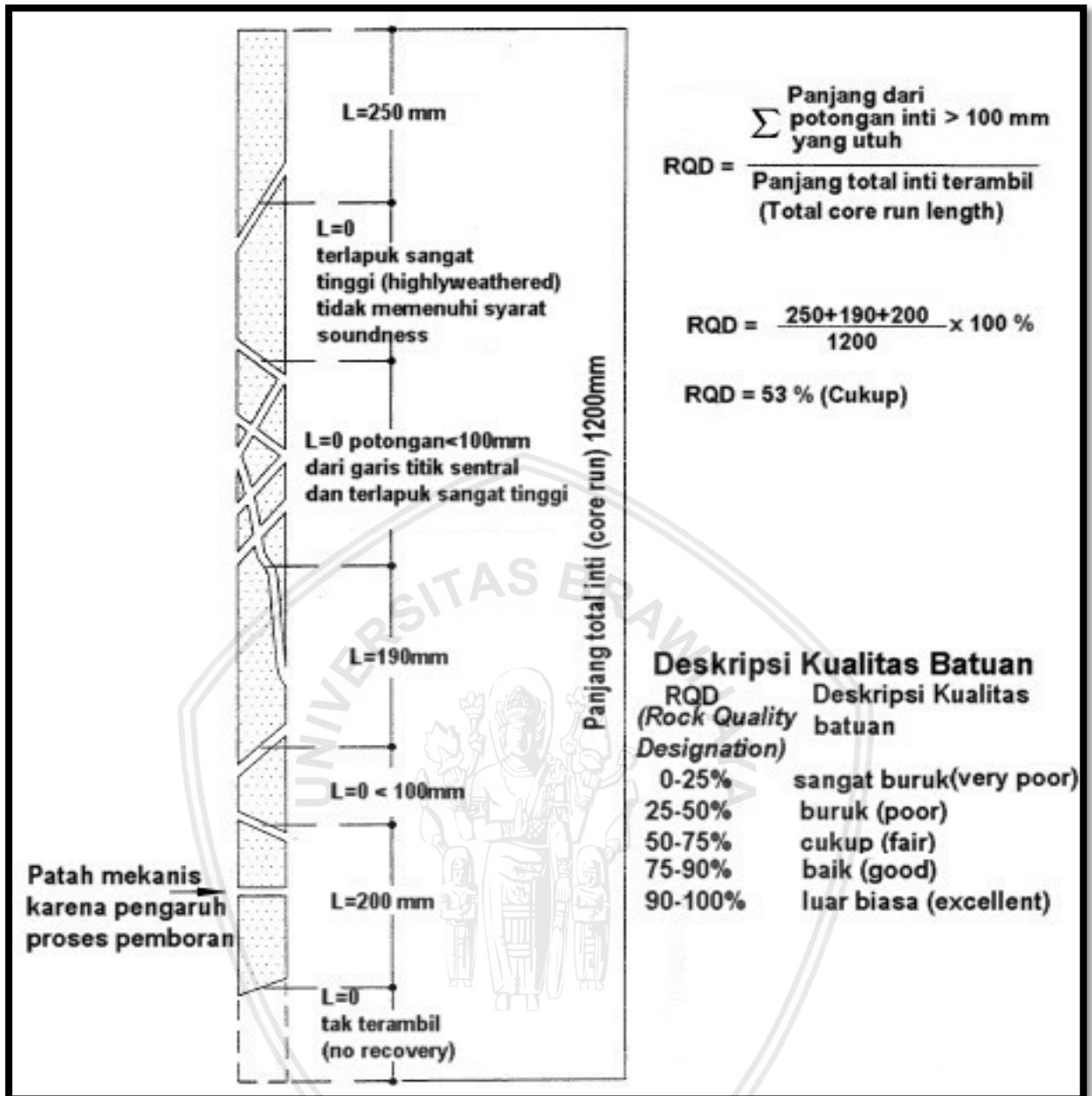
2.8 *Rock Quality Designation (RQD)*

RQD dikembangkan pada tahun 1964 oleh Deere. Metode ini didasarkan pada penghitungan persentase inti terambil yang mempunyai panjang 10 cm atau lebih. Dalam hal ini, inti terambil yang lunak atau tidak keras tidak perlu dihitung walaupun mempunyai panjang lebih dari 10cm. Diameter inti optimal yaitu 47.5mm. Nilai RQD ini dapat pula dipakai untuk memperkirakan penyanggaan terowongan. Saan ini RQD sebagai parameter standar dalam pemerian inti pemboran dan merupakan salah satu parameter dalam penentuan klasifikasi massa batuan. Yang dimaksud dengan RQD adalah:

1. Persentase termodifikasi dari perolehan inti dengan jumlah panjang potongan inti utuh yang melebihi 100 mm (4 in) dan dibagi dengan panjang inti.
2. Indeks kualitas batuan tipikal dalam kondisi batuan yang mengalami pelapukan berat, lunak, retakan, pergeseran, rekahan/pelipatan akan menyebabkan nilai *RQD* menurun.
3. Secara sederhana *RQD* merupakan ukuran persentase batuan yang terambil dari sebuah interval lubang bor.

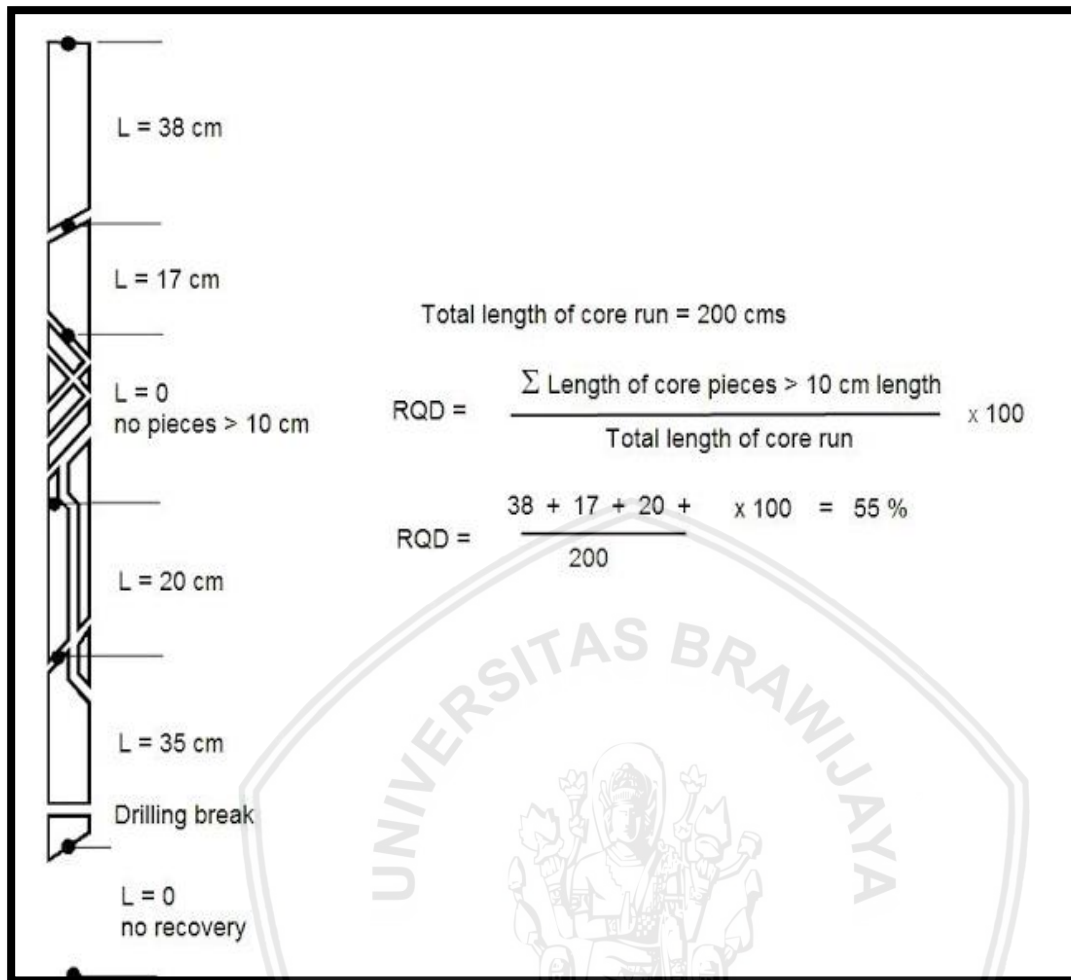
Prosedur Pengukuran *Rock Quality Designation (RQD)*

- a. Prosedur pengukuran *RQD* yang benar, cara perhitungan dengan gambar disajikan dalam SNI 03-2436.
- b. Korelasi asli *RQD* harus dicatat berdasarkan atas pengukuran pada inti ukuran *NX* (Deere, 1963) *RQD* dapat dihitung berdasarkan inti yang mempunyai diameter minimal berukuran *NX* (Deere dan Deere, 1989)
- c. Inti pipa kawat yang menggunakan *NQ*, *HQ*, dan *PQ* dapat juga diterima. Ukuran *BQ* dan *BX* lebih kecil tidak dapat digunakan, sebab yang lebih kecil dari *NX* sangat berpotensi mengalami kerusakan dan kehilangan inti.



Gambar 2.5 Modifikasi Pengambilan Ulang Inti Sebagai Indeks Kualitas (RQD) Massa Batuan

Sumber: SNI 03-2436 (2008, p.28)



Gambar 2.6 Contoh Prosedur Perekaman Inti RQD

Sumber: Deere (1989, p.72)

Tabel 2.8
Hubungan Indeks RQD dengan Kualitas Batuan

RQD (%)	Kualitas
0 – 25	Sangat buruk
25 – 50	Buruk
50 – 75	Sedang
75 – 90	Baik
90 – 100	Baik sekali

Sumber: Sinaga (2013, p.6)

2.9 Teori Pembebanan Batuan

2.9.1 Klasifikasi Batuan

Klasifikasi massa batuan merupakan cikal bakal dari pendekatan metode empiris dan digunakan secara luas di dalam rekayasa batuan. Klasifikasi massa batuan tidak digunakan sebagai pengganti untuk rancangan rekayasa. Tetapi harus digunakan digunakan

bersama-sama dengan metode analitik dan observasi untuk memformulasikan secara menyeluruh rancangan lubang bukaan yang rasional, sesuai dengan tujuan rancangan dan kondisi geologi lapangan.

Klasifikasi massa batuan bertujuan :

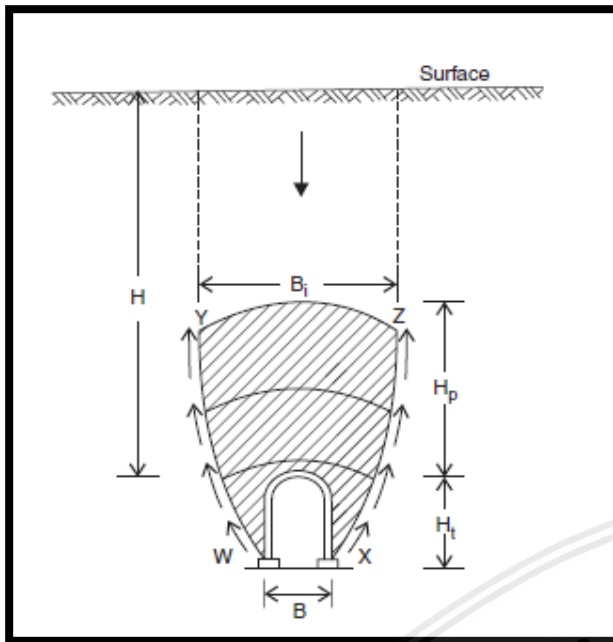
1. Mengidentifikasi parameter yang terpenting yang mempengaruhi perilaku massa batuan.
2. Membagi formasi massa batuan yang khusus ke dalam group yang mempunyai perilaku sama, yaitu kelas massa batuan dengan berbagai kualitas.
3. Memberikan dasar untuk pengertian karakteristik dari tiap kelas massa batuan.
4. Menghubungkan pengalaman dari kondisi massa batuan di satu lokasi dengan pengalaman yang ditemui di lokasi lain.
5. Mengambil data kuantitatif dan pedoman untuk rancangan rekayasa (engineering design).
6. Memberikan dasar umum untuk komunikasi diantara para insinyur dan geologiwan.

2.9.2 Faktor Pembebanan Batuan

Terzaghi (1946) mengkombinasi hasil percobaan pintu penangkapan dan perkiraan pembebanan batuan dari terowongan *Alpine* untuk menghitung faktor pembebanan batuan (H_p) dengan istilah lebar terowongan (B) dan tinggi terowongan (H_t) dari kelenturan batuan di atas terowongan dapat dilihat pada gambar 2.1, dimana pembebanan seperti lengkung baja.

Untuk memperoleh tekanan, pendukung vertikal dari faktor pembebanan H_p . Dimana P_v mendukung tekanan, y adalah satuan berat dari batuan dan H_p adalah tinggi kelonggaran di atas terowongan yang membebani. Batasan dari teori Terzaghi adalah tidak dapat digunakan untuk terowongan yang memiliki lebar lebih dari 6 m.

Sistem klasifikasi Terzaghi modifikasi diperkenalkan RQD sebagai satu-satunya pengukuran kualitas batuan. Sistem ini unggul diantara ledakan dan mesin penggalian terowongan. Pengajuan garis penuntun untuk mengatur baja yang dapat digunakan untuk mendukung diameter 6 m dan 12 m.



Gambar 2.7 Konsep Pembebanan Batuan Terzaghi pada Terowongan
 Sumber : Bhawani & Goel (2006, p.27)

2.9.3 Teori Pembebanan Terzaghi

Analisis daya dukung bertujuan mempelajari kemampuan tanah dalam mendukung beban pondasi struktur yang terletak di atasnya. Daya dukung menyatakan tahanan geser tanah untuk melawan penurunan akibat pembebanan, yaitu tahanan geser yang dapat dikerahkan oleh tanah disepanjang bidang-bidang gesernya.

Persamaan-persamaan daya dukung tanah yang diusulkan, umumnya didasarkan pada persamaan MOHR COULOMB :

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \mu \dots \dots \dots (2-9)$$

Keterangan :

- τ = tahanan geser tanah
- c = kohesi tanah
- σ = tegangan normal
- μ = sudut geser dalam tanah

Terzaghi (1943) menganalisis daya dukung tanah dengan beberapa asumsi, yaitu:

1. Pondasi memanjang tak terhingga
2. Tanah di dasar pondasi homogen
3. Berat tanah diatas dasar pondasi dapat digantikan dengan beban terbagi merata sebesar

$$Pa = Df \cdot \gamma \dots \dots \dots (2-10)$$

Keterangan:

Df = kedalaman dasar pondasi

γ = berat volume tanah di atas dasar pondasi

4. Tahanan geser tanah di atas dasar pondasi diabaikan
5. Dasar pondasi kasar
6. Bidang keruntuhan terdiri dari lengkung spiral log-aritmik dan linier.
7. Baji tanah yang terbentuk di dasar pondasi dalam kedudukan elastis dan dinamis bersama-sama dengan dasar pondasi.
8. Pertemuan antara sisi baji dan dasar pondasi membentuk sudut sebesar sudut geser dalam tanah.
9. Berlaku prinsip superposisi.

Tabel 2.9

Klasifikasi Tinggi Muatan Batuan (H_p) pada Kedalaman Lebih Dari 1,5 ($B + H_t$)

KONDIS BATUAN	RQD	TINGGI MUATAN BATUAN, H_p (ft)	CATATAN
Keras dan kompak	95 - 100	0	Lapisan ringan saja, walaupun ada hanya terjadi spalling ringan.
Perlapisan keras atau skistosa	90 - 99	0 - 0,50 B	Lapisan ringan terutama untuk perlindungan dari jatuhnya blok.
Masif, diskontinuitas yang sedang jumlahnya.	85 - 95	0 - 0,25 B	Perubahan tak menentu dari beban.
Terbagi-bagi dalam blok dalam jumlah yang sedang dengan rekahan yang cukup banyak	75 - 85	0,25 B - 0,20 (B + H_t)	Kondisi 4,5 dan 6 dikurangi 50 % dari nilai Terzaghi, karena muka air mempunyai akibat
Sangat terbagi dalam blok-blok dengan rekahan yang banyak dan berkembang	30 - 75	(0,20 - 0,60) (B + H_t)	kecil terhadap H_p (Brekke, 1968 dan Terzaghi, 1946)

Lanjutan Tabel 2.9
Klasifikasi Tinggi Muatan Batuan (H_p) pada Kedalaman Lebih Dari 1,5 ($B + H_t$)

KONDISI BATUAN	RQD	TINGGI MUATAN BATUAN, H_p (ft)	CATATAN
Terbagi-bagi dalam blok dalam jumlah yang sedang dengan rekahan yang cukup banyak	75 – 85	$0,25 B - 0,20 (B + H_t)$	Kondisi 4,5 dan 6 di kurangi 50 % dari nilai Terzaghi, karena muka air mempunyai akibat kecil terhadap H_p (Brekke, 1968 dan Terzaghi, 1946)
Sangat terbagi dalam blok-blok dengan rekahan yang banyak dan berkembang	30 – 75	$(0,20 - 0,60) (B + H_t)$	
Terpecah keseluruhan tetapi masih bersatu secara kimia	Mar-30	$(0,60 - 1,10) (B + H_t)$	
Pasir dan kerikil	0 – 3	$(1,10 - 2,40) (B + H_t)$	Tekanan lateral yang besar, penyangga besi baja sirkular set direkomendasikan.
Batuan yang berperan dalam pemampatan pada kondisi kedalaman yang sedang	Tidak dapat diaplikasikan	$(1,10 - 2,10) (B + H_t)$	
Batuan yang berperan dalam pemampatan pada kondisi kedalaman yang besar	Tidak dapat diaplikasikan	$(2,10 - 4,50) (B + H_t)$	
Batuan yang mengembang	Tidak dapat diaplikasikan	Lebih besar dari 250 tidak tergantung dari	Penyangga besi baja sirkular set diperlukan. Dalam keadaan ekstrim gunakan perhitungan tekanan keruntuhan penyanggaan (yielding support)
(<i>swelling rock</i>)		$(B + H_t)$	

Sumber: Bhawani & Goel (2006, p.26)

Catatan : Nilai B dan H_t dalam satuan feet (ft).

2.9.4 Pembebanan pada Terowongan

Perletakan terowongan berada di dalam batuan aktif maupun pasif akan mengalami gaya-gaya yang bekerja pada terowongan tersebut, gaya yang bekerja disebut pembebanan.

Secara umum pembebanan yang terjadi pada terowongan adalah sebagai berikut:

1. Tekanan batuan vertikal dan horizontal
2. Tekanan air horizontal

- 3. Beban air vertikal
- 4. Beban akibat berat konstruksi terowongan sendiri
- 5. Tekanan air dalam terowongan
- 6. Tekanan *uplift*

2.9.4.1 Tekanan Batuan Vertikal

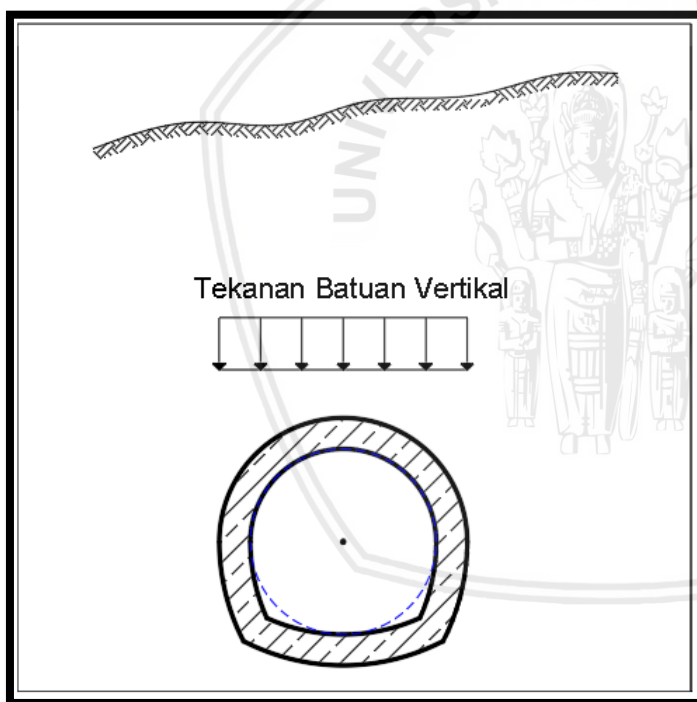
Massa batuan bekerja secara vertikal di atas terowongan dengan menganggap sebagai beban merata sepanjang B (lebar terowongan). Besarnya gaya yang dirumuskan dengan:

$$q_{bv} = \gamma_{\text{batuan}} \cdot H_p \dots\dots\dots(2-11)$$

Keterangan:

γ_{batuan} = berat jenis batuan (t . m³)

H_p = tinggi batuan / batuan yang membebani, nilai H_p bergantung pada jenis batuan di atas terowongan (m)



Gambar 2.8 Diagram Tekanan Batuan Vertikal

Sumber : *Design and Contruction Road Tunnel* (2010, p.5-21)

2.9.4.2 Tekanan Batuan Horizontal

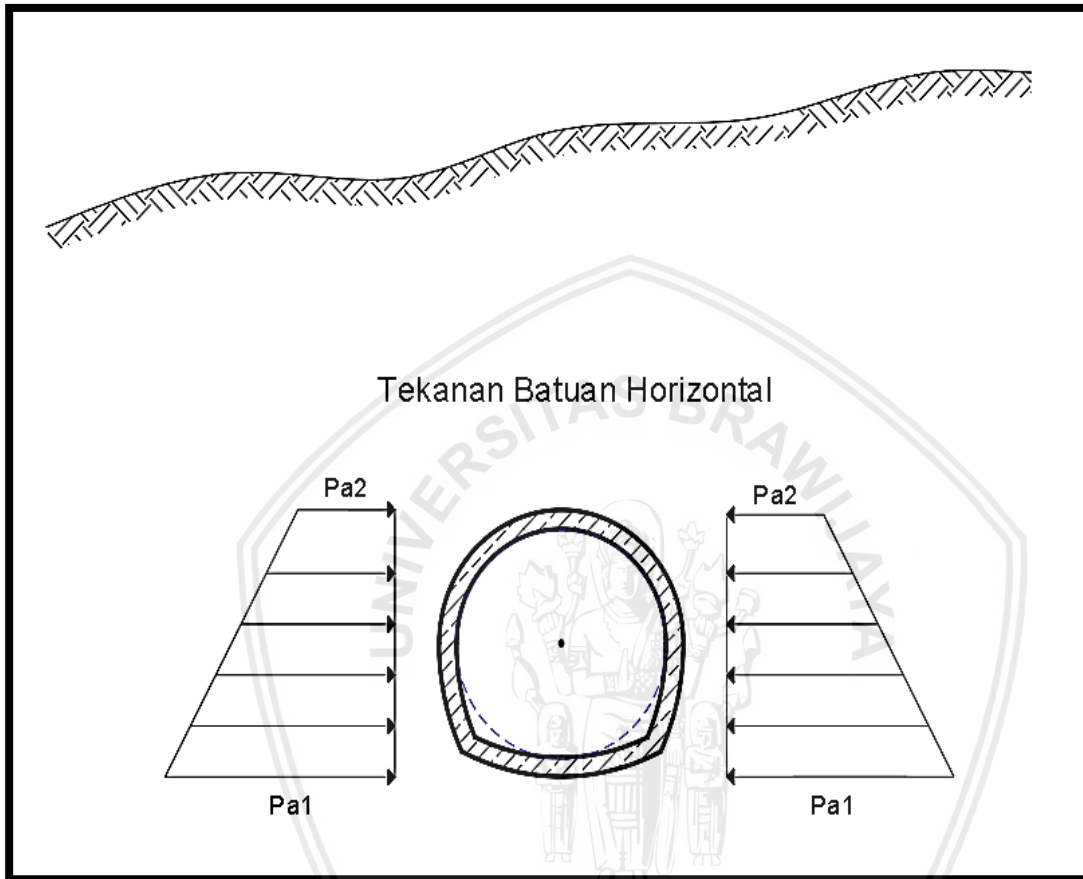
Massa batuan bekerja secara horizontal akibat adanya tekanan batuan aktif yang bekerja pada sisi kiri dan kanan penampang melintang terowongan. Besarnya gaya yang bekerja menurut Terzaghi dirumuskan sebagai berikut:

$$H_p = 0,5 \cdot (B + H_t) \dots\dots\dots(2-12)$$

Keterangan:



- Hp = tinggi batuan / batuan yang membebani, nilai Hp bergantung pada jenis batuan di atas terowongan (m)
- B = lebar terowongan
- Ht = tinggi terowongan



Gambar 2.9 Diagram Tekanan Batuan Horizontal

Sumber : *Design and Contruction Road Tunnel* (2010, p.5-21)

Koefisien tekanan tanah aktif (Ka) menggunakan rumus coulomb.

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cdot \cos^2(\alpha + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin \phi}{\cos(\alpha + \delta) \cdot \cos \delta}} \right]^2} \dots\dots\dots(2-13)$$

dimana,

ϕ = sudut geser dalam tanah (°) = 36°

δ = sudut kemiringan tegak lurus tegangan = $\frac{\phi}{3}$

Koefisien tekanan tanah aktif, kondisi gempa (Kae) menggunakan rumus Mononobe – Okabe.



$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\phi - \theta_o - \theta)}{\cos\theta_o \cdot \cos^2\theta \cdot \cos(\theta + \delta + \theta_o) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \theta_o - \alpha)}{\cos(\theta + \delta + \theta_o) \cdot \cos(\alpha - \theta)}} \right]^2} \dots(2-14)$$

Dimana,

$$\theta_o = \arctan k_h \dots\dots\dots(2-15)$$

Tekanan tanah aktif

$$Pa_1 = K_a \times \gamma_{sat} \times (h_p + h_t) \dots\dots\dots(2-16)$$

$$Pa_2 = K_a \times \gamma_{sat} \times h_t \dots\dots\dots(2-17)$$

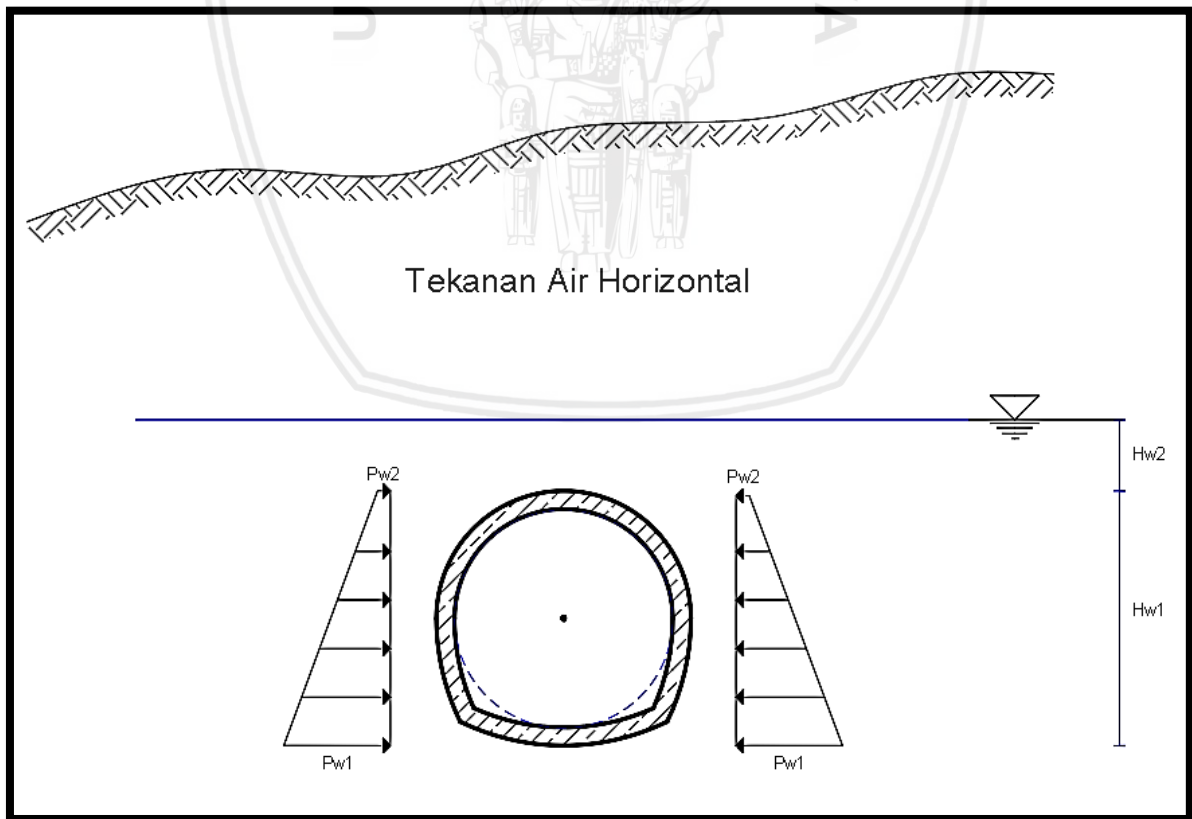
Tekanan tanah aktif (kondisi gempa)

$$Pa_1 = K_{ae} \times \gamma_{sat} \times (h_p + h_t) \dots\dots\dots(2-18)$$

$$Pa_2 = K_{ae} \times \gamma_{sat} \times h_t \dots\dots\dots(2-19)$$

2.9.4.3 Tekanan Air Horizontal

Pada lokasi rencana terowongan berada dalam batuan yang memiliki air tanah. Air tanah memiliki tekanan yang dapat mempengaruhi terowongan. Tekanan air horizontal bekerja di sisi kanan dan sisi kiri terowongan. Rumus yang digunakan dalam perhitungan tekanan air tanah horizontal adalah:



Gambar 2.10 Diagram Tekanan Batuan Vertikal

Sumber : *Design and Construction Road Tunnel* (2010, p.5-21)

Tekanan air tanah

$$P_{w1} = \gamma_w \times (h_w + h_t) \dots\dots\dots(2-20)$$

$$P_{w2} = \gamma_w \times h_w \dots\dots\dots(2-21)$$

Keterangan:

γ_w = berat jenis air

2.9.4.4 Beban Air Vertikal

Beban air vertikal diakibatkan tekanan air tanah yang berada di atas terowongan.

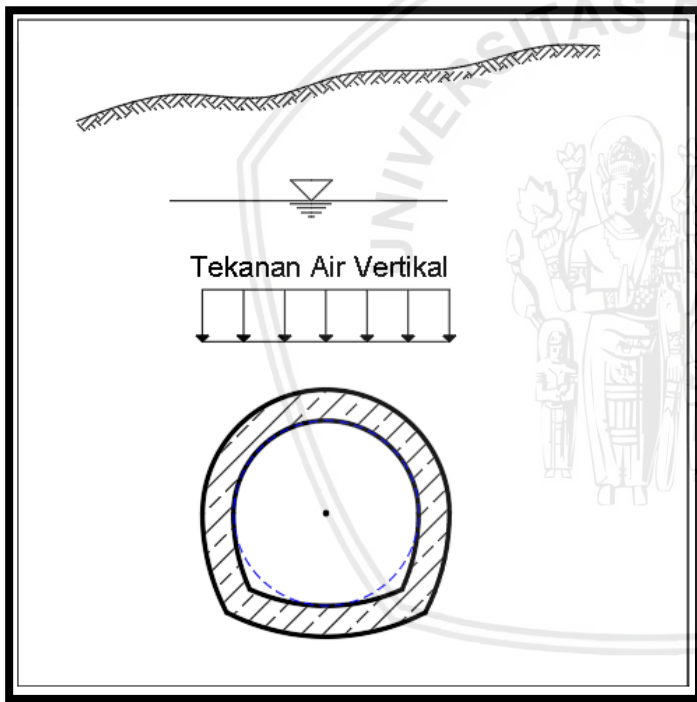
Rumus yang digunakan dalam perhitungan adalah:

$$P_{wv} = \gamma_w \cdot H_w \dots\dots\dots(2-22)$$

Keterangan:

γ_w = berat jenis air

H_w = tinggi muka air (m)



Gambar 2.11 Diagram Tekanan Air Vertikal

Sumber : *Design and Contruction Road Tunnel* (2010, Hal. 5-21)

2.9.4.5 Beban Akibat Berat Konstruksi Terowongan Sendiri

Konstruksi yang terbuat dari beton memiliki berat sendiri yang dianggap sebagai beban merata. Rumus yang digunakan dalam perhitungan adalah:

$$q = \gamma_c \cdot t \dots\dots\dots(2-23)$$

Keterangan:

γ_c = berat isi beton ($t \cdot m^{-3}$)

t = tebal terowongan (m)

2.9.4.6 Tekanan Air dalam Terowongan

Terowongan memiliki fungsi untuk mengalirkan air, sehingga air yang berada di dalam terowongan juga memberikan tekanan terhadap konstruksi terowongan. Rumus yang digunakan dalam perhitungan tekanan air dalam terowongan adalah:

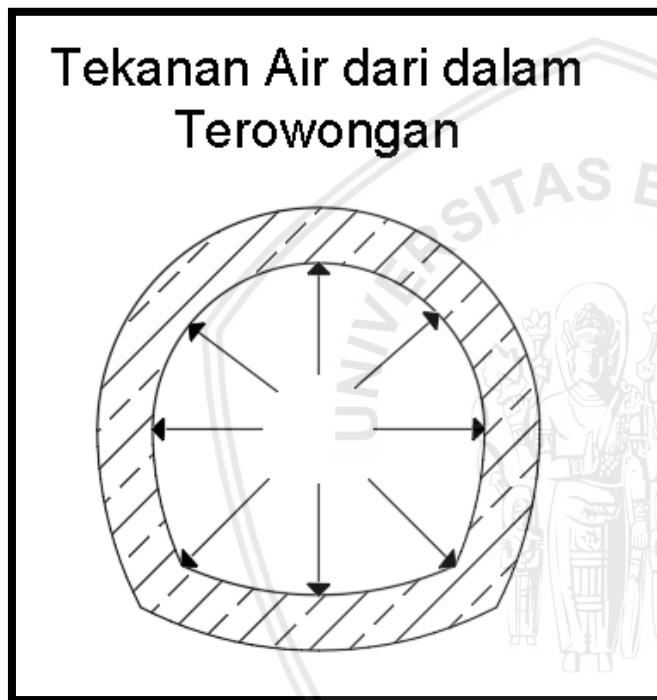
$$P = \gamma_w \cdot g \cdot h \dots\dots\dots(2-24)$$

Keterangan:

γ_w = berat jenis air

g = gravitasi (m/s^2)

h = tinggi muka air (m)



Gambar 2.12 Diagram Tekanan Air dari dalam Terowongan

Sumber : *Design and Contruction Road Tunnel* (2010, Hal. 5-21)

2.9.4.7 Tekanan Uplift

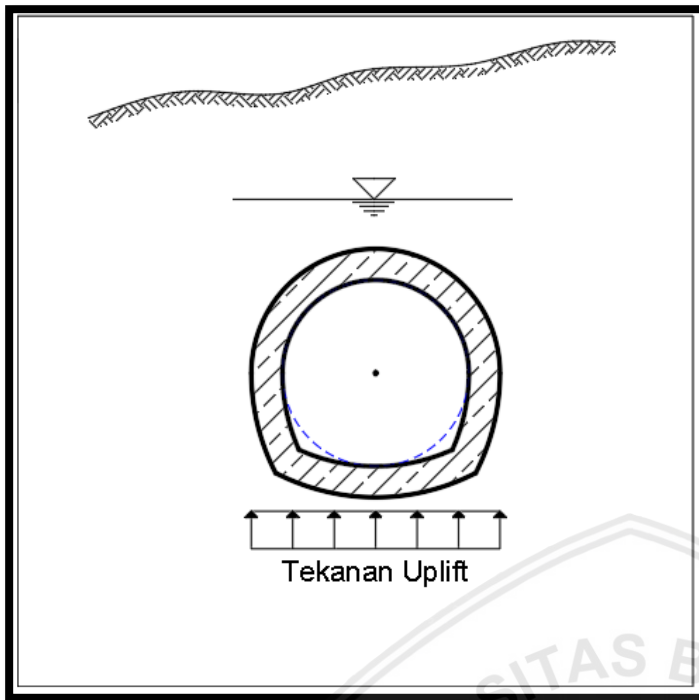
Dalam sebuah perencanaan terowongan yang berada di batuan yang mengandung air, maka gaya angkat air (*uplift*) yang besarnya dapat dihitung dengan mengetahui tinggi air di luar terowongan. Rumus yang digunakan adalah:

$$P = \gamma_w \cdot (H_w + H_t) \dots\dots\dots(2-25)$$

Keterangan:

γ_w = berat jenis air

H_w = tinggi muka air tanah



Gambar 2.13 Diagram Tekanan Uplift

Sumber : *Design and Contruction Road Tunnel* (2010, Hal. 5-21)

2.9.4.8 Beban Kendaraan

Beban kendaraan merupakan beban hidup non permanen yang berada di atas terowongan. Dimana beban kendaraan ini akan berdampak pada terowongan apabila kedalaman terowongan kurang dari 10 ft atau kurang lebih 3 meter. Beban hidup kendaraan dan Beban Dinamis Kendaraan (LL, IM). Beban hidup minimum untuk tanah yang dicakup konfigurasi terowongan yang menopang muatan kendaraan di atap terowongan harus memenuhi persyaratan untuk distribusi beban roda ke struktur atap terowongan.

Vehicle Live Load (LL) - Pemuatan langsung lalu lintas jalan raya yang diterapkan pada pelat terowongan harus didasarkan pada AASHTO HL-93. Beban hidup di atap terowongan di daerah sekitar terowongan harus dipertimbangkan seperti pejalan kaki, kendaraan khusus, dan muatan kendaraan darurat. Public Access Loading (LL), Kondisi pemuatan akses publik berikut harus dimasukkan dalam perhitungan beban:

- Permukaan jalan / jalan masuk yang dikenakan pemuatan truk:
AASHTO HL-93 atau 250 psf (min.)
- trotoar pejalan kaki / sepeda yang tidak dikenakan pemuatan truk:
100 psf

(*Structural Design for Tunnel*, Doyle Drive)

2.10 Kondisi Perencanaan

Kondisi-kondisi yang digunakan dalam perencanaan terowongan pengelak pada studi ini terbagi menjadi kondisi normal dan kondisi gempa. Sedangkan untuk kondisi yang ditinjau adalah:

Kondisi 1 : Kasus pembebanan pada saat setelah selesai dibangun (*just after completion*)

1. Kondisi setelah dibangun (*Just After Completion*), beban yang bekerja antara lain :

- Berat sendiri tunnel (*selfweight*)
- Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)
- Tekanan tanah aktif di samping terowongan
- Reaksi akibat beban vertikal

2. Kondisi setelah dibangun (*Just After Completion*) – gempa, beban yang bekerja antara lain :

- Berat sendiri tunnel (*selfweight*)
- Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)
- Tekanan tanah aktif di samping terowongan
- Reaksi akibat beban vertikal

Kondisi 2 : Berfungsi atau beroperasi sebagai terowong pengelak, kondisi air penuh

1. Berfungsi atau beroperasi sebagai terowong pengelak dan kondisi air penuh, beban yang bekerja antara lain :

- Berat sendiri terowong (*selfweight*)
- Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)
- Tekanan air tanah (*external water pressure*)
- Tekanan tanah aktif di samping terowongan
- Gaya angkat (*uplift pressure*)
- Reaksi akibat beban vertikal
- Tekanan air dari dalam terowongan (*internal water pressure*)

2. Berfungsi atau beroperasi sebagai terowong pengelak dan kondisi air penuh - gempa, beban yang bekerja antara lain :

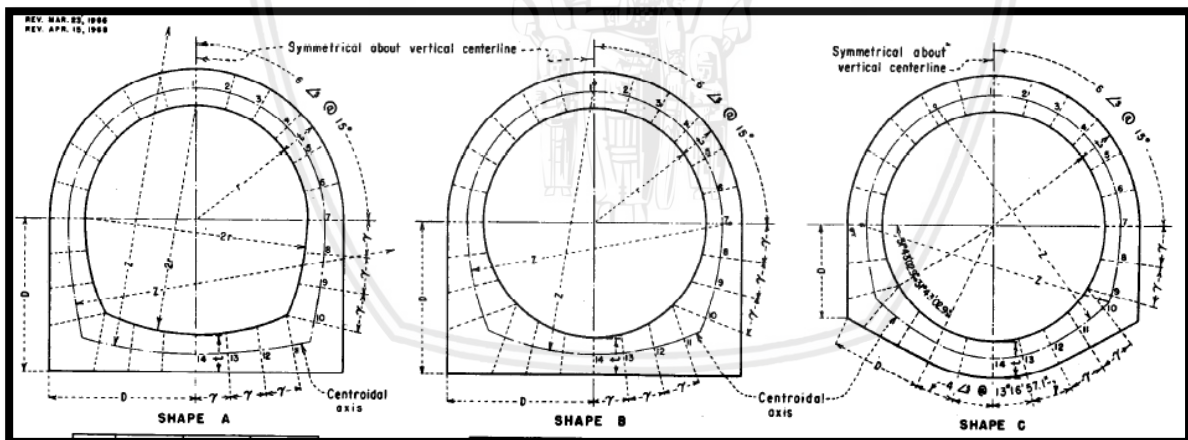
- Berat sendiri tunnel (*selfweight*)
- Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)
- Tekanan air tanah (*external water pressure*)
- Tekanan tanah aktif di samping terowongan
- Gaya angkat (*uplift pressure*)

- Reaksi akibat beban vertikal
- Tekanan air dari dalam terowongan (*internal water pressure*)

2.11 Bentuk-Bentuk Konstruksi Terowongan

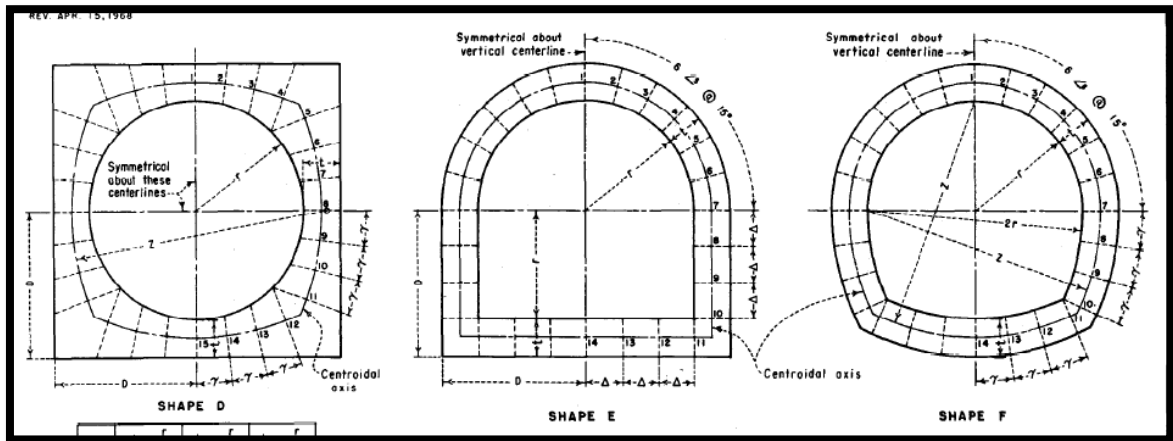
Pada buku *Beggs Deformation Analysis of Single Barrel Conduit* menjelaskan konsep pembebanan terhadap bentuk terowongan, serta juga menjelaskan koefisien-koefisien yang memiliki hubungan dengan beban yang bekerja pada penampang terowongan. berikut merupakan macam-macam bentuk terowongan (Philips, H.B. & Allen, I.E. 1986):

- Bentuk A = bentuk tapal kuda (*Horseshoe*) dengan bagian dalam bawah horizontal
- Bentuk B = bentuk lingkaran dengan bagian luar horizontal
- Bentuk C = bentuk lingkaran dengan bagian luar bawah melengkung
- Bentuk D = bentuk lingkaran dengan bagian luar berbentuk kotak
- Bentuk E = ketebalan seragam (*uniform thickness*) dengan bagian dasar horizontal
- Bentuk F = ketebalan seragam dengan bentuk tapal kuda
- Bentuk G = gabungan antara bentuk B dan bentuk E
- Bentuk *circular* = lingkaran dengan ketebalan seragam
- Bentuk *square* = kotak dengan ketebalan seragam



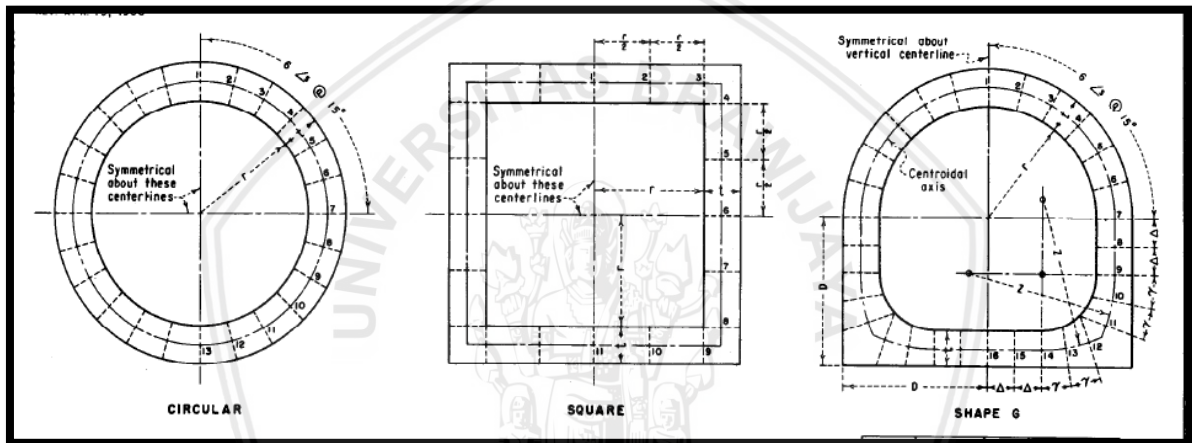
Gambar 2.14 Bentuk Terowongan A, B dan C.

Sumber : Philips & Allen (1986, p.7)



Gambar 2.15 Bentuk terowongan D, E dan F.

Sumber : Philips & Allen (1986, p.8)



Gambar 2.16 Bentuk Terowongan Circular, Square, dan G

Sumber : Philips & Allen (1986, p.9)

Untuk menentukan besarnya gaya momen yang bekerja pada dinding terowongan dengan menggunakan persamaan:

$$M = k_m \cdot W \cdot r^2 \dots\dots\dots(2-26)$$

Keterangan:

M = Momen persatuan panjang pada segmen dinding (ton . m)

k_m = Koefisien momen

W = Beban yang bekerja (ton.m⁻²)

R = Jari-jari terowongan (m)

Untuk menentukan besarnya gaya lintang menggunakan rumus:

$$D = k \cdot W \cdot r \dots\dots\dots(2-27)$$

Keterangan:

D = Gaya lintang pada segmen dinding (ton)

k = Koefisien gaya lintang

W = Beban yang bekerja (ton.m⁻²)

R = Jari-jari terowongan (m)

Untuk menentukan besarnya gaya normal menggunakan rumus:

$$N = k \cdot W \cdot r \dots\dots\dots(2-28)$$

Keterangan:

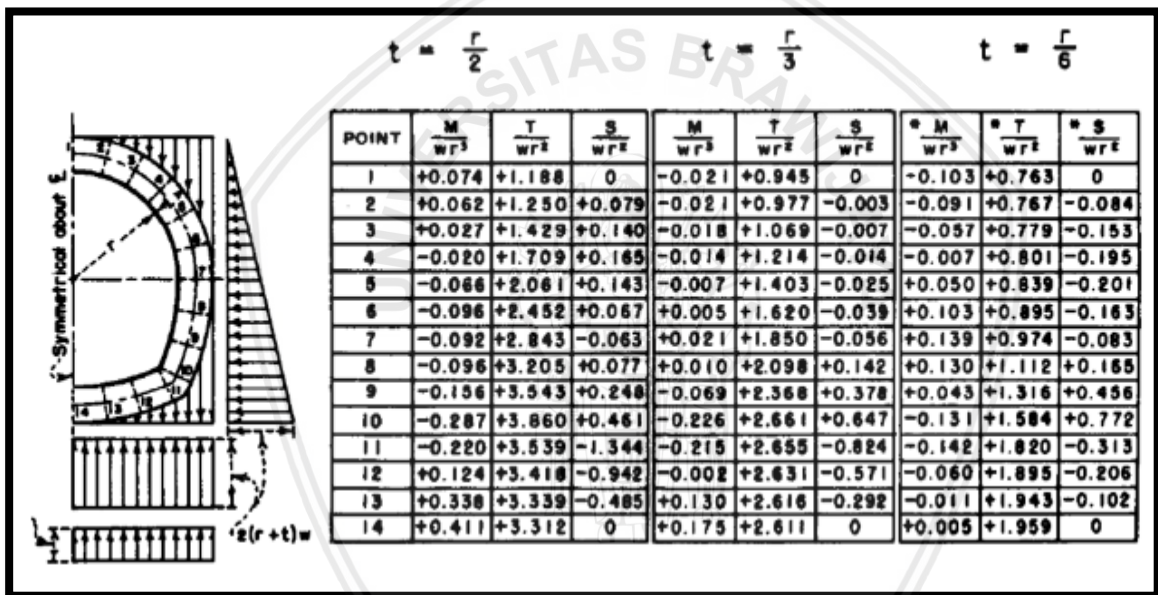
N = Gaya normal pada segmen dinding (ton)

k = Koefisien gaya normal

W = Beban yang bekerja (ton.m⁻²)

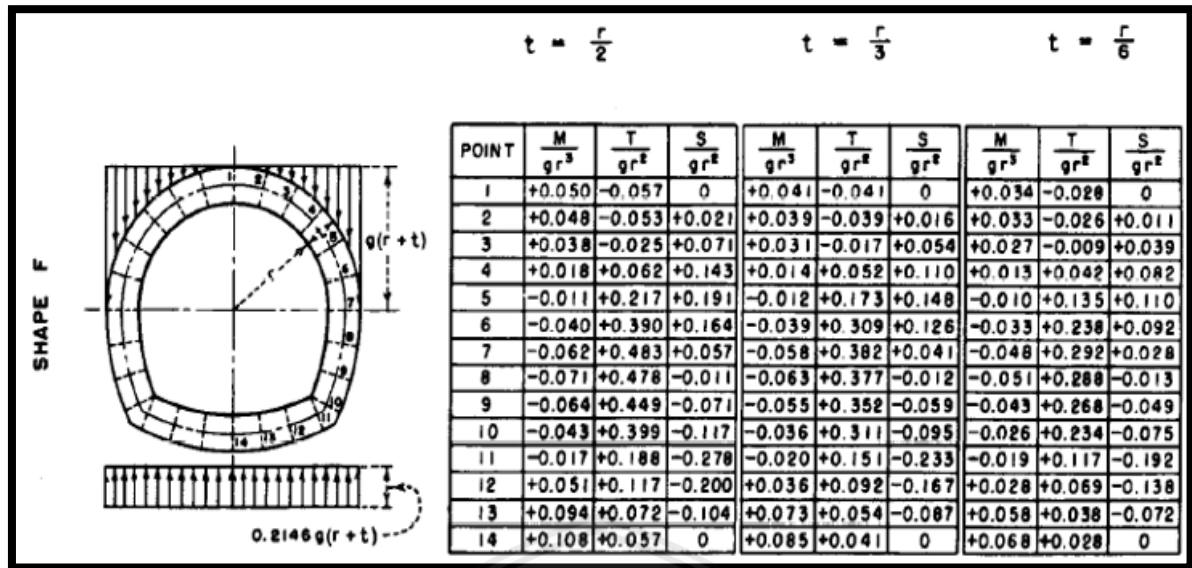
R = Jari-jari terowongan (m)

Besarnya koefisien dapat dilihat dari tabel yang disajikan *Beggs Deformation Analysis of Single Barrel Conduit*.



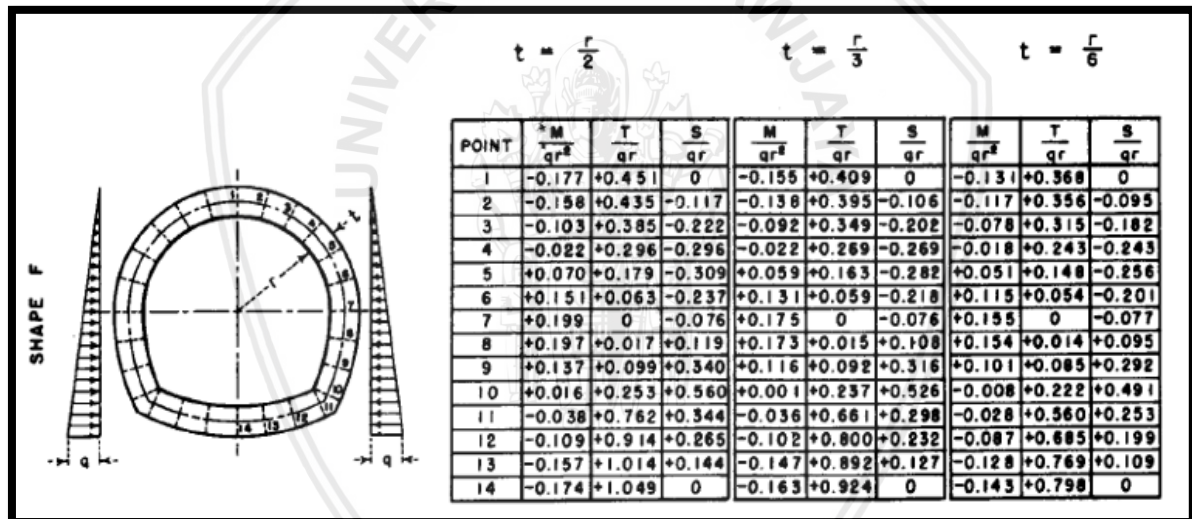
Gambar 2.17 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Berat Sendiri

Sumber : Philips & Allen (1986, p.39)



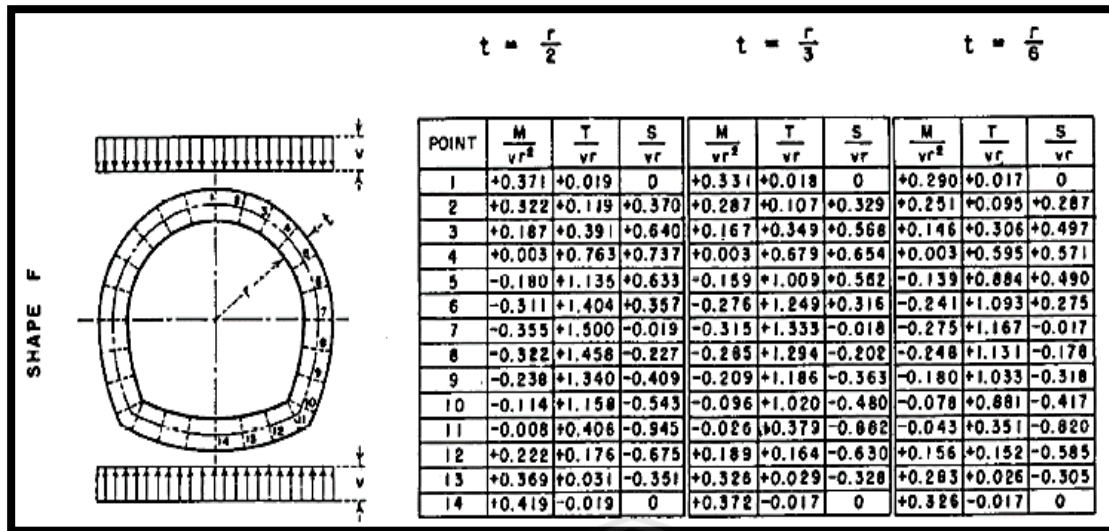
Gambar 2.18 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Batuan Vertikal

Sumber : Philips & Allen (1986, p.31)



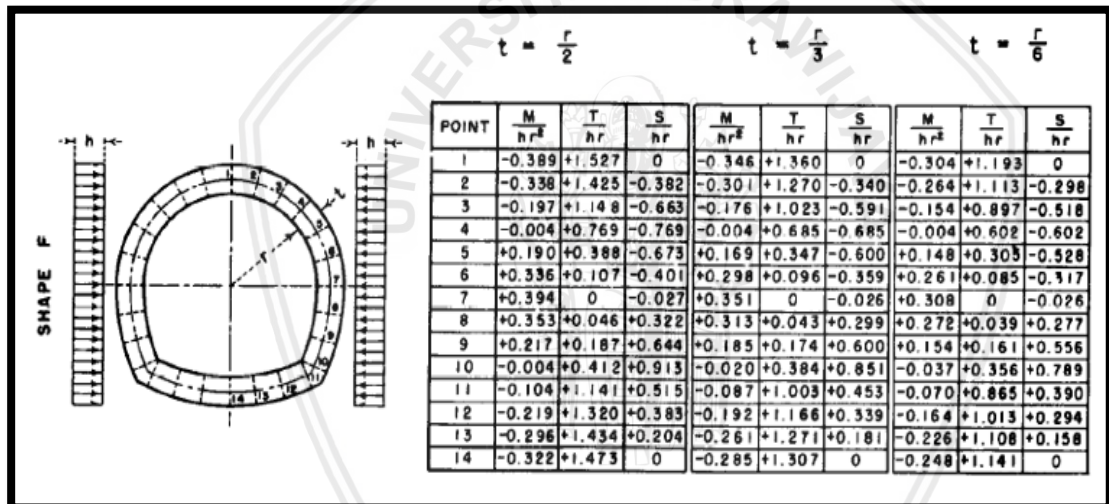
Gambar 2.19 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Air Horizontal

Sumber : Philips & Allen (1986, p.35)



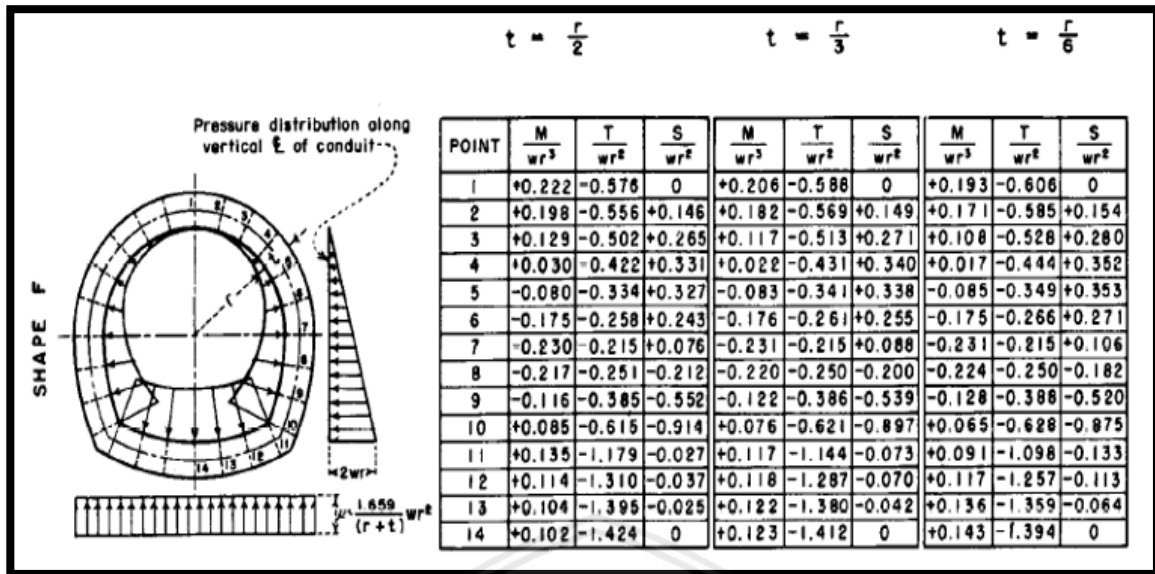
Gambar 2.20 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Air Vertikal

Sumber : Philips & Allen (1986, p.25)



Gambar 2.21 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Batuan Horizontal

Sumber : Philips & Allen (1986, p.34)



Gambar 4.22 Koefisien Pembeban Beban Akibat Tekanan Air dari Dalam

Sumber : Philips & Allen (1986, p.34)

2.12 Software Staad Pro untuk Analisa Struktur

Staad Pro adalah program yang digunakan untuk menganalisis dan mendesain struktur. Staad Pro menggunakan teknologi yang paling modern dengan 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 dari Staad Pro (M. Firdaus Alkaff, 2005).

- *Pulldown menu*

Digunakan untuk mengakses semua fasilitas dari Staad Pro.

- *Toolbar menu*

Berguna untuk mengakses perintah yang sering digunakan.

- *Main Windows*

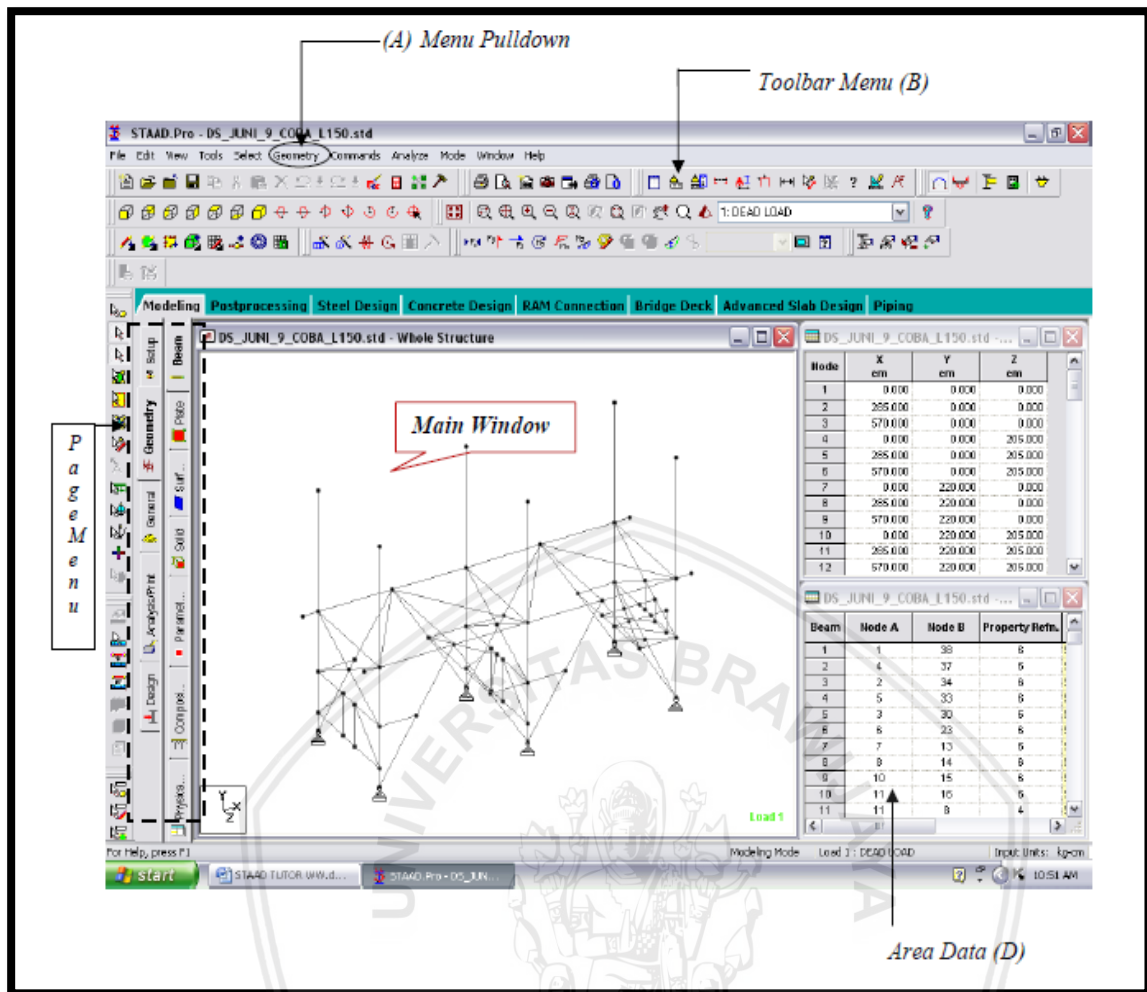
Layer tempat bekerja, dimana model dan hasil analisis akan ditampilkan

- *Page menu*

Merupakan sekumpulan tab yang letaknya paling kiri dari *layer*. Setiap *page control* memiliki perintah yang spesifik yang akan memudahkan dalam pemodelan dan verifikasi hasil Analisa.

- *Data Area*

Pada bagian kanan *layer* disebut data area, dimana *dialog box*, *table*, *list box*, akan ditampilkan berbeda, tergantung dari operasi yang ditampilkan.



Gambar 2.23 Graphic User Interface dari StaadPro

Sumber: Wungo (2011, p.2)

2.12.1 Input

Staad pro menyediakan input data melalui input / command file dan graphical user yang mengandung serangkaian perintah bahasa inggris yang berisi instruksi atau data menyangkut analisa atau 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.

Adapun urutan input data dapat diringkas berikut ini :

- Keterangan mengenai pekerjaan
- Geometri Struktur
- Bentuk dan Ukuran dari batang (property)
- Spesifikasi batang (bila ada)
- Kondisi tumpuan atau perletakan
- Kondisi Pembebanan Primer
- Kondisi Pembebanan Kombinasi

- h. Analisa Mekanika Struktur
- i. Desain Struktur (Baja, Beton)
- j. Tampilan hasil analisa.

2.12.2 Output

Setelah proses Analisa, Staad Pro menghasilkan output file. File ini menyajikan informasi akurat apabila analisa dilakukan secara benar. Beberapa output data yang lazim dibutuhkan adalah:

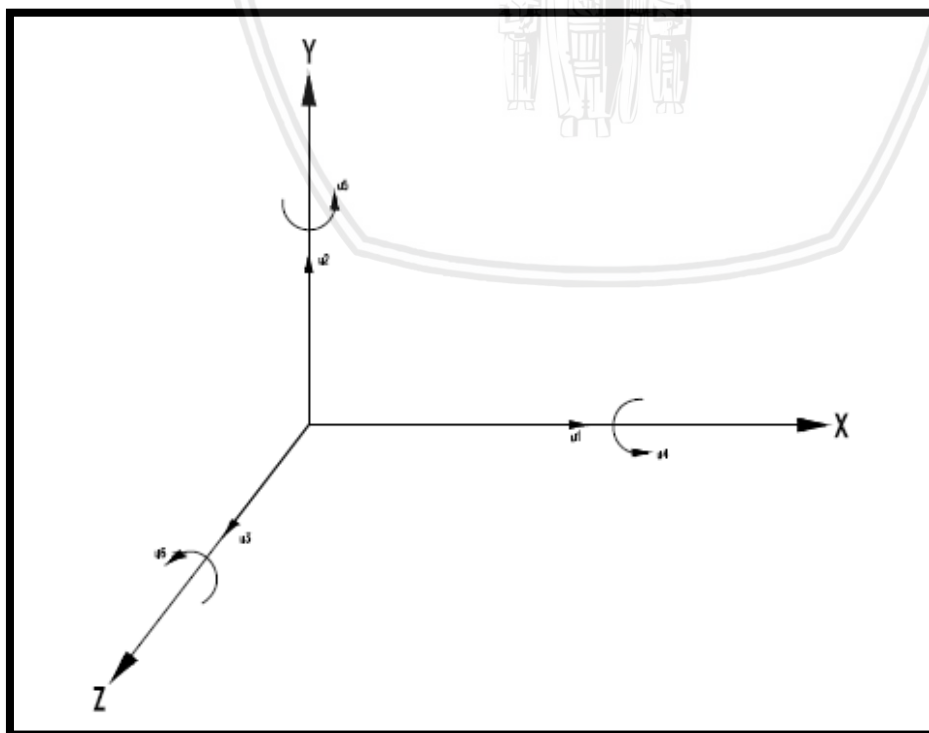
1. *Member End Forces* (gaya-gaya dalam pada ujung elemen)
2. *Member Section Forces* (gaya-gaya dalam beberapa lokasi per elemen)
3. *Joint Displacements* (perpindahan titik)
4. *Support reaction* (reaksi perletakan)

2.12.3 Sistem Koordinat

Ada 2 macam sistem koordinat yang dipergunakan di dalam Staad yaitu sistem koordinat global dan sistemvkoordinat lokal.

- Sistem Koordinat Global

Sistem koordinat global adalah sistem koordinat di dalam ruang area pemodelan struktur X, Y, Z, dan perjanjian tandanya mengikuti aturan tangan kanan. Gambar berikut adalah gambar sistem koordinat global dengan arah displacement-nya. Selanjutnya boleh disebut sebagai sistem sumbu global.

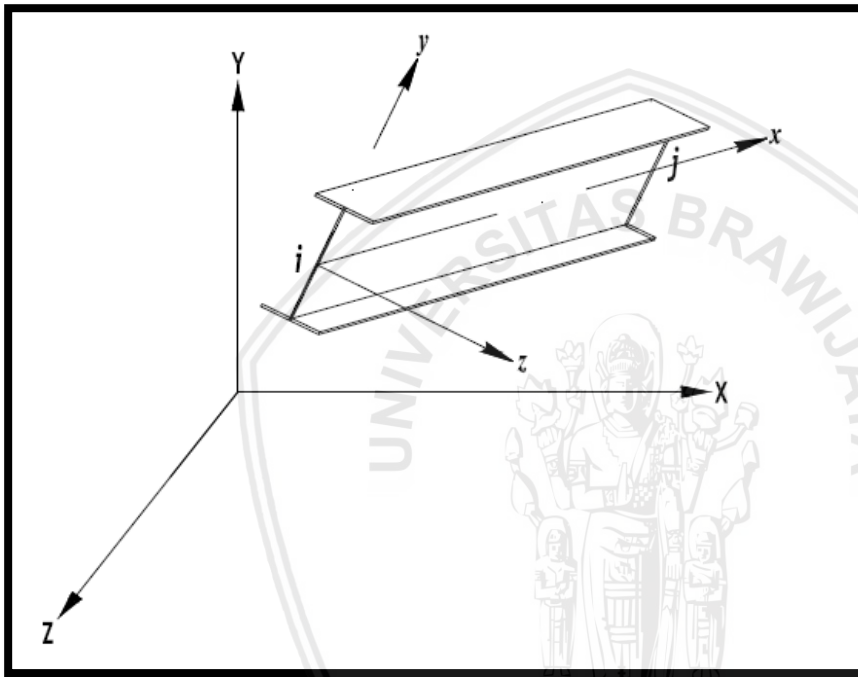


Gambar 2.24 Sistem Koordinat Global

Sumber: Wungo (2011, p.4)

- Sistem Koordinat Lokal

Sistem Koordinat Lokal adalah sistem koordinat terhadap masing-masing elemen/batang itu sendiri. Dan juga mengikuti aturan tangan kanan sebagai perjanjian tandanya. Seterusnya boleh disebut sebagai sistem sumbu lokal. Gambar 2.19. menunjukkan sistem koordinat lokal dari sebuah elemen yang membentang dari titik “i” ke titik “j” . Sumbu memanjang x dari “i” ke “j” adalah merupakan arah positif. Sedangkan sumbu lokal y dan z adalah merupakan sumbu-sumbu prinsip dari arah momen inersia elemen.



Gambar 2.25 Sistem Koordinat Lokal

Sumber: Wungo (2011, p.5)

2.12.4 Kelebihan Software Staad Pro

Staad Pro adalah salah satu program analisa struktur yang pada saat ini telah banyak dipakai diseluruh dunia. Kelebihannya yaitu Staad Pro menggunakan teknologi yang paling modern dalam rekayasa elemen hingga, dengan metode input data berbasis *object oriented*. Selain itu, dengan ketepatan numeric dan efisiensi perhitungan, metode ini memberikan metode yang lebih baik daripada metode lain yang diketahui pada semua aplikasi struktur. Kelebihan paling dominan yang dimiliki oleh Staad Pro adalah kemudahan dalam penggunaannya. GUI (*graphical user interface*) dirancang sedemikian rupa agar pengguna lebih mudah menggunakan aplikasi dari program ini. (Wungo, 2011)

2.12.5 Kekurangan Software Staad Pro

Kekurangan yang dimiliki oleh Staad Pro (dalam hal ini dibandingkan dengan aplikasi SAP 2000) yaitu untuk pembacaan hasil analisis pada software SAP 2000 lebih lengkap dan grafik yang dihasilkan lebih informatif. (Wungo, 2011)

2.13 Penulangan pada Konstruksi Dinding Terowongan

Pekerjaan pembesian yang dimaksudkan adalah pekerjaan pembuatan struktur beton bertulang. Beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum, yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama sama dalam menahan beban. Beton diperhitungkan dalam memikul gaya tekan sedangkan tulangan diperhitungkan memikul gaya tarik dan sebagian gaya tekan, selain itu ada gaya gaya lain yang dipikul oleh tulangan seperti, gaya puntir, gaya geser dan lain lain.

2.13.1 Fungsi Beton dan Tulangan

Dari uraian di atas dapatlah dipahami, bahwa baik beton maupun baja tulangan pada struktur beton bertulang tersebut mempunyai fungsi yang berbeda sesuai dengan sifat bahan yang bersangkutan.

Fungsi beton :

- Menahan gaya tekan.
- Menutup baja tulangan agar tidak berkarat.

Fungsi baja tulangan :

- Menahan gaya tarik.
- Mencegah retak beton.

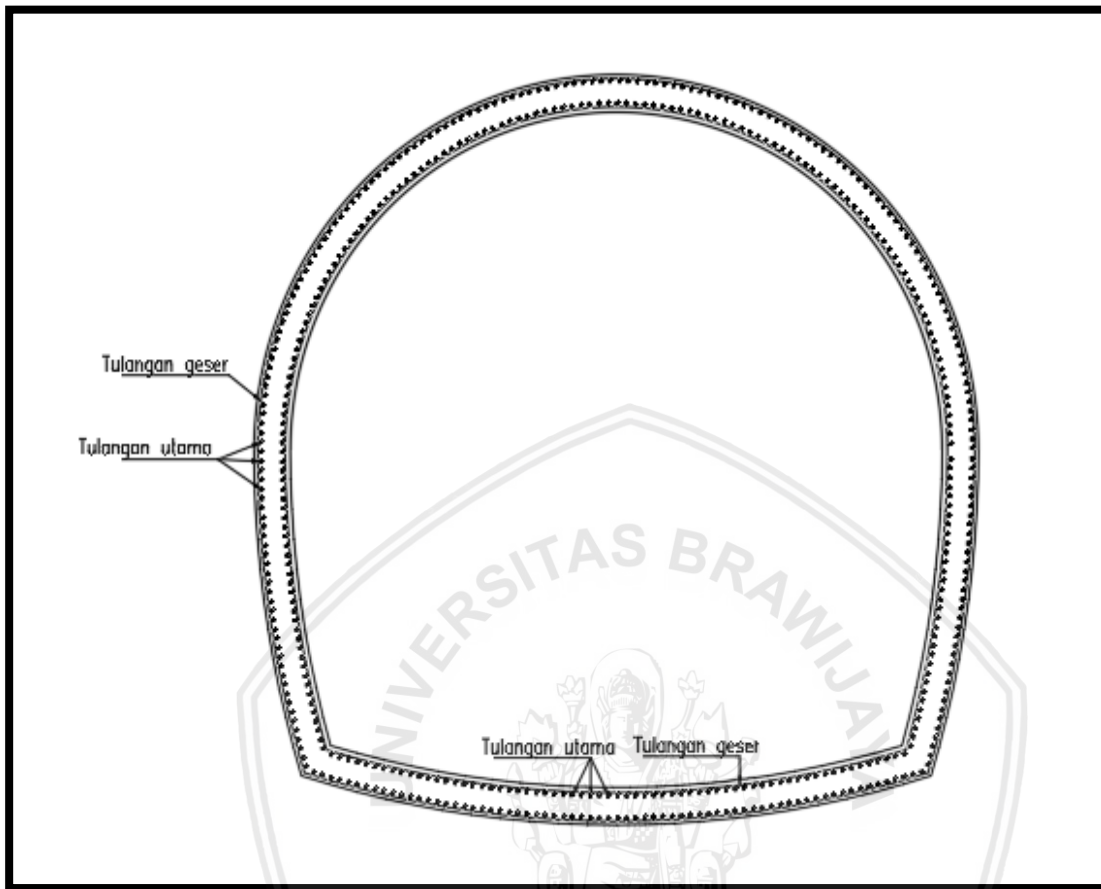
2.13.2 Tulangan Utama

Fungsi utama baja tulangan pada struktur beton bertulang yaitu untuk menahan gaya tarik, Oleh karena itu pada struktur balok, pelat, fondasi, ataupun struktur lainnya dari bahan beton bertulang, selalu diupayakan agar tulangan longitudinal (tulangan memanjang) dipasang pada serat-serat beton yang mengalami tegangan tarik. Keadaan ini terjadi terutama pada daerah yang menahan momen lentur besar (umumnya di daerah lapangan/tengah bentang, atau di atas tumpuan), sehingga sering mengakibatkan terjadinya retakan beton akibat tegangan lentur tersebut. Tulangan longitudinal ini dipasang searah sumbu batang.

2.13.3 Tulangan Geser

Retakan beton pada balok juga dapat terjadi di daerah ujung balok yang dekat dengan tumpuan. Retakan ini disebabkan oleh bekerjanya gaya geser atau gaya lintang balok yang cukup besar, sehingga tidak mampu ditahan oleh material beton dari balok yang

bersangkutan. Agar balok dapat menahan gaya geser tersebut, maka diperlukan tulangan geser yang dapat berupa tulangan-miring/tulangan-serong atau berupa sengkang/begel.



Gambar 2.26 Desain Terowongan Pengelak

Sumber: Hasil penggambaran (2019)

2.13.4 Langkah Perencanaan Penulangan

Langkah-langkah perencanaan penulangan pada plat 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. Menghitung tebal pembetonan terowongan (t) dan lebar efektif (d) beton (direncanakan dan disesuaikan dengan tabel penutup beton).
4. Menghitung momen yang menentukan / momen luar.
5. Menghitung rasio penulangan dan luas tulangan pokok dengan menggunakan persamaan:

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} \dots\dots\dots(2-29)$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \frac{\beta \cdot f_c'}{f_y} \cdot \beta \cdot \frac{600}{600 + f_y} \dots\dots\dots(2-30)$$

$$R_n = \frac{R_u}{b \cdot d^2} \dots\dots\dots(2-31)$$

$$\omega = 0,85 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot R_n}{f_{c'}}} \right) \dots\dots\dots(2-32)$$

$$\rho = \omega \cdot \frac{f_{c'}}{f_y} \dots\dots\dots(2-33)$$

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d \dots\dots\dots(2-34)$$

Keterangan:

$f_{c'}$ = mutu beton (Mpa)

f_y = mutu baja tulangan (Mpa)

M_u = momen yang bekerja (kNm)

b = panjang plat

d = tebal efektif beton (cm)

R_n = momen per satuan luas

A_s = luasan tulangan (mm²)

ρ = rasio tulangan yang direncana (mm²)

ρ_{\min} = rasio tulangan maksimum (mm²)

ρ_{\max} = rasio tulangan minimum (mm²)

6. Memilih diameter tulangan

Berdasarkan hasil perhitungan luas tulangan pada mm² per meter lebar pelat (buku grafik dan tabel perhitungan beton bertulang W.C Vis Gideon K, 1993) dengan syarat luasan yang didapatkan harus lebih besar dari luasan hasil perhitungan.

7. Kontrol gaya

Setelah menentukan diameter tulangan maka perlu diperiksa apakah kekuatan tulangan yang dipilih mampu menahan gaya geser dan momen yang terjadi. Pemeriksaan teradap gaya lintang dirumuskan:

$$\Phi V_n \geq V_u \dots\dots\dots(2-35)$$

$$V_n = V_c + V_s \dots\dots\dots(2-36)$$

$$V_c = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d \dots\dots\dots(2-37)$$

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \dots\dots\dots(2-38)$$

Keterangan:

$V_u \leq \Phi V_c$ maka diperlukan tulangan geser praktis

$\Phi V_n \geq V_u$ diperlukan tulangan geser minimum

V_u = gaya lintang pada penampang yang ditinjau (kNm)

- ΦV_n = kekuatan geser nominal = $\Phi V_s + \Phi V_c$
 ΦV_s = kekuatan geser nominal dari tulangan geser
 ΦV_c = kekuatan geser nominal dari beton
 A_v = $0,5 A_s$ = Luas total penampang tulangan (mm^2)
 Φ = faktor reduksi beton = 0,6
 f_y = mutu baja tulangan (Mpa)
 b = lebar penampang beton (mm)

2.13.5 Mutu Beton

Beton adalah bagian dari konstruksi yang dibuat dari campuran beberapa material sehingga mutunya akan banyak tergantung pada kondisi material pembentukan ataupun pada proses pembuatannya.

Beton dengan mutu beton $f'c$ 25 menyatakan kekuatan tekanan minimum adalah 25 Mpa pada umur beton 28 hari. Untuk beton dengan mutu beton K 250 menyatakan kekuatan tekan karakteristik minimum adalah pada umur beton 28 hari. Untuk lebih jelas, berikut tabel konversi mutu beton $f'c$ ke K pada tabel 2.6 berikut:

Tabel 2.10

Konversi Mutu Beton $f'c$ ke K.

Mutu beton (Kg/cm ²)	$F_c = K \cdot 0,083$ (Mpa)	Mutu beton (Mpa)	$K = f_c / 0,083$ (Kg/cm ²)
100	8.3	5	60.2
125	10.4	10	120.5
150	12.5	12	144.6
175	14.5	15	180.7
200	16.6	16	192.8
225	18.7	20	241
250	20.8	22.5	271.1
275	22.8	25	301.2
300	24.9	30	361.4

Sumber: Vis dan Kusuma (1994, p.35)

2.13.6 Mutu Baja dan Tulangan

Baja tulangan untuk konstruksi beton bertulang ada bermacam macam jenis dan mutu tergantung dari pabrik yang membuatnya. Ada dua jenis baja tulangan, tulangan polos (*Plain bar*) dan tulangan ulir (*Deformed bar*). Sebagian besar baja tulangan yang ada di Indonesia berupa tulangan polos untuk baja lunak dan tulangan ulir untuk baja keras. Beton tidak dapat menahan gaya tarik melebihi nilai tertentu tanpa mengalami keretakan. Oleh

karena itu, agar beton dapat bekerja dengan baik dalam sistem struktur, beton perlu dibantu dengan memberinya perkuatan penulangan yang berfungsi menahan gaya tarik. Penulangan beton menggunakan bahan baja yang memiliki sifat teknis yang kuat menahan gaya tarik. Baja beton yang digunakan dapat berupa batang baja lonjoran atau kawat rangkai las (*wire mesh*) yang berupa batang-batang baja yang dianyam dengan teknik pengelasan. Baja beton dikodekan berurutan dengan: huruf BJ, TP dan TD,

- BJ berarti Baja
- TP berarti Tulangan Polos
- TD berarti Tulangan Deformasi (Ulir)

Angka yang terdapat pada kode tulangan menyatakan batas leleh karakteristik yang dijamin. Baja beton BJTP 24 dipasok sebagai baja beton polos, dan bentuk dari baja beton BJTD 40 adalah deform atau dipuntir . Baja beton yang dipakai dalam bangunan harus memenuhi norma persyaratan terhadap metode pengujian dan pemeriksaan untuk bermacam macam mutu baja beton menurut SNI menggunakan simbol BJTP (Baja Tulangan Polos) dan BJTD (Baja Tulangan Ulir). Baja tulangan polos yang tersedia mulai dari mutu BJTP -24 hingga BJTP – 30, dan baja tulangan ulir umumnya dari BJTD – 30 hingga BJTD 40. Angka yang mengikuti simbol ini menyatakan tegangan leleh karakteristik materialnya. Sebagai contoh BJTP – 24 menyatakan baja tulangan polos dengan tegangan leleh material $2400\text{kg}/\text{cm}^2$ (240 MPa)

Agar struktur beton mampu menahan gaya tarik maka perlu diberi perkuatan berupa tulangan baja. Baja memiliki sifat plastis dan elastis., dan yang terpenting adalah sifat daktilitasnya. Daktilitas adalah kemampuan bahan untuk berubah bentuk atau deformasi tanpa mengalami putus.

Tulangan yang digunakan pada elemen beton bertulang dibatasi hanya pada baja tulangan dan kawat baja saja. Untuk tulangan sendiri dibagi menjadi 2 jenis yaitu:

1. Baja tulangan polos

Baja tulangan ini tersedia dalam beberapa diameter, tetapi karena ketentuan SNI hanya memperkenankan pemakaiannya untuk sengkang dan tulangan spiral, maka pemakaiannya terbatas. Biasanya digunakan untuk tulangan geser dan mempunyai tegangan leleh (f_y) minimal sebesar 240 Mpa dengan ukuran diameter 6, 8, 10, 12, 14, 16.

2. Baja tulangan ulir

Baja tulangan ulir lebih diutamakan pemakaiannya untuk tulangan struktur beton. Hal ini dimaksudkan agar struktur beton bertulang tersebut memiliki keandalan terhadap efek gempa, karena akan terdapat ikatan yang lebih baik antara beton dan tulangnya. Biasanya

digunakan untuk tulangan longitudinal atau tulangan memanjang, dan memiliki titik leleh minimal 300 Mpa. Dengan ukuran diameter 10, 13, 16 19, 22, 25, 32, dan 36.

Untuk mutu baja tulangan dapat dilihat pada tabel 2.11 mutu baja tulangan.

Tabel 2.11
Mutu Baja Tulangan

Mutu Baja	Kuat leleh f_y (Mpa)	Kuat leleh (Kg/m ²)
Fy. 240	240	2400
Fy. 300	300	3000
Fy. 400	400	4000
Fy. 500	500	5000

Sumber: Vis dan Kusuma (1994, p.35)

2.12.7 Tebal Selimut Beton

Selimut beton bertujuan melindungi tulangan teroksidasi akibat pengaruh cuaca dan lingkungan sekitarnya seperti bahan kimia maupun api (kebakaran). Selimut beton diukur dari permukaan beton ke permukaan terluar baja. Tebal selimut beton bergantung pada diameter tulangan yang digunakan, untuk D-19 hingga D-56 minimal menggunakan tebal selimut beton 50 mm. Sedangkan untuk tebal selimut beton minimal pada struktur yang berada di bawah tanah adalah 70 mm.

BAB III

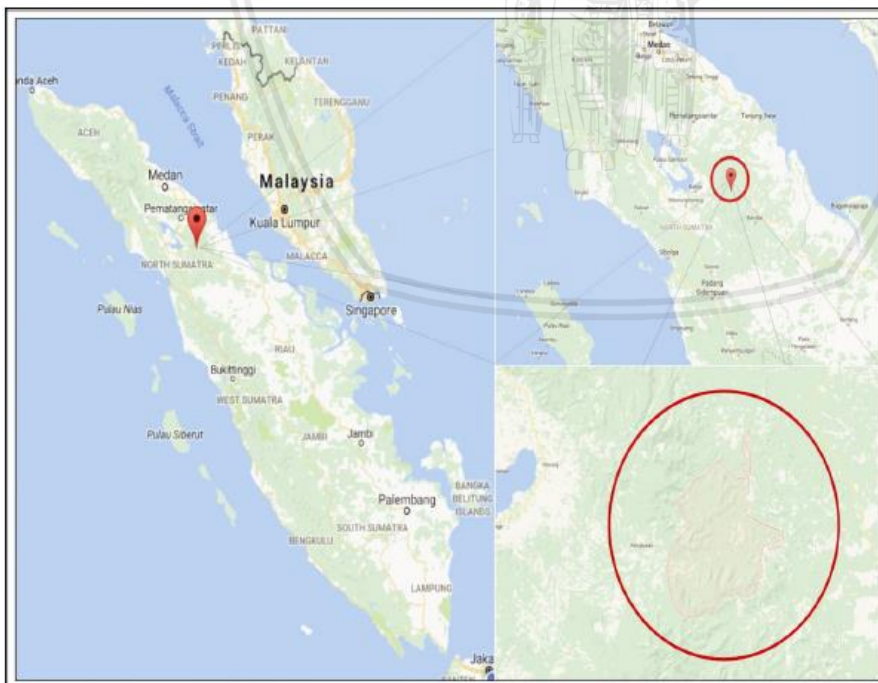
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Deskripsi Daerah Studi

Lokasi bendungan terletak di Sungai Kualu terletak pada koordinat UTM zona 47, 543.733 m T dan 252.296 m U di Kecamatan Nassau Kabupaten Toba Samosir, Sumatra Utara. Lokasi kajian dapat dijangkau dengan jalur udara melalui Bandara Silangit, kemudian dilanjutkan dengan perjalanan darat menuju Pasorubuan dan dilanjutkan 15 km ke Kecamatan Nassau.

Kecamatan Nassau berada pada ketinggian 300 meter hingga 1.650 meter di atas permukaan laut. Sungai kualu memiliki Panjang 24.79 km dan luas DAS 465,44 km². Adapun batas wilayah disekitar daerah studi adalah sebagai berikut :

- Sebelah Utara : Kabupaten Labuhanbatu Utara
- Sebelah Selatan : Kabupaten Labuhanbatu Utara
- Sebelah Barat : Kecamatan Habinsaran dan Borbor
- Sebelah Timur : Kabupaten Labuhanbatu Utara



Gambar 3.1 Lokasi Daerah Studi

Sumber : Laporan Faktual Penyelidikan Tanah Bendungan Kualu (2018, p.2)

3.1.1 Kondisi Topografi

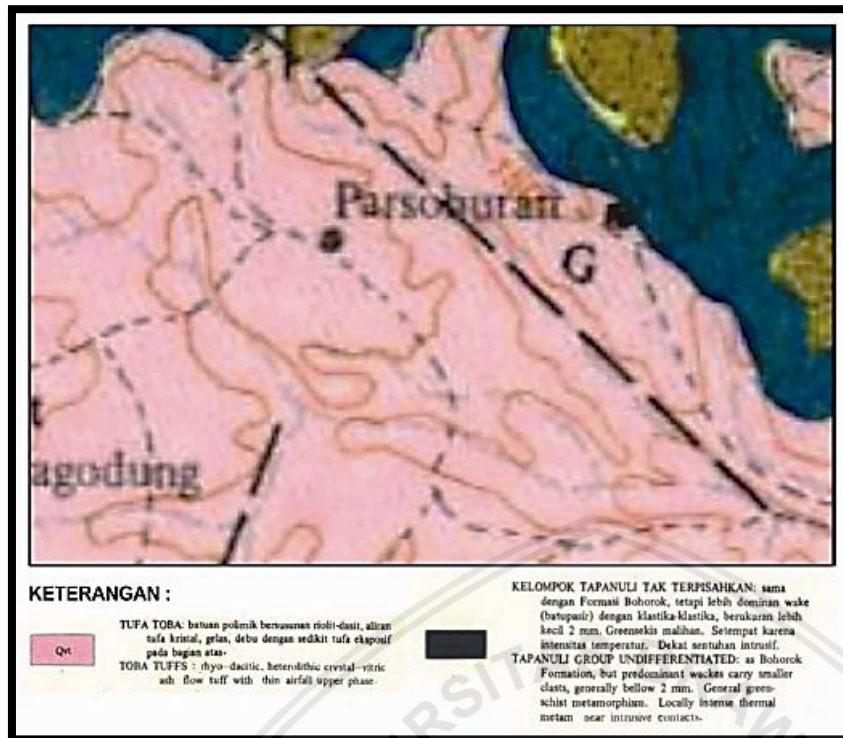
Kondisi topografi di lokasi bendungan merupakan perbukitan bergelombang yang tertutup oleh kebun, sawah, tegalan, dan semak belukar. Sementara itu letak terowongan pengelak berada pada tebing sandaran kanan. Pada sisi kanan bendungan terdiri dari lereng yang cukup luas dan memiliki elevasi +748 m hingga +816 m.

3.1.2 Kondisi Geologi

Bendungan Kualu terletak di Sungai Kualu, ketinggian palung pada sumbu bendungan berada pada elevasi +694 m hingga +734 m dengan kondisi tebing sungai yang relatif tegak. Tepi kanan bendungan berbentuk lereng punggung yang cukup lebar dan berada pada elevasi +748 m hingga +816 m. Tepi kiri bendungan terletak di sisi selatan memiliki kemiringan yang curam berada pada elevasi +728 m hingga +800 m yang memanjang di sepanjang tepi kiri waduk.

Secara umum rencana saluran pengelak merupakan lereng perbukitan dengan kemiringan 30° hingga 50° . Kondisi geologi pada Bendungan Kualu digolongkan menjadi dua satuan formasi yaitu formasi kluet dan formasi tufa tuba. Dimana masing-masing memiliki karakteristik batuan yang berbeda-beda. Formasi kluet terdiri dari batu pasir meta kuarsa, metaklake, batu sabak dan juga filit. Sedangkan pada formasi tufa tuba berupa tufa ridoasit. Berwarna abu-abu pucat dengan matriks gelas, Kristal kuarsa, biotit, sanidin, hornlende, plagioklas, dengan mineral minornya yaitu apatit, magnetit, ilmenit, hipersten, alanit dan zirkon. Material penyusun terbentuk akibat pengendapan abu vulkanik dari letusan Gunung Toba yang terendapkan.

Kondisi geologi terowongan saluran secara umum terdiri dari endapan piroklastik (*non-welded pyroclastic*) berupa pasir lanauan-lempungan tuffaan di permukaan dan didasari oleh batuan tuffa terelaskan (*welded tuff*). Endapan piroklastik pasir lanauan-lempungan tuffaan diklasifikasikan sebagai kelas batuan D terdiri dari pasir halus-kasar dan tuff.



Gambar 3.2 Kondisi Topografi Lokasi Studi

Sumber : Laporan Faktual Penyelidikan Tanah Bendungan Kualu (2018, p.4)

3.1.3 Statigrafi

Geologi regional Kecamatan Nassau terdiri dari 2 satuan formasi yaitu formasi kluet dan formasi tufa tuba. Setiap formasi memiliki karakteristiknya masing-masing. Formasi kluet (Puk) memiliki jenis batuan berupa batu pasir meta kuarsa, metaklake, batu sabak, dan filit. Sedangkan formasi tufa tuba memiliki batuan yang dominan berupa tufa riodasit. Formasi ini berwarna abu-abu pucat dengan matriks gelas, kristal kuarsa, biotit, sanidin, hornlende, plagioklas dengan mineral minornya yaitu apatit, ilmenite, hipersten, alanit, dan zirkon. Abu vulkanik dari letusan Gunung Toba jatuh dan terendapkan pada daerah ini.

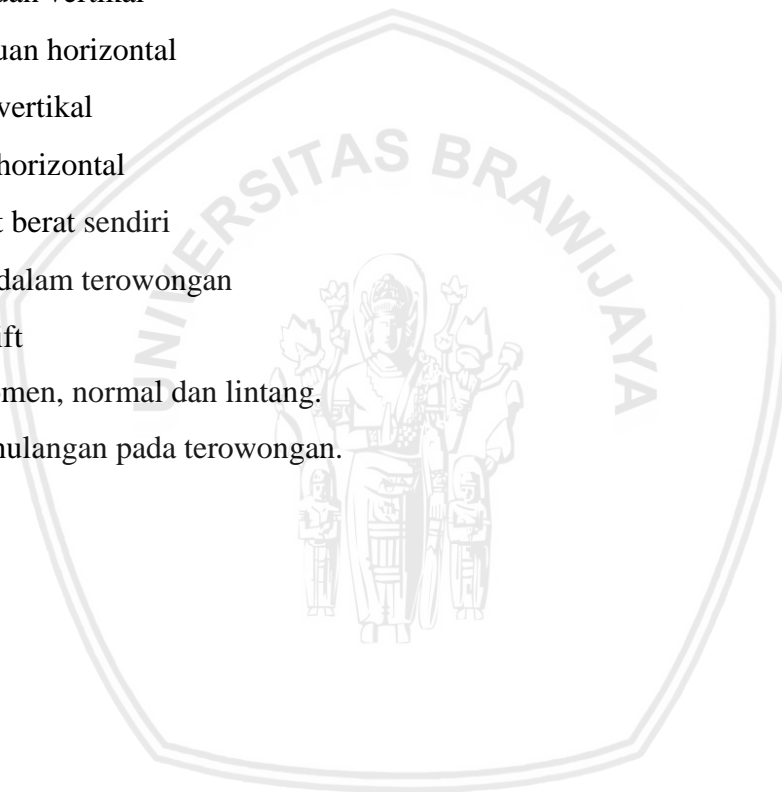
3.2 Data yang Diperlukan

Dalam perencanaan terowongan pengelak, data-data yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

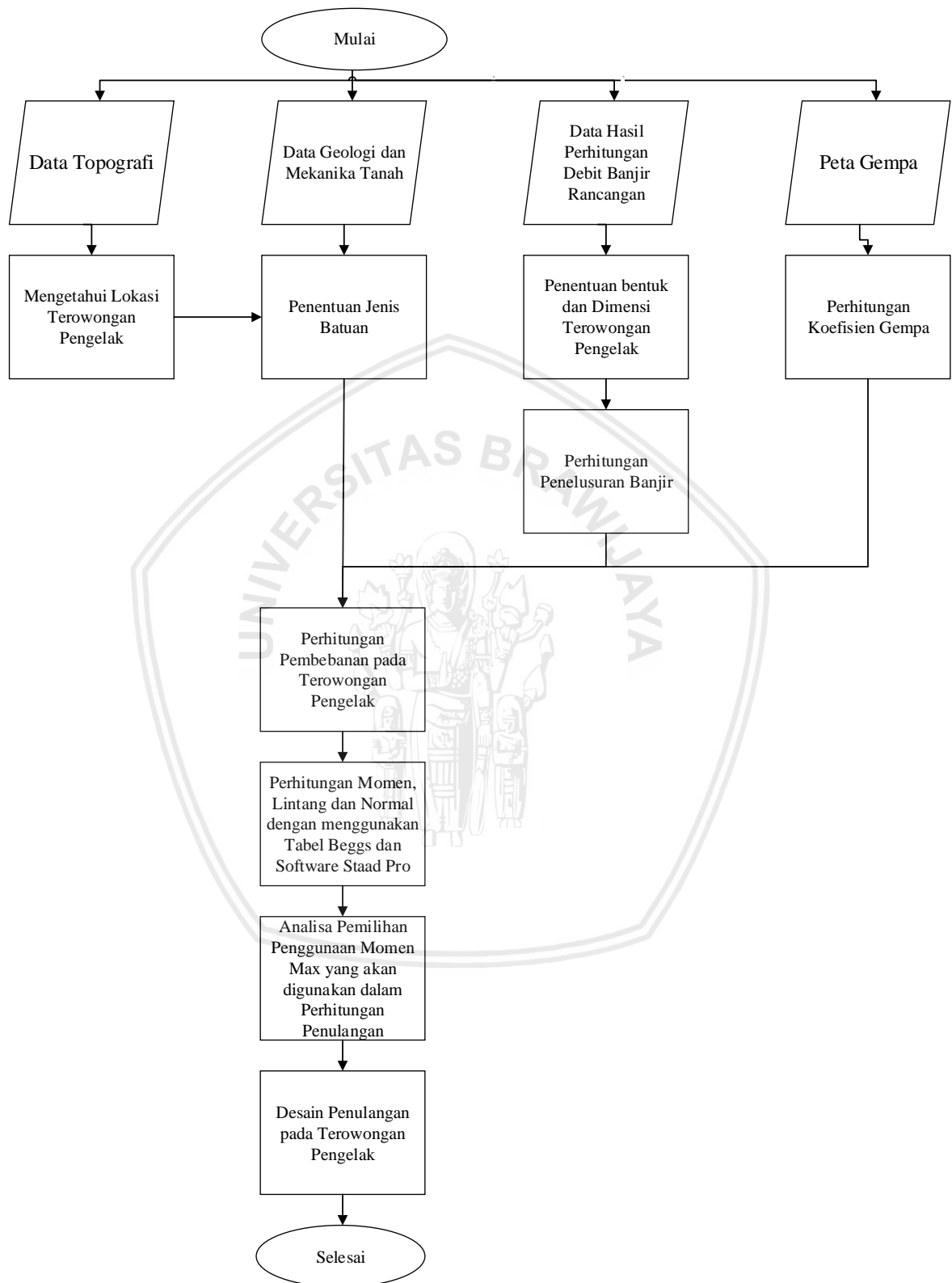
1. Debit banjir rancangan Bendungan Kualu.
2. Peta kontur dan denah bendungan.
3. Data bor log.
4. Peta lokasi bor log pada terowongan pengelak.
5. Muka air tanah pada terowongan pengelak

3.3 Langkah-langkah Perencanaan

1. Menggunakan debit banjir kala ulang 25 th (Q_{25th}) untuk perhitungan perencanaan terowongan pengelak.
2. Melakukan perhitungan penelusuran banjir. Dimulai dengan melakukan analisis hidrolika pada terowongan. Perhitungan ini terbagi menjadi tiga kondisi yaitu kondisi aliran bebas, aliran transisi, dan aliran tertekan.
3. Membuat desain terowongan pengelak.
4. Melakukan analisis pembebanan pada terowongan. Kondisi pembebanan yang akan dilakukan dalam perencanaan adalah sebagai berikut :
 - Tekanan batuan vertikal
 - Tekanan batuan horizontal
 - Tekanan air vertikal
 - Tekanan air horizontal
 - Beban akibat berat sendiri
 - Tekanan air dalam terowongan
 - Tekanan uplift
5. Perhitungan momen, normal dan lintang.
6. Perhitungan penulangan pada terowongan.



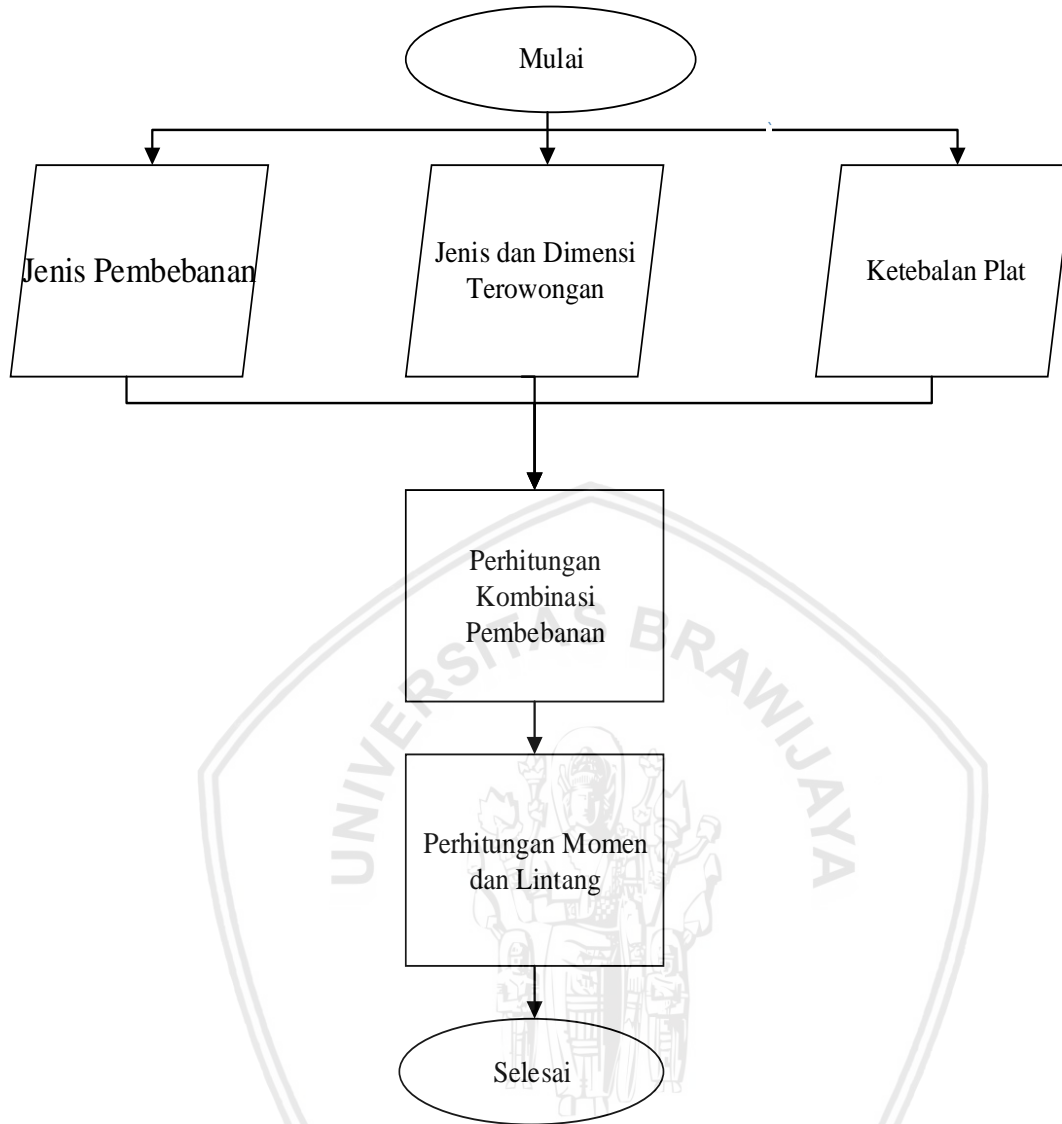
3.4 Diagram Alir Penyelesaian Studi



Gambar 3.3 Diagram Alir Penyelesaian Studi

Sumber : Hasil Perhitungan (2018)

3.5 Diagram Alir Perhitungan Menggunakan Software Staad Pro



Gambar 3.4 Diagram Alir Perhitungan Menggunakan Software Staad Pro

Sumber : Hasil Perhitungan (2018)

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Data Perencanaan

4.1.1 Data Teknis Terowongan Pengelak

Data Perencanaan yang diperlukan untuk perencanaan terowongan pengelak pada

Bendungan Kualu adalah sebagai berikut:

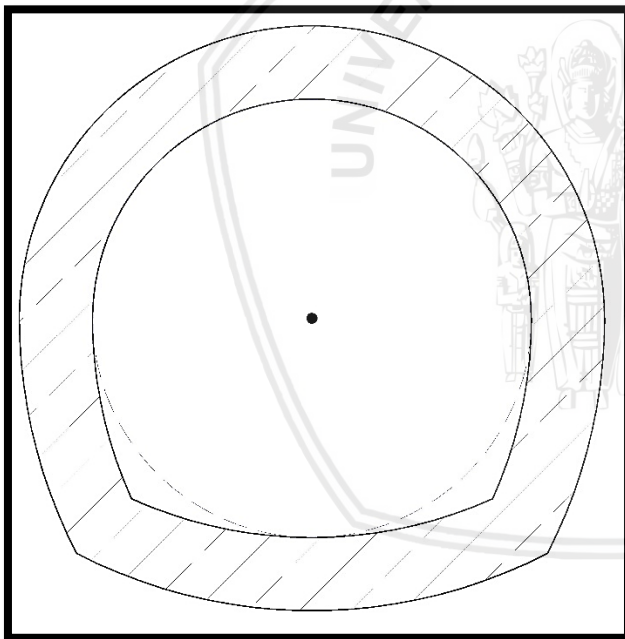
Tipe terowongan : Tapal kuda (*Shape F*)

Elevasi dasar hulu : +695,5

Elevasi dasar hilir : +692

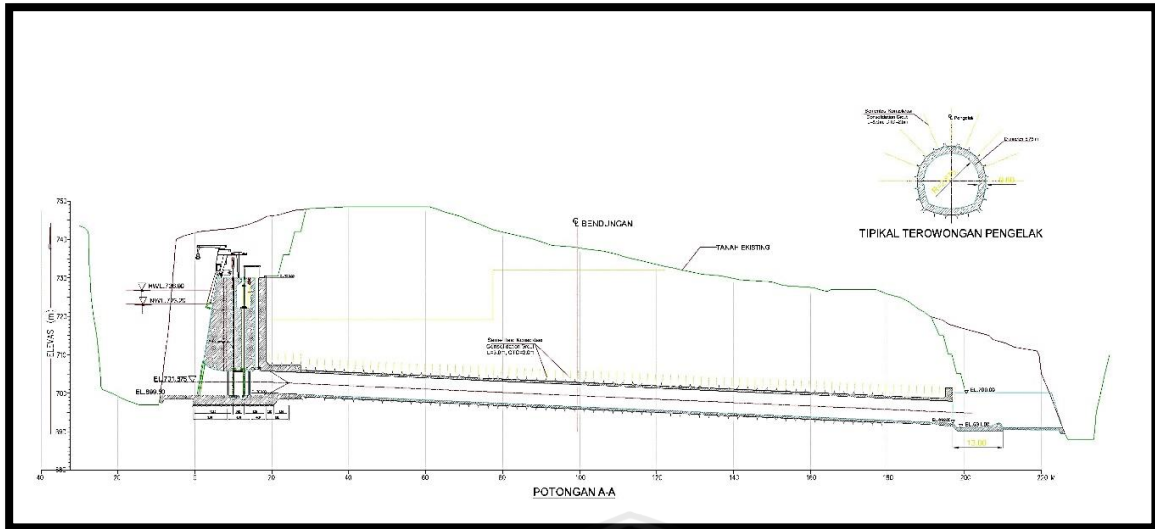
Panjang terowongan : 197 m

Slope : 0,018



Gambar 4.1 Bentuk Terowongan Pengelak *shape F*

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.2 Sketsa Memanjang Terowongan Pengelak

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

4.1.2 Data Debit Banjir Rancangan

Debit banjir rancangan merupakan debit maksimum yang ada di sungai dengan periode ulang tertentu. Untuk mendapatkan besarnya debit banjir rencana perlu dilakukan analisa hidrologi. Debit banjir rancangan yang digunakan dalam perencanaan terowongan pengelak berdasarkan tabel 2.1 pemilihan kala ulang banjir rancangan adalah Debit kala ulang 25 tahun (Q_{25th}). Dalam studi ini, data debit rencana didapat dari konsultan, hasil dari analisisnya sebagai berikut:

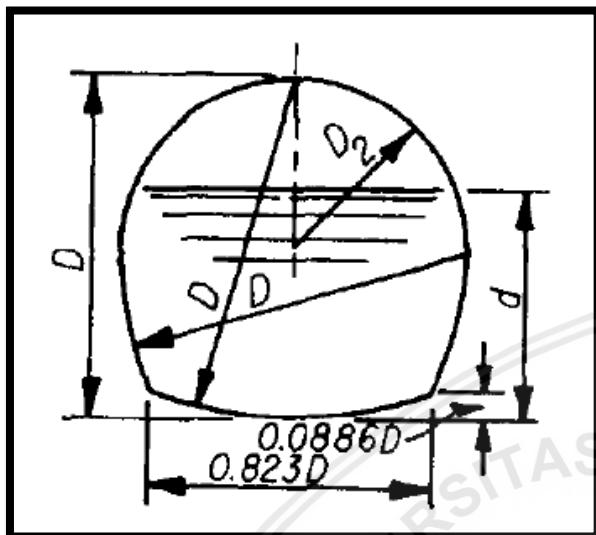
Tabel 4.1
Debit Banjir Rancangan

Kala Ulang	Debit Banjir (m^3/dt)
Q_{2th}	370,483
Q_{5th}	494,776
Q_{10th}	587,010
Q_{25th}	709,331
Q_{50th}	803,044
Q_{100th}	897,744
Q_{200th}	993,924
Q_{1000th}	1222,800

Sumber: Hasil perhitungan konsultan (2018)

4.2 Penentuan Dimensi Terowongan

Terowongan direncanakan berpenampang tapal kuda *Shape F* (pada buku *Beggs Deformation Analysis of Single Barrel Conduit*). Terowongan direncanakan dengan diameter terowongan 9 m.



Gambar 4.3 Sketsa Terowongan Pengelak Shape F

Sumber: *United States Departement of the Interior* (1987, p.580)

4.3 Lengkung Kapasitas Waduk

Lengkung kapasitas waduk merupakan hubungan Antara elevasi dengan volume, dan elevasi dengan luas. Lengkung kapasitas waduk mencerminkan kapasitas tampungan yang dimiliki oleh waduk tersebut. Dalam studi ini lengkung kapasitas waduk diperlukan untuk perhitungan penelusuran banjir.

Tabel 4.2

Lengkung Kapasitas Waduk

No.	Elevasi Minimum (m)	Elevasi Maksimum (m)	Luas (m ²)	Luas rata-rata (m ²)	Volume (m ³)	Volume Kumulatif (m ³)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	28110,000	14055,000	14055,000	14055,000	28110,000	14055,000
3	32590,000	30350,000	30350,000	44405,000	32590,000	30350,000
4	92033,000	62311,500	62311,500	106716,500	92033,000	62311,500
5	88420,000	90226,500	90226,500	196943,000	88420,000	90226,500
6	70470,000	79445,000	79445,000	276388,000	70470,000	79445,000

Lanjutan Tabel 4.2
Lengkung Kapasitas Waduk

No.	Elevasi Minimum	Elevasi Maksimum	Luas	Luas rata- rata	Volume	Volume Kumula-tif
	(m)	(m)	(m ²)	(m ²)	(m ³)	(m ³)
7	698	699	57260,000	63865,000	63865,000	340253,000
8	699	700	48810,000	53035,000	53035,000	393288,000
9	700	701	18313,800	33561,900	33561,900	426849,900
10	701	702	93227,000	55770,400	55770,400	482620,300
11	702	703	73211,000	83219,000	83219,000	565839,300
12	703	704	50607,000	61909,000	61909,000	627748,300
13	704	705	59633,000	55120,000	55120,000	682868,300
14	705	706	58178,000	58905,500	58905,500	741773,800
15	706	707	57189,000	57683,500	57683,500	799457,300
16	707	708	32851,000	45020,000	45020,000	844477,300
17	708	709	27259,000	30055,000	30055,000	874532,300
18	709	710	29446,000	28352,500	28352,500	902884,800
19	710	711	34048,000	31747,000	31747,000	934631,800
20	711	712	37200,000	35624,000	35624,000	970255,800
21	712	713	39961,000	38580,500	38580,500	1008836,300
22	713	714	44853,000	42407,000	42407,000	1051243,300
23	714	715	43662,000	44257,500	44257,500	1095500,800
24	715	716	40456,000	42059,000	42059,000	1137559,800
25	716	717	41613,000	41034,500	41034,500	1178594,300
26	717	718	42796,000	42204,500	42204,500	1220798,800
27	718	719	43450,000	43123,000	43123,000	1263921,800
28	719	720	44118,000	43784,000	43784,000	1307705,800
29	720	721	45112,000	44615,000	44615,000	1352320,800
30	721	722	46115,000	45613,500	45613,500	1397934,300
31	722	723	44687,000	45401,000	45401,000	1443335,300

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

4.4 Perhitungan Penelusuran Banjir

Kapasitas terowongan pengelak direncanakan berdasarkan debit banjir rancangan dengan kala ulang 25 tahun. Dari aspek hidrolika, tipe aliran pada terowongan pengelak dibagi menjadi 2 (dua) kondisi :

a. Kondisi Aliran Bebas

Aliran bebas terjadi ketika perbandingan tinggi muka air dan tinggi saluran kurang dari 1,2 D. Untuk menentukan kecepatan aliran dalam saluran pengelak digunakan rumus Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

$$Q = A \cdot V$$

Dimana :

Q = debit yang mengalir pada kedalaman tertentu (m^3/det)

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

A = luas penampang basah (m^2)

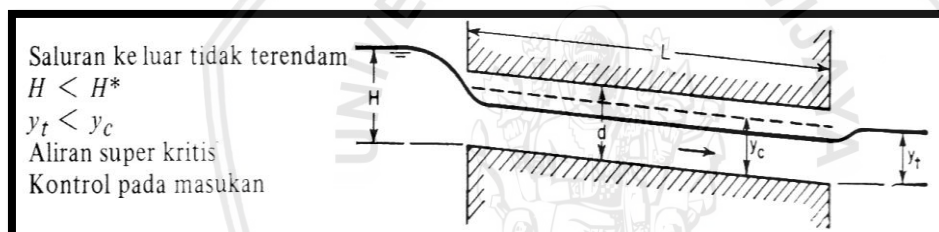
P = keliling basah (m)

D = diameter saluran (m)

S = kemiringan saluran

n = koefisien kekasaran Manning (=0,014)

Sedangkan jika slope saluran termasuk dalam kategori terjal (*steep slope*), maka akan terjadi aliran super kritis, sehingga rumus aliran seragam Manning tidak berlaku. Dengan demikian karakteristik alirannya dapat diasumsikan sebagai berikut :



Gambar 4.4 Karakteristik Hidrolika Aliran Bebas dengan Titik Kontrol Hidrolis di Inlet Terowongan

Sumber: Chow (1992, p.491)

Perhitungan kapasitas aliran dengan titik kontrol hidrolis di inlet terowongan dihitung dengan rumus aliran kritis sebagai berikut :

$$Y_c = \frac{2}{3} \cdot H$$

$$V_c = (g Y_c)^{1/2}$$

$$A_c = B \cdot Y_c$$

$$Q_c = A_c \cdot V_c$$

Dimana :

Q_c = debit aliran kritis (m^3/det)

V_c = kecepatan aliran kritis (m/det)

A_c = luas penampang basah (m^2)

Y_c = kedalaman aliran kritis (m/det)

b. Kondisi Aliran Tekan

Syarat yang harus dipenuhi untuk aliran tekan (pressure condition) adalah :

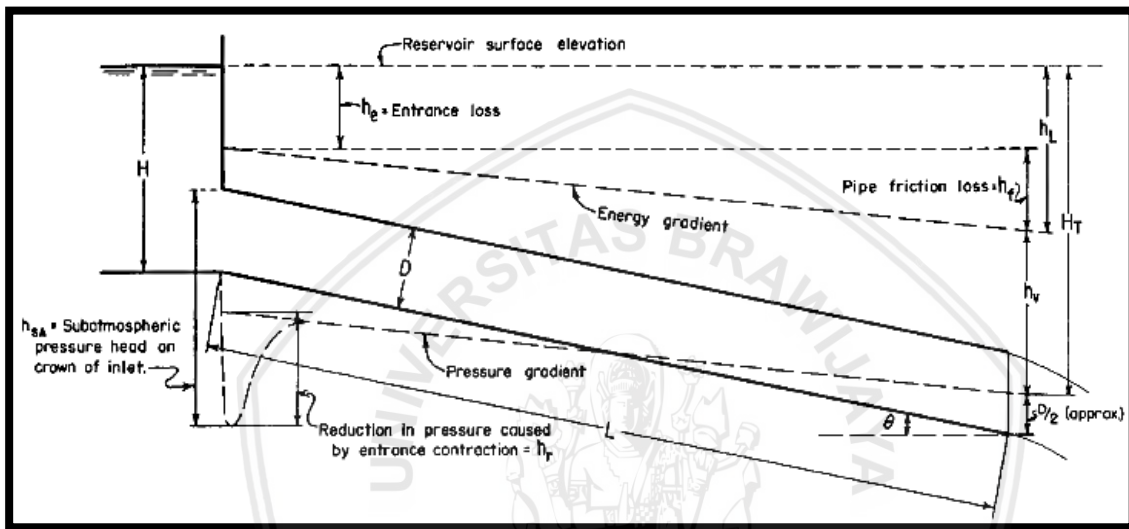
$$\frac{d}{D} > 1,5$$

Dimana :

D = tinggi terowongan (9,00 m)

d = tinggi air di atas inlet intake

Pada kondisi aliran tekan pada terowongan berlaku rumus : $Q = A \cdot V$ dan hukum Bernoulli. Karakteristik hidrolika aliran tekan dalam terowongan dapat dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 4.5 Karakteristik Hidrolika Aliran Tekan Dalam Terowongan

Sumber: Hasil Penggambaran (2019)

Agar dapat mengetahui karakter aliran dalam terowongan maka perlu diketahui tinggi permukaan air pada bagian pemasukan. Debit yang masuk ke dalam terowongan pengelak tergantung pada tinggi air di inlet terowongan pengelak. Pada skripsi ini beberapa parameter yang dibutuhkan dalam perhitungan aliran bebas dan tertekan dilakukan dengan interpolasi pada tabel yang telah disediakan di buku *design of small dam* yaitu telah tersebut pada tabel 2.2 *Velocity head and discharge at critical depths* dan 2.3 *Uniform Flow in Horseshoe Sections Flowing party full*.

4.4.1 Perhitungan Penelusuran Banjir Dengan Diameter Terowongan 6 m

Pada kondisi ini, air yang berada di inlet terowongan belum memenuhi terowongan. Atau dapat dikatakan tinggi air < tinggi terowongan. Dalam perhitungan aliran bebas dihitung hingga tinggi air < 1,2D. Perhitungan hidrolika aliran bebas adalah sebagai berikut:

Tabel 4.3

Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Bebas $h < 1,2$ Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 6 m)

El.	Tinggi	A	P	R	v	Q	F	
MA	MA							
(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m/detik)	(m ³ /detik)	Nilai	Keterangan
696,0	0,5	1,613	4,923	0,328	4,524	7,297	1,371	Superkritis
696,5	1,0	4,171	6,100	0,684	7,390	30,824	1,470	Superkritis
697,0	1,5	6,908	7,147	0,967	9,308	64,301	1,480	Superkritis
697,5	2,0	9,775	8,166	1,197	10,733	104,921	1,462	Superkritis
698,0	2,5	12,726	9,180	1,386	11,837	150,631	1,428	Superkritis
698,5	3,0	15,718	10,177	1,544	12,721	199,940	1,386	Superkritis
699,0	3,5	18,704	11,179	1,673	13,419	250,985	1,331	Superkritis
699,5	4,0	21,605	12,216	1,769	13,924	300,822	1,256	Superkritis
700,0	4,5	24,329	13,321	1,826	14,226	346,091	1,159	Superkritis
700,5	5,0	26,758	14,560	1,838	14,285	382,225	1,030	Superkritis

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Contoh perhitungan: (pada elevasi 696)

1. Nilai A, P, dan R didapat dengan interpolasi pada tabel 4.1 dan 4.2.
2. Menghitung nilai v, menggunakan rumus manning

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \\
 &= \frac{1}{0,014} \cdot 0,328^{2/3} \cdot 0,038^{1/2} \\
 &= 4,524 \text{ m/dt}
 \end{aligned}$$

3. Menghitung nilai Q, menggunakan rumus kontinuitas

$$\begin{aligned}
 Q &= v \cdot A \\
 &= 4,524 \cdot 1,613 = 7,297 \text{ m}^3/\text{dt}
 \end{aligned}$$

4. Menghitung nilai F

$$F = 1,371 \sim \text{aliran superkritis}$$

Karena slope saluran termasuk dalam kategori terjal (*steep slope*), maka akan terjadi aliran super kritis, sehingga rumus aliran seragam Manning tidak berlaku. Perhitungan kapasitas aliran dengan titik kontrol hidrolis di inlet terowongan dihitung dengan rumus aliran kritis sebagai berikut :

Tabel 4.4
Perhitungan Debit pada Saat Kondisi Kritis (Diameter Terowongan Pengelak 6 m)

El. MA (m)	Tinggi MA (m)	A (m ²)	v_c (m/dt)	Q_c (m ³ /dt)
696,0	0,5	1,613	1,808	2,916
696,5	1,0	4,171	2,557	10,667
697,0	1,5	6,908	3,132	21,638
697,5	2,0	9,775	3,617	35,353
698,0	2,5	12,726	4,044	51,458
698,5	3,0	15,718	4,429	69,620
699,0	3,5	18,704	4,784	89,488
699,5	4,0	21,605	5,115	110,502
700,0	4,5	24,329	5,425	131,982
700,5	5,0	26,758	5,718	153,010

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

$$V_c = (g Y_c)^{1/2}$$

$$= 1,808 \text{ m/dt}$$

$$Q_c = A \cdot V_c$$

$$= 2,916 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Pada kondisi ini terowongan terisi penuh. Debit yang masuk tergantung pada tinggi muka air di bagian pemasukan. Perhitungannya kondisi aliran tertekan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.5
Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$ Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 6 m)

El. MA (m)	Tinggi MA (m)	$L \sin \theta$ m	A (m ²)	R (m)	$\sum c$ (m/detik)	v (m ³ /detik)	Q (m ³ /detik)
704,50	9,00	3,5	29,855	1,523	1,52536	8,591	256,486
705,00	9,50	3,5	29,855	1,523	1,52536	8,814	263,149
705,50	10,00	3,5	29,855	1,523	1,52536	9,032	269,648
706,00	10,50	3,5	29,855	1,523	1,52536	9,245	275,993
706,50	11,00	3,5	29,855	1,523	1,52536	9,452	282,196
707,00	11,50	3,5	29,855	1,523	1,52536	9,656	288,266
707,50	12,00	3,5	29,855	1,523	1,52536	9,855	294,210
708,00	12,50	3,5	29,855	1,523	1,52536	10,050	300,036
708,50	13,00	3,5	29,855	1,523	1,52536	10,241	305,752
709,00	13,50	3,5	29,855	1,523	1,52536	10,429	311,363
709,50	14,00	3,5	29,855	1,523	1,52536	10,614	316,874
710,00	14,50	3,5	29,855	1,523	1,52536	10,795	322,291

Lanjutan Tabel 4.5

Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$ Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 6 m)

El. MA (m)	Tinggi MA (m)	L sin θ m	A (m ²)	R (m)	$\sum c$	v (m/detik)	Q (m ³ /detik)
710,5	15,0	3,5	29,855	1,523	1,525	10,974	327,618
711,0	15,5	3,5	29,855	1,523	1,525	11,149	332,861
711,5	16,0	3,5	29,855	1,523	1,525	11,322	338,022
712,0	16,5	3,5	29,855	1,523	1,525	11,492	343,105
712,5	17,0	3,5	29,855	1,523	1,525	11,660	348,114
713,0	17,5	3,5	29,855	1,523	1,525	11,826	353,052
713,5	18,0	3,5	29,855	1,523	1,525	11,989	357,922
714,0	18,5	3,5	29,855	1,523	1,525	12,150	362,726
714,5	19,0	3,5	29,855	1,523	1,525	12,309	367,468
715,0	19,5	3,5	29,855	1,523	1,525	12,465	372,149
715,5	20,0	3,5	29,855	1,523	1,525	12,620	376,773
716,0	20,5	3,5	29,855	1,523	1,525	12,773	381,340
716,5	21,0	3,5	29,855	1,523	1,525	12,924	385,853
717,0	21,5	3,5	29,855	1,523	1,525	13,074	390,314
717,5	22,0	3,5	29,855	1,523	1,525	13,221	394,724
718,0	22,5	3,5	29,855	1,523	1,525	13,368	399,086
718,5	23,0	3,5	29,855	1,523	1,525	13,512	403,400
719,0	23,5	3,5	29,855	1,523	1,525	13,655	407,669
719,5	24,0	3,5	29,855	1,523	1,525	13,797	411,894
720,0	24,5	3,5	29,855	1,523	1,525	13,937	416,076
720,5	25,0	3,5	29,855	1,523	1,525	14,075	420,216
721,0	25,5	3,5	29,855	1,523	1,525	14,213	424,316
721,5	26,0	3,5	29,855	1,523	1,525	14,349	428,376
722,0	26,5	3,5	29,855	1,523	1,525	14,483	432,399
722,5	27,0	3,5	29,855	1,523	1,525	14,617	436,384
723,0	27,5	3,5	29,855	1,523	1,525	14,749	440,333
723,5	28,0	3,5	29,855	1,523	1,525	14,880	444,247
724,0	28,5	3,5	29,855	1,523	1,525	15,010	448,127
724,5	29,0	3,5	29,855	1,523	1,525	15,139	451,974
725,0	29,5	3,5	29,855	1,523	1,525	15,267	455,788
725,5	30,0	3,5	29,855	1,523	1,525	15,394	459,571
726,0	30,5	3,5	29,855	1,523	1,525	15,519	463,322
726,5	31,0	3,5	29,855	1,523	1,525	15,644	467,044
727,0	31,5	3,5	29,855	1,523	1,525	15,768	470,736
727,5	32,0	3,5	29,855	1,523	1,525	15,890	474,399
728,0	32,5	3,5	29,855	1,523	1,525	16,012	478,035
728,5	33,0	3,5	29,855	1,523	1,525	16,133	481,642
729,0	33,5	3,5	29,855	1,523	1,525	16,253	485,224
729,5	34,0	3,5	29,855	1,523	1,525	16,372	488,778
730,0	34,5	3,5	29,855	1,523	1,525	16,490	492,307

Lanjutan Tabel 4.5

Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$ Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 6 m)

El. MA (m)	Tinggi MA (m)	L sin θ m	A (m ²)	R (m)	$\sum c$	v (m/detik)	Q (m ³ /detik)
730,5	35	3,5	29,8548	1,5228	1,525356	16,60743	495,8114
731	35,5	3,5	29,8548	1,5228	1,525356	16,72397	499,2909
731,5	36	3,5	29,8548	1,5228	1,525356	16,83971	502,7462
732	36,5	3,5	29,8548	1,5228	1,525356	16,95466	506,178

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Contoh perhitungan: (pada elevasi 704,5)

1. Nilai A, dan R didapat dengan interpolasi pada tabel 2.2 dan 2.3

2. Menghitung koefisien hambatan

- Koefisien pada outlet (Co)

$$Co = 1$$

- Koefisien gesekan (Cf)

$$\begin{aligned} Cv &= n^2 \cdot L \cdot R^{4/3} \\ &= 0,02 \cdot 197 / 1,523^{4/3} \\ &= 0,985 \end{aligned}$$

- Koefisien inlet (Ci)

$$Ci = 0,5$$

- Sehingga $\sum C = Ci + Co + Cf = 1,525$

3. Menghitung nilai v

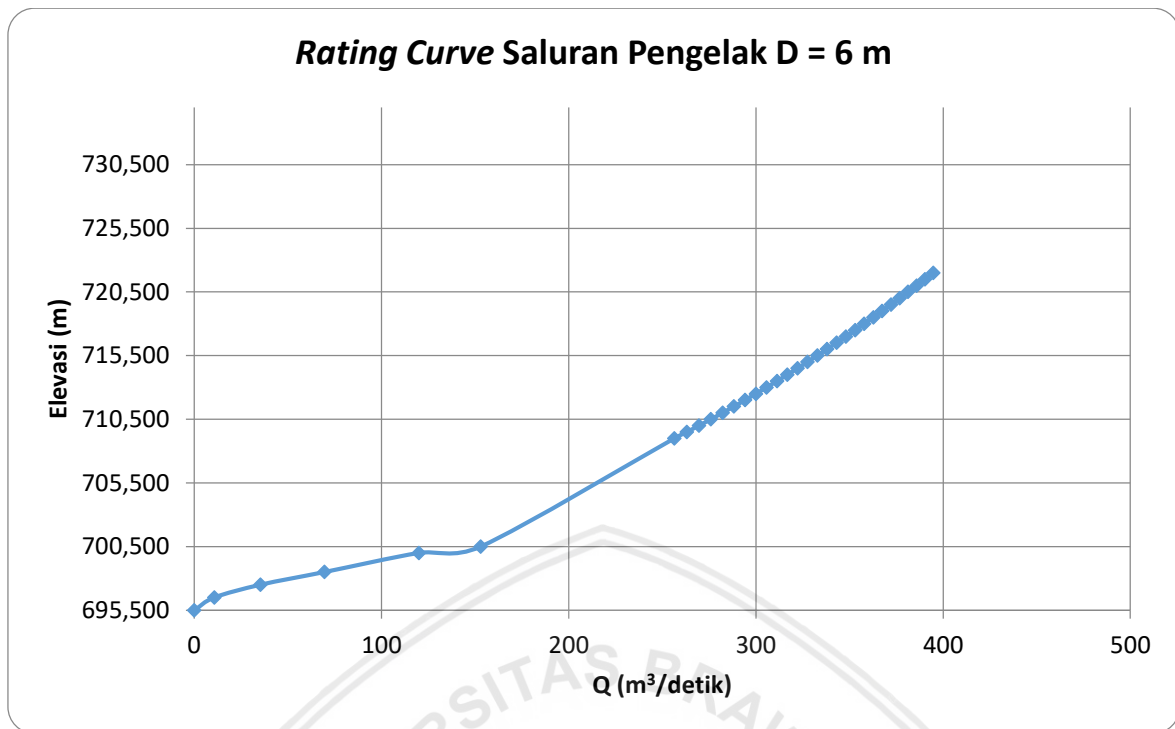
$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (\text{elevasi muka air} - \text{elevasi inlet} - \frac{D}{2} + L \cdot \sin\theta)}{(1 + \sum c)}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot (706,5 - 695,5 - 3 + 3,5)}{(1 + 1,525)}}$$

$$v = 8,591 \text{ m/dt}$$

4. Menghitung nilai Q, menggunakan rumus kontinuitas

$$\begin{aligned} Q &= v \cdot A \\ &= 8,591 \cdot 67,1733 \\ &= 256,486 \text{ m}^3/\text{dt} \end{aligned}$$



Gambar 4.6 Grafik Perhitungan *Rating Curve* Saluran Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 6 m)

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.6

Hubungan Antara H, Q, Psi dan Phi Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 6 m)

Elevasi (m)	H (m)	S tampa- ngan) (m ³)	ΔS (m ³)	$\Delta S/\Delta t$ (m ³ /detik)	Q (m ³ /detik)	Q/2 (m ³ /detik)	Psi $y = \Delta S/\Delta t -$ Q/2 (m ³ /detik)	Phi $\phi = \Delta S/\Delta t$ + Q/2 (m ³ /detik)
695,5	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
696,0	0,5	196943,0	196943,0	54,706	5,334	2,667	52,040	57,373
697,0	1,5	276388,0	276388,0	76,774	23,010	11,505	65,269	88,280
698,0	2,5	340253,0	340253,0	94,515	52,487	26,243	68,271	120,758
699,0	3,5	393288,0	393288,0	109,247	86,408	43,204	66,043	152,450
700,0	4,5	426849,9	426849,9	118,569	119,982	59,991	58,578	178,561
701,0	5,5	482620,3	482620,3	134,061	159,097	79,549	54,513	213,610
702,0	6,5	565839,3	565839,3	157,178	171,271	85,635	71,542	242,813
703,0	7,5	627748,3	627748,3	174,375	183,445	91,722	82,652	266,097
704,0	8,5	682868,3	682868,3	189,686	195,618	97,809	91,877	287,495
705,0	9,5	741773,8	741773,8	206,048	207,792	103,896	102,152	309,944
706,0	10,5	799457,3	799457,3	222,071	219,965	109,983	112,089	332,054
707,0	11,5	844477,3	844477,3	234,577	232,139	116,070	118,508	350,647
708,0	12,5	874532,3	874532,3	242,926	244,313	122,156	120,769	365,082
709,0	13,5	902884,8	902884,8	250,801	256,486	128,243	122,558	379,044
710,0	14,5	934631,8	934631,8	259,620	269,648	134,824	124,796	394,444
711,0	15,5	970255,8	970255,8	269,516	282,196	141,098	128,417	410,614

Lanjutan Tabel 4.6

Hubungan Antara H, Q, Psi dan Phi Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 6 m)

Elevasi (m)	H (m)	S (tampungang) (m ³)	ΔS (m ³)	$\Delta S/\Delta t$ (m ³ /detik)	Q (m ³ /detik)	Q/2 (m ³ /detik)	Psi $y = \Delta S/\Delta t - Q/2$ (m ³ /detik)	Phi $\varphi = \Delta S/\Delta t + Q/2$ (m ³ /detik)
712	16,5	1008836,3	1008836,3	280,232	343,105	171,552	108,680	451,785
713	17,5	1051243,3	1051243,3	292,012	353,052	176,526	115,486	468,538
714	18,5	1095500,8	1095500,8	304,306	362,726	181,363	122,943	485,669
715	19,5	1137559,8	1137559,8	315,989	372,149	186,075	129,914	502,064
716	20,5	1178594,3	1178594,3	327,387	381,340	190,670	136,717	518,057
717	21,5	1220798,8	1220798,8	339,111	390,314	195,157	143,954	534,268
718	22,5	1263921,8	1263921,8	351,089	399,086	199,543	151,546	550,632
719	23,5	1307705,8	1307705,8	363,252	407,669	203,835	159,417	567,086
720	24,5	1352320,8	1352320,8	375,645	416,076	208,038	167,607	583,683
721	25,5	1397934,3	1397934,3	388,315	424,316	212,158	176,157	600,473
722	26,5	1443335,3	1443335,3	400,926	432,399	216,199	184,727	617,126
723	27,5	1488022,3	1488022,3	413,340	440,333	220,167	193,173	633,506
724	28,5	1532709,3	1532709,3	425,753	448,127	224,064	201,689	649,816
725	29,5	1577396,3	1577396,3	438,166	455,788	227,894	210,272	666,060
726	30,5	1622083,3	1622083,3	450,579	463,322	231,661	218,918	682,240
727	31,5	1666770,3	1666770,3	462,992	470,736	235,368	227,624	698,360
728	32,5	1711457,3	1711457,3	475,405	478,035	239,017	236,388	714,422
729	33,5	1756144,3	1756144,3	487,818	485,224	242,612	245,206	730,430
730	34,5	1800831,3	1800831,3	500,231	492,307	246,154	254,077	746,385
731	35,5	1845518,3	1845518,3	512,644	499,291	249,645	262,999	762,289
732	36,5	1890205,3	1890205,3	525,057	506,178	253,089	271,968	778,146

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.7

Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 6 m)

T (jam)	Inflow (I) (m ³ /det)	$(I_1+I_2)/2$ (m ³ /det)	ψ_1 (m ³ /det)	φ_2 (m ³ /det)	Outflow (Q) (m ³ /det)	h (m)	Elevasi (m)
1	6,7	0,000	0,000	0,000	6,700	0,577	696,077
2	32,6	19,650	53,062	72,712	14,107	1,825	697,325
3	135,0	83,800	58,606	142,406	75,656	4,855	700,355
4	295,4	215,200	66,749	281,949	205,472	12,643	708,143
5	457,5	376,450	76,477	452,927	343,783	0,000	695,500
6	583,1	520,300	109,144	629,444	438,365	0,000	695,500
7	664,9	624,000	191,079	815,079	0,000	0,000	695,500
8	704,2	684,550	0,000	684,550	0,000	0,000	695,500
9	709,3	706,750	0,000	706,750	0,000	0,000	695,500
10	691,3	700,300	0,000	700,300	-3,000	0,000	695,500

Lanjutan Tabel 4.7
 Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 6 m)

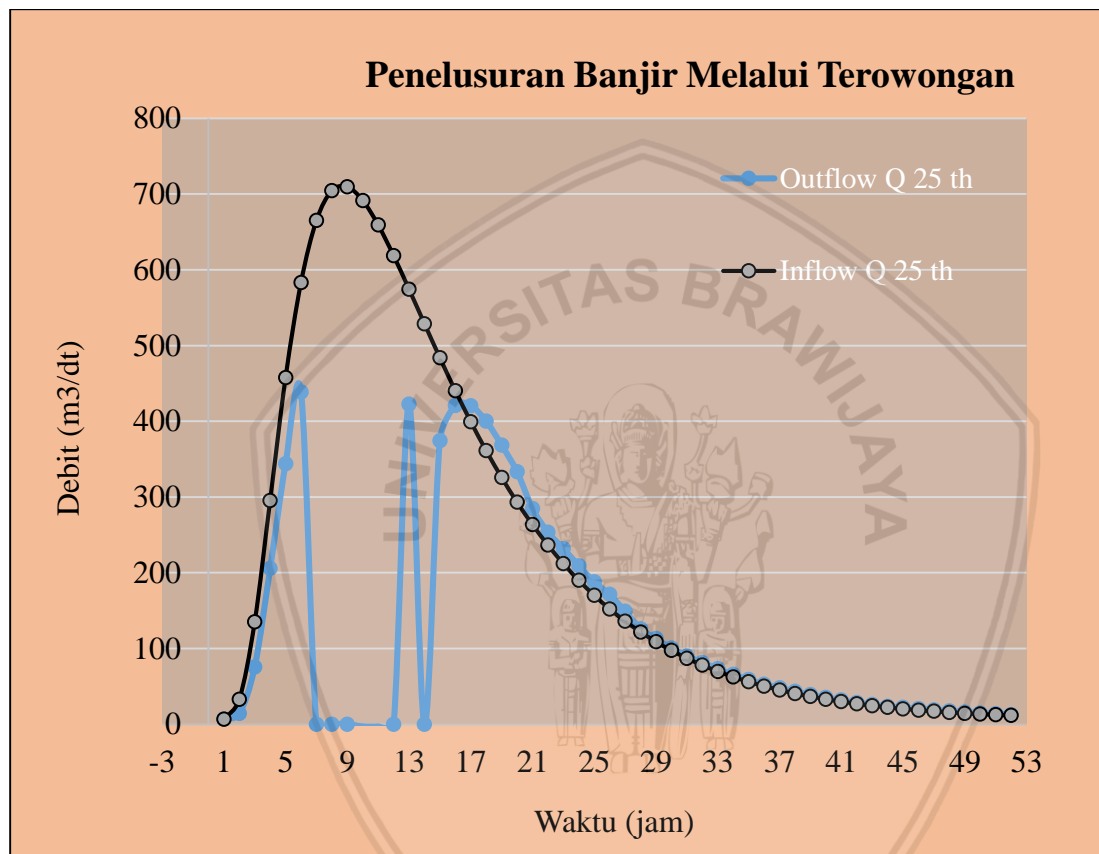
T (jam)	Inflow (I) (m ³ /det)	(I ₁ +I ₂)/2 (m ³ /det)	ψ_1 (m ³ /det)	φ_2 (m ³ /det)	Outflow (Q) (m ³ /det)	h (m)	Elevasi (m)
11	659,0	675,150	0,000	675,150	-3,000	0,000	695,500
12	618,5	638,750	0,000	638,750	0,000	0,000	695,500
13	574,2	596,350	0,000	596,350	422,292	0,000	695,500
14	528,6	551,400	174,058	725,458	0,000	0,000	695,500
15	483,6	506,100	0,000	506,100	374,469	0,000	695,500
16	440,2	461,900	131,631	593,531	420,909	27,483	722,983
17	399,3	419,750	172,622	592,372	420,340	22,525	718,025
18	361,0	380,150	172,032	552,182	399,894	18,322	713,822
19	325,6	343,300	152,288	495,588	368,427	14,813	710,313
20	293,1	309,350	127,160	436,510	333,226	12,520	708,020
21	263,4	278,250	103,285	381,535	284,551	10,925	706,425
22	236,4	249,900	96,984	346,884	253,323	9,476	704,976
23	211,9	224,150	93,560	317,710	231,939	8,161	703,661
24	189,9	200,900	85,771	286,671	209,044	6,980	702,480
25	170,0	179,950	77,627	257,577	187,927	5,912	701,412
26	152,1	161,050	69,650	230,700	171,215	5,259	700,759
27	136,0	144,050	59,485	203,535	148,825	4,878	700,378
28	121,7	128,850	54,709	183,559	125,756	4,541	700,041
29	108,8	115,250	57,804	173,054	112,901	4,167	699,667
30	97,3	103,050	60,153	163,203	100,234	3,824	699,324
31	87,1	92,200	62,969	155,169	89,903	3,521	699,021
32	77,9	82,500	65,266	147,766	81,393	3,249	698,749
33	69,7	73,800	66,372	140,172	73,266	3,007	698,507
34	62,5	66,100	66,906	133,006	65,596	2,795	698,295
35	56,0	59,250	67,410	126,660	58,804	2,604	698,104
36	50,3	53,150	67,856	121,006	52,752	2,426	697,926
37	45,2	47,750	68,254	116,004	48,172	2,253	697,753
38	40,6	42,900	67,832	110,732	43,387	2,097	697,597
39	36,6	38,600	67,345	105,945	39,042	1,961	697,461
40	33,0	34,800	66,902	101,702	35,192	1,839	697,339
41	29,8	31,400	66,510	97,910	31,751	1,730	697,230
42	27,0	28,400	66,159	94,559	28,710	1,635	697,135
43	24,5	25,750	65,850	91,600	26,024	1,551	697,051
44	22,2	23,350	65,576	88,926	23,597	1,454	696,954
45	20,3	21,250	65,329	86,579	22,038	1,347	696,847
46	18,5	19,400	64,541	83,941	20,529	1,245	696,745
47	17,0	17,750	63,412	81,162	18,940	1,160	696,660
48	15,6	16,300	62,223	78,523	17,430	1,081	696,581
49	14,4	15,000	61,093	76,093	16,040	1,013	696,513

Lanjutan Tabel 4.7

Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 6 m)

T (jam)	Inflow (I) (m ³ /det)	(I ₁ +I ₂)/2 (m ³ /det)	ψ_1 (m ³ /det)	φ_2 (m ³ /det)	Outflow (Q) (m ³ /det)	h (m)	Elevasi (m)
50	13,3	13,850	60,053	73,903	14,788	0,951	696,451
51	12,4	12,850	59,115	71,965	13,679	0,900	696,400
52	11,5	11,950	58,286	70,236	12,690	0,849	696,349

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.7 Grafik Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 6 m)

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Dari grafik hasil penelusuran banjir dengan menggunakan diameter 6 m dapat dilihat bahwa kapasitas tampungan waduk hingga elevasi tertinggi (+732) tidak dapat menampung debit banjir rancangan (Q_{25th}) sehingga perlu dilakukan penelusuran banjir menggunakan diameter terowongan yang lebih besar.

4.4.2 Perhitungan Penelusuran Banjir Dengan Diameter Terowongan 7 m

Pada kondisi ini, air yang berada di inlet terowongan belum memenuhi terowongan. Atau dapat dikatakan tinggi air < tinggi terowongan. Dalam perhitungan aliran bebas dihitung hingga tinggi air < 1,2D. Perhitungan hidrolika aliran bebas adalah sebagai berikut:

Tabel 4.8

Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Bebas $h < 1,2$ Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 7 m)

El.	Tinggi	A	P	R	v	Q	F	
MA	MA							
(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m/detik)	(m ³ /detik)	Nilai	Keterangan
696,0	0,5	1,748	5,332	0,328	4,526	7,912	1,376	superkritis
696,5	1,0	4,654	6,763	0,688	7,421	34,541	1,495	superkritis
697,0	1,5	7,781	7,817	0,995	9,492	73,856	1,520	superkritis
697,5	2,0	11,056	8,852	1,249	11,042	122,078	1,513	superkritis
698,0	2,5	14,442	9,864	1,464	12,276	177,285	1,491	superkritis
698,5	3,0	17,899	10,876	1,646	13,272	237,549	1,460	superkritis
699,0	3,5	21,393	11,873	1,802	14,098	301,595	1,422	superkritis
699,5	4,0	24,883	12,877	1,932	14,770	367,528	1,374	superkritis
700,0	4,5	28,305	13,909	2,035	15,289	432,762	1,313	superkritis
700,5	5,0	31,564	14,992	2,105	15,640	493,648	1,234	superkritis
701,0	5,5	34,588	16,136	2,144	15,828	547,477	1,137	superkritis
701,5	6,0	37,263	17,444	2,136	15,792	588,455	1,009	superkritis

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Contoh perhitungan: (pada elevasi 696)

1. Nilai A, P, dan R didapat dengan interpolasi pada tabel 4.1 dan 4.2.
2. Menghitung nilai v, menggunakan rumus manning

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \\
 &= \frac{1}{0,014} \cdot 0,328^{2/3} \cdot 0,038^{1/2} \\
 &= 4,526 \text{ m/dt}
 \end{aligned}$$

3. Menghitung nilai Q, menggunakan rumus kontinuitas

$$\begin{aligned}
 Q &= v \cdot A \\
 &= 4,526 \cdot 1,748 = 7,912 \text{ m}^3/\text{dt}
 \end{aligned}$$

4. Menghitung nilai F

$$F = 1,376 \sim \text{aliran superkritis}$$

Karena slope saluran termasuk dalam kategori terjal (*steep slope*), maka akan terjadi aliran super kritis, sehingga rumus aliran seragam Manning tidak berlaku. Perhitungan kapasitas aliran dengan titik kontrol hidrolis di inlet terowongan dihitung dengan rumus aliran kritis sebagai berikut :

Tabel 4.9
Perhitungan Debit pada Saat Kondisi Kritis (Diameter Terowongan Pengelak 7 m)

El. MA (m)	Tinggi MA (m)	A (m ²)	v_c (m/dt)	Q_c (m ³ /dt)
696,0	0,5	1,748	1,8083141	3,16075
696,5	1,0	4,654	2,5573424	11,9026
697,0	1,5	7,781	3,1320920	24,3714
697,5	2,0	11,056	3,6166283	39,9847
698,0	2,5	14,442	4,0435133	58,3952
698,5	3,0	17,899	4,4294469	79,2827
699,0	3,5	21,393	4,7843495	102,354
699,5	4,0	24,883	5,1146847	127,268
700,0	4,5	28,305	5,4249424	153,554
700,5	5,0	31,564	5,7183914	180,494
701,0	5,5	34,588	5,9974995	207,444
701,5	6,0	37,263	6,2641839	233,423

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

$$V_c = (g Y_c)^{1/2}$$

$$= 1,808 \text{ m/dt}$$

$$Q_c = A \cdot V_c$$

$$= 3,1608 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Pada kondisi ini terowongan terisi penuh. Debit yang masuk tergantung pada tinggi muka air di bagian pemasukan.

Tabel 4.10
Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$ Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 7 m)

El. MA (m)	Tinggi MA (m)	$L \sin\theta$ m	A (m ²)	R (m)	$\sum c$	v (m/detik)	Q (m ³ /detik)
706,0	10,5	3,5	40,636	1,777	1,52173	9,038	367,284
706,5	11,0	3,5	40,636	1,777	1,52173	9,251	375,927
707,0	11,5	3,5	40,636	1,777	1,52173	9,459	384,376
707,5	12,0	3,5	40,636	1,777	1,52173	9,663	392,643
708,0	12,5	3,5	40,636	1,777	1,52173	9,862	400,740
708,5	13,0	3,5	40,636	1,777	1,52173	10,057	408,676
709,0	13,5	3,5	40,636	1,777	1,52173	10,249	416,461
709,5	14,0	3,5	40,636	1,777	1,52173	10,437	424,103

Lanjutan Tabel 4.10

Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$ Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 7 m)

El. MA	Tinggi MA	L sin θ	A	R	$\sum c$	v	Q
(m)	(m)	m	(m ²)	(m)		(m/detik)	(m ³ /detik)
710,0	14,5	3,5	40,636	1,777	1,522	10,621	431,610
710,5	15,0	3,5	40,636	1,777	1,522	10,803	438,989
711,0	15,5	3,5	40,636	1,777	1,522	10,982	446,245
711,5	16,0	3,5	40,636	1,777	1,522	11,157	453,386
712,0	16,5	3,5	40,636	1,777	1,522	11,330	460,415
712,5	17,0	3,5	40,636	1,777	1,522	11,501	467,339
713,0	17,5	3,5	40,636	1,777	1,522	11,669	474,162
713,5	18,0	3,5	40,636	1,777	1,522	11,834	480,888
714,0	18,5	3,5	40,636	1,777	1,522	11,997	487,521
714,5	19,0	3,5	40,636	1,777	1,522	12,158	494,065
715,0	19,5	3,5	40,636	1,777	1,522	12,317	500,524
715,5	20,0	3,5	40,636	1,777	1,522	12,474	506,900
716,0	20,5	3,5	40,636	1,777	1,522	12,629	513,198
716,5	21,0	3,5	40,636	1,777	1,522	12,782	519,418
717,0	21,5	3,5	40,636	1,777	1,522	12,934	525,566
717,5	22,0	3,5	40,636	1,777	1,522	13,083	531,642
718,0	22,5	3,5	40,636	1,777	1,522	13,231	537,649
718,5	23,0	3,5	40,636	1,777	1,522	13,377	543,590
719,0	23,5	3,5	40,636	1,777	1,522	13,522	549,467
719,5	24,0	3,5	40,636	1,777	1,522	13,665	555,282
720,0	24,5	3,5	40,636	1,777	1,522	13,806	561,036
720,5	25,0	3,5	40,636	1,777	1,522	13,947	566,732
721,0	25,5	3,5	40,636	1,777	1,522	14,085	572,371
721,5	26,0	3,5	40,636	1,777	1,522	14,223	577,955
722,0	26,5	3,5	40,636	1,777	1,522	14,359	583,486
722,5	27,0	3,5	40,636	1,777	1,521	14,494	588,965
723,0	27,5	3,5	40,636	1,777	1,521	14,627	594,393
723,5	28,0	3,5	40,636	1,777	1,521	14,760	599,773
724,0	28,5	3,5	40,636	1,777	1,521	14,891	605,104
724,5	29,0	3,5	40,636	1,777	1,521	15,021	610,389
725,0	29,5	3,5	40,636	1,777	1,521	15,150	615,628
725,5	30,0	3,5	40,636	1,777	1,521	15,278	620,824
726,0	30,5	3,5	40,636	1,777	1,521	15,405	625,976
726,5	31,0	3,5	40,636	1,777	1,521	15,530	631,086
727,0	31,5	3,5	40,636	1,777	1,521	15,655	636,155
727,5	32,0	3,5	40,636	1,777	1,521	15,779	641,184
728,0	32,5	3,5	40,636	1,777	1,521	15,902	646,174
728,5	33,0	3,5	40,636	1,777	1,521	16,023	651,125
729,0	33,5	3,5	40,636	1,777	1,521	16,144	656,040

Lanjutan Tabel 4.10

Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$ Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 7 m)

El. MA (m)	Tinggi MA (m)	L sin θ (m)	A (m ²)	R (m)	$\sum c$	v (m/detik)	Q (m ³ /detik)
729,5	34,0	3,5	40,6357	1,7766	1,521734	16,2644	660,917
730,0	34,5	3,5	40,6357	1,7766	1,521734	16,3836	665,759
730,5	35,0	3,5	40,6357	1,7766	1,521734	16,5019	670,566
731,0	35,5	3,5	40,6357	1,7766	1,521734	16,6193	675,339
731,5	36,0	3,5	40,6357	1,7766	1,521734	16,7359	680,078
732,0	36,5	3,5	40,6357	1,7766	1,521734	16,8518	684,784

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Contoh perhitungan: (pada elevasi 706)

5. Nilai A, dan R didapat dengan interpolasi pada tabel 4.1 dan 4.2.

6. Menghitung koefisien hambatan

- Koefisien pada outlet (Co)

$$C_o = 1$$

- Koefisien gesekan (Cf)

$$C_v = n^2 \cdot L \cdot R^{4/3}$$

$$= 0,02 \cdot 197 / 1,777^{4/3}$$

$$= 0,98$$

- Koefisien inlet (Ci)

$$C_i = 0,5$$

- Sehingga $\sum C = C_i + C_o + C_f = 1,522$

7. Menghitung nilai v

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (\text{elevasi muka air} - \text{elevasi inlet} - \frac{D}{2} + L \cdot \sin\theta)}{(1 + \sum c)}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot (706,5 - 695,5 - 3,5 + 3,5)}{(1 + 1,522)}}$$

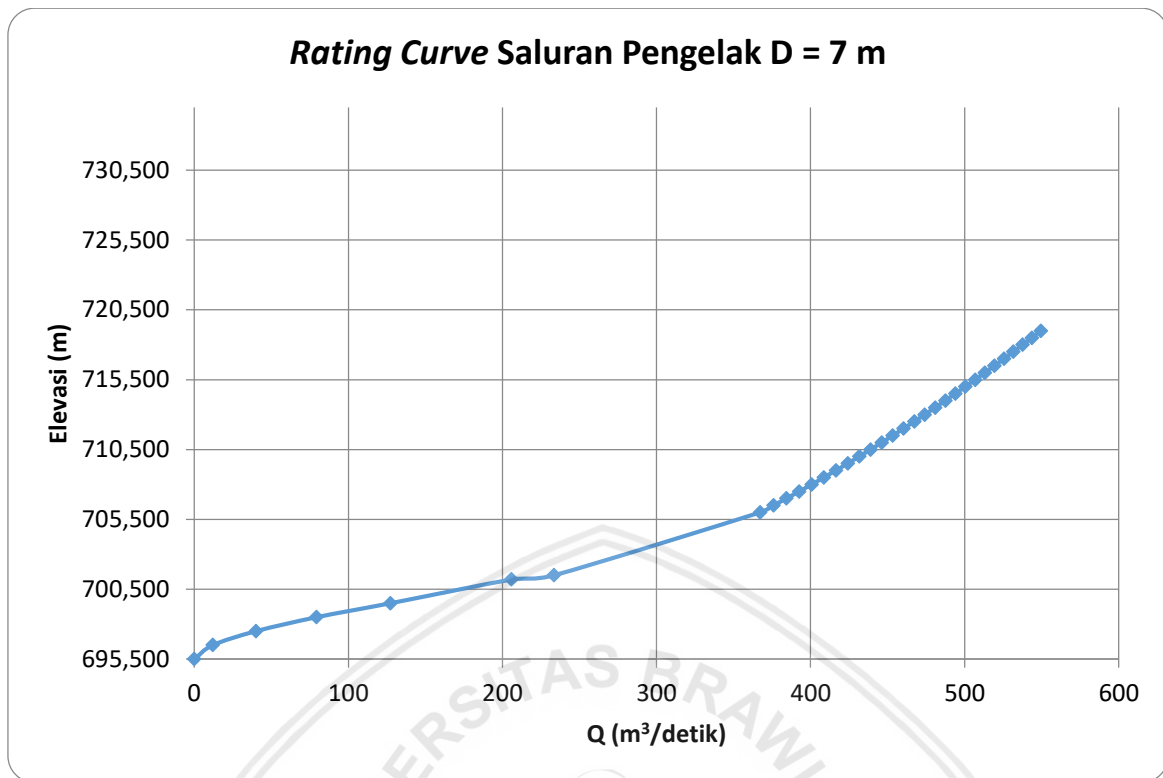
$$v = 9,038 \text{ m/dt}$$

8. Menghitung nilai Q, menggunakan rumus kontinuitas

$$Q = v \cdot A$$

$$= 9,038 \cdot 40,636$$

$$= 367,284 \text{ m}^3/\text{dt}$$



Gambar 4.8 Grafik Perhitungan *Rating Curve* Saluran Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 7 m)

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.11

Hubungan Antara H, Q, Psi dan Phi (Diameter Terowongan Pengelak 7 m)

Elevasi (m)	H (m)	S tampung- ngan) (m³)	ΔS (m³)	$\Delta S/\Delta t$ (m³/detik)	Q (m³/detik)	Q/2 (m³/detik)	Psi $y = \Delta S/\Delta t$ - Q/2 (m³/detik)	Phi $\phi = \Delta S/\Delta t$ + Q/2 (m³/detik)
695,5	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
696,0	0,5	196943,0	196943,0	54,706	5,951	2,976	51,731	57,682
697,0	1,5	276388,0	276388,0	76,774	25,944	12,972	63,803	89,746
698,0	2,5	340253,0	340253,0	94,515	59,634	29,817	64,698	124,332
699,0	3,5	393288,0	393288,0	109,247	103,275	51,638	57,609	160,884
700,0	4,5	426849,9	426849,9	118,569	150,376	75,188	43,381	193,758
701,0	5,5	482620,3	482620,3	134,061	196,592	98,296	35,765	232,357
702,0	6,5	565839,3	565839,3	157,178	248,296	124,148	33,029	281,326
703,0	7,5	627748,3	627748,3	174,375	278,043	139,022	35,353	313,396
704,0	8,5	682868,3	682868,3	189,686	307,790	153,895	35,790	343,581
705,0	9,5	741773,8	741773,8	206,048	337,537	168,769	37,280	374,817
706,0	10,5	799457,3	799457,3	222,071	367,284	183,642	38,429	405,714
707,0	11,5	844477,3	844477,3	234,577	384,376	192,188	42,389	426,765
708,0	12,5	874532,3	874532,3	242,926	400,740	200,370	42,556	443,296
709,0	13,5	902884,8	902884,8	250,801	416,461	208,231	42,571	459,032

Lanjutan Tabel 4.11

Hubungan Antara H, Q, Psi dan Phi (Diameter Terowongan Pengelak 7 m)

Elevasi (m)	H (m)	S (tampungan) (m ³)	ΔS (m ³)	$\Delta S/\Delta t$ (m ³ /detik)	Q (m ³ /detik)	Q/2 (m ³ /detik)	Psi	Phi
							$y = \Delta S/\Delta t - Q/2$ (m ³ /detik)	$\phi = \Delta S/\Delta t + Q/2$ (m ³ /detik)
710	14,5	934631,8	934631,8	259,620	431,610	215,805	43,815	475,425
711	15,5	970255,8	970255,8	269,516	446,245	223,123	46,393	492,638
712	16,5	1008836,3	1008836,3	280,232	460,415	230,208	50,025	510,440
713	17,5	1051243,3	1051243,3	292,012	474,162	237,081	54,931	529,093
714	18,5	1095500,8	1095500,8	304,306	487,521	243,761	60,545	548,066
715	19,5	1137559,8	1137559,8	315,989	500,524	250,262	65,727	566,251
716	20,5	1178594,3	1178594,3	327,387	513,198	256,599	70,789	583,986
717	21,5	1220798,8	1220798,8	339,111	525,566	262,783	76,328	601,894
718	22,5	1263921,8	1263921,8	351,089	537,649	268,825	82,265	619,914
719	23,5	1307705,8	1307705,8	363,252	549,467	274,733	88,518	637,985
720	24,5	1352320,8	1352320,8	375,645	561,036	280,518	95,127	656,163
721	25,5	1397934,3	1397934,3	388,315	572,371	286,186	102,130	674,501
722	26,5	1443335,3	1443335,3	400,926	583,486	291,743	109,183	692,670
723	27,5	1488022,3	1488022,3	413,340	594,393	297,197	116,143	710,536
724	28,5	1532709,3	1532709,3	425,753	605,104	302,552	123,201	728,305
725	29,5	1577396,3	1577396,3	438,166	615,628	307,814	130,351	745,980
726	30,5	1622083,3	1622083,3	450,579	625,976	312,988	137,591	763,567
727	31,5	1666770,3	1666770,3	462,992	636,155	318,077	144,914	781,069
728	32,5	1711457,3	1711457,3	475,405	646,174	323,087	152,318	798,492
729	33,5	1756144,3	1756144,3	487,818	656,040	328,020	159,798	815,838
730	34,5	1800831,3	1800831,3	500,231	665,759	332,880	167,351	833,111
731	35,5	1845518,3	1845518,3	512,644	675,339	337,669	174,974	850,313
732	36,5	1890205,3	1890205,3	525,057	684,785	342,392	182,665	867,449

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.12

Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 7 m)

T (jam)	Inflow (I) (m ³ /det)	$(I_1+I_2)/2$ (m ³ /det)	ψ_1 (m ³ /det)	ϕ_2 (m ³ /det)	Outflow (Q) (m ³ /det)	h (m)	Elevasi (m)
1	6,7	0,000	0,000	0,000	6,700	0,537	696,037
2	32,6	19,650	52,183	71,833	14,774	1,698	697,198
3	135,0	83,800	57,058	140,858	79,366	4,174	699,674
4	295,4	215,200	61,493	276,693	243,405	8,083	703,583
5	457,5	376,450	33,288	409,738	370,552	16,294	711,794
6	583,1	520,300	39,186	559,486	495,687	26,465	721,965
7	664,9	624,000	63,799	687,799	580,507	0,000	695,500
8	704,2	684,550	107,293	791,843	0,000	0,000	695,500
9	709,3	706,750	0,000	706,750	592,082	0,000	695,500
10	691,3	700,300	114,668	814,968	0,000	0,000	695,500

Lanjutan Tabel 4.12

Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 7 m)

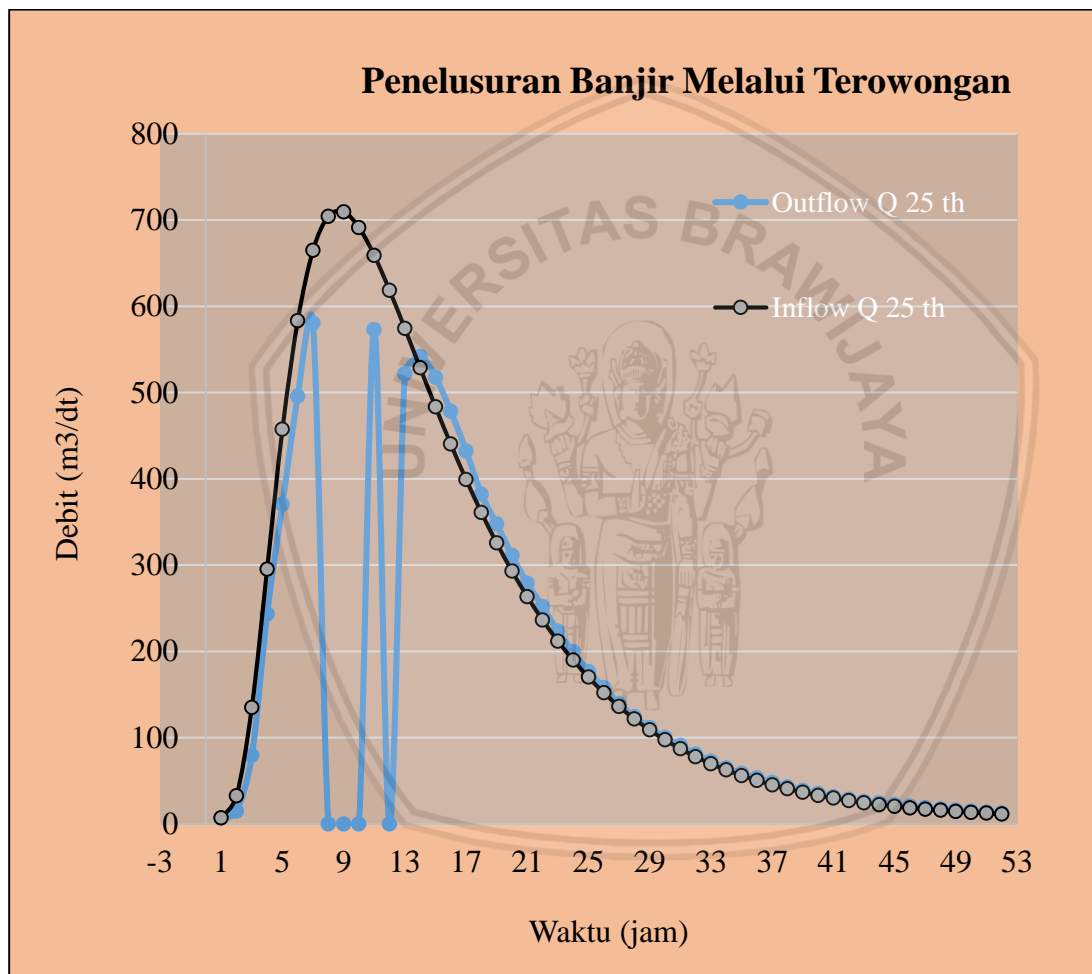
T	Inflow (I)	$(I_1+I_2)/2$	ψ_1	φ_2	Outflow (Q)	h	Elevasi
(jam)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m)	(m)
11	659,0	675,150	0,000	675,150	572,768	0,000	695,500
12	618,5	638,750	102,382	741,132	0,000	0,000	695,500
13	574,2	596,350	0,000	596,350	521,737	25,665	721,165
14	528,6	551,400	74,613	626,013	541,638	21,751	717,251
15	483,6	506,100	84,375	590,475	517,679	18,206	713,706
16	440,2	461,900	72,796	534,696	478,107	15,087	710,587
17	399,3	419,750	56,589	476,339	432,387	12,412	707,912
18	361,0	380,150	43,952	424,102	382,214	10,289	705,789
19	325,6	343,300	41,888	385,188	347,522	9,099	704,599
20	293,1	309,350	37,666	347,016	311,061	8,006	703,506
21	263,4	278,250	35,954	314,204	278,840	7,008	702,508
22	236,4	249,900	35,365	285,265	251,950	6,270	701,770
23	211,9	224,150	33,315	257,465	223,102	5,796	701,296
24	189,9	200,900	34,362	235,262	199,660	5,355	700,855
25	170,0	179,950	35,603	215,553	176,472	4,925	700,425
26	152,1	161,050	39,081	200,131	158,007	4,537	700,037
27	136,0	144,050	42,124	186,174	139,510	4,195	699,695
28	121,7	128,850	46,664	175,514	124,236	3,891	699,391
29	108,8	115,250	51,277	166,527	111,361	3,617	699,117
30	97,3	103,050	55,167	158,217	100,090	3,363	698,863
31	87,1	92,200	58,126	150,326	90,670	3,129	698,629
32	77,9	82,500	59,657	142,157	80,916	2,919	698,419
33	69,7	73,800	61,241	135,041	72,420	2,731	698,231
34	62,5	66,100	62,621	128,721	64,874	2,566	698,066
35	56,0	59,250	63,847	123,097	58,431	2,392	697,892
36	50,3	53,150	64,666	117,816	53,287	2,223	697,723
37	45,2	47,750	64,529	112,279	47,893	2,072	697,572
38	40,6	42,900	64,386	107,286	43,029	1,935	697,435
39	36,6	38,600	64,257	102,857	38,715	1,816	697,316
40	33,0	34,800	64,142	98,942	34,901	1,709	697,209
41	29,8	31,400	64,041	95,441	31,491	1,614	697,114
42	27,0	28,400	63,950	92,350	28,480	1,531	697,031
43	24,5	25,750	63,870	89,620	25,865	1,428	696,928
44	22,2	23,350	63,755	87,105	24,297	1,313	696,813
45	20,3	21,250	62,808	84,058	22,397	1,218	696,718
46	18,5	19,400	61,661	81,061	20,528	1,128	696,628
47	17,0	17,750	60,533	78,283	18,796	1,053	696,553
48	15,6	16,300	59,487	75,787	17,240	0,983	696,483
49	14,4	15,000	58,547	73,547	15,843	0,923	696,423

Lanjutan Tabel 4.12

Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 7 m)

T (jam)	Inflow (I) (m ³ /det)	(I ₁ +I ₂)/2 (m ³ /det)	ψ_1 (m ³ /det)	φ_2 (m ³ /det)	Outflow (Q) (m ³ /det)	h (m)	Elevasi (m)
50	13,3	13,850	57,704	71,554	14,600	0,868	696,368
51	12,4	12,850	56,953	69,803	13,509	0,823	696,323
52	11,5	11,950	56,294	68,244	12,537	0,778	696,278

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.9 Grafik Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 7 m)

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Dari grafik hasil penelusuran banjir dengan menggunakan diameter 7 m dapat dilihat bahwa kapasitas tampungan waduk hingga elevasi tertinggi (+732) tidak dapat menampung debit banjir rancangan (Q_{25th}) sehingga perlu dilakukan penelusuran banjir menggunakan diameter terowongan yang lebih besar.

4.4.3 Perhitungan Penelusuran Banjir Dengan Diameter Terowongan 8 m

Pada kondisi ini, air yang berada di inlet terowongan belum memenuhi terowongan. Atau dapat dikatakan tinggi air < tinggi terowongan. Dalam perhitungan aliran bebas dihitung hingga tinggi air < 1,2D. Perhitungan hidrolika aliran bebas adalah sebagai berikut:

Tabel 4.13

Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Bebas $h < 1,2$ Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 8 m)

El.	Tinggi	A	P	R	v	Q	F	
MA	MA							
(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m/detik)	(m ³ /detik)	Nilai	Keterangan
696,0	0,5	1,874	6,833	0,274	4,018	7,529	1,222	Superkritis
696,5	1,0	5,126	1,311	3,909	23,626	121,119	4,850	Superkritis
697,0	1,5	8,317	8,205	1,014	9,607	79,899	1,497	Superkritis
697,5	2,0	12,282	9,529	1,289	11,275	138,479	1,553	Superkritis
698,0	2,5	16,085	10,550	1,525	12,612	202,858	1,540	Superkritis
698,5	3,0	19,987	11,559	1,729	13,716	274,150	1,518	Superkritis
699,0	3,5	23,949	12,570	1,905	14,632	350,416	1,488	Superkritis
699,5	4,0	27,942	13,570	2,059	15,410	430,595	1,454	Superkritis
700,0	4,5	31,886	14,552	2,191	16,062	512,153	1,410	Superkritis
700,5	5,0	35,859	15,596	2,299	16,585	594,737	1,359	Superkritis
701,0	5,5	39,653	16,647	2,382	16,981	673,351	1,295	Superkritis
701,5	6,0	43,251	17,761	2,435	17,233	745,351	1,216	Superkritis
702,0	6,5	46,550	22,927	2,030	15,266	710,642	1,059	Superkritis
702,5	7,0	49,446	20,352	2,430	17,207	850,806	1,016	Superkritis

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Contoh perhitungan: (pada elevasi 696)

1. Nilai A, P, dan R didapat dengan interpolasi pada tabel 4.1 dan 4.2.

2. Menghitung nilai v, menggunakan rumus manning

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \\
 &= \frac{1}{0,014} \cdot 0,274^{2/3} \cdot 0,038^{1/2} \\
 &= 4,018 \text{ m/dt}
 \end{aligned}$$

3. Menghitung nilai Q, menggunakan rumus kontinuitas

$$\begin{aligned}
 Q &= v \cdot A \\
 &= 4,018 \cdot 1,958 = 7,529 \text{ m}^3/\text{dt}
 \end{aligned}$$

4. Menghitung nilai F

$$F = 1,222 \sim \text{aliran superkritis}$$

Karena slope saluran termasuk dalam kategori terjal (*steep slope*), maka akan terjadi aliran super kritis, sehingga rumus aliran seragam Manning tidak berlaku. Perhitungan

kapasitas aliran dengan titik kontrol hidrolis di inlet terowongan dihitung dengan rumus aliran kritis sebagai berikut :

Tabel 4.14

Perhitungan Debit pada Saat Kondisi Kritis (Diameter Terowongan Pengelak 8 m)

El. MA (m)	Tinggi MA (m)	A (m ²)	v_c (m/dt)	Q_c (m ³ /dt)
696,0	0,5	1,874	1,808	3,388
696,5	1,0	5,126	2,557	13,110
697,0	1,5	8,317	3,132	26,049
697,5	2,0	12,282	3,617	44,418
698,0	2,5	16,085	4,044	65,039
698,5	3,0	19,987	4,429	88,532
699,0	3,5	23,949	4,784	114,579
699,5	4,0	27,942	5,115	142,917
700,0	4,5	31,886	5,425	172,982
700,5	5,0	35,859	5,718	205,057
701,0	5,5	39,653	5,997	237,818
701,5	6,0	43,251	6,264	270,933
702,0	6,5	46,550	6,520	303,507
702,5	7,0	49,446	6,766	334,559

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

$$V_c = (g Y_c)^{1/2}$$

$$= 1,808 \text{ m/dt}$$

$$Q_c = A \cdot V_c$$

$$= 3,388 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Pada kondisi ini terowongan terisi penuh. Debit yang masuk tergantung pada tinggi muka air di bagian pemasukan. Perhitungannya kondisi aliran tertekan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.15

Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$ Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 8 m)

El. MA (m)	Tinggi MA (m)	$L \sin \theta$ m	A (m ²)	R (m)	$\sum c$	v (m/detik)	Q (m ³ /detik)
707,5	12,0	3,5	53,075	2,030	1,51902	9,464	502,313
708,0	12,5	3,5	53,075	2,030	1,51902	9,668	513,117

Lanjutan Tabel 4.15

Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$ Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 8 m)

El. MA (m)	Tinggi MA (m)	L sin θ m	A (m ²)	R (m)	$\sum c$	v (m/detik)	Q (m ³ /detik)
708,5	13,0	3,5	53,075	2,030	1,519	9,867	523,698
709,0	13,5	3,5	53,075	2,030	1,519	10,062	534,069
709,5	14,0	3,5	53,075	2,030	1,519	10,254	544,243
710,0	14,5	3,5	53,075	2,030	1,519	10,442	554,229
710,5	15,0	3,5	53,075	2,030	1,519	10,627	564,040
711,0	15,5	3,5	53,075	2,030	1,519	10,809	573,682
711,5	16,0	3,5	53,075	2,030	1,519	10,988	583,165
712,0	16,5	3,5	53,075	2,030	1,519	11,163	592,496
712,5	17,0	3,5	53,075	2,030	1,519	11,336	601,683
713,0	17,5	3,5	53,075	2,030	1,519	11,507	610,731
713,5	18,0	3,5	53,075	2,030	1,519	11,675	619,647
714,0	18,5	3,5	53,075	2,030	1,519	11,841	628,437
714,5	19,0	3,5	53,075	2,030	1,519	12,004	637,106
715,0	19,5	3,5	53,075	2,030	1,519	12,165	645,658
715,5	20,0	3,5	53,075	2,030	1,519	12,324	654,098
716,0	20,5	3,5	53,075	2,030	1,519	12,481	662,431
716,5	21,0	3,5	53,075	2,030	1,519	12,636	670,660
717,0	21,5	3,5	53,075	2,030	1,519	12,789	678,790
717,5	22,0	3,5	53,075	2,030	1,519	12,941	686,823
718,0	22,5	3,5	53,075	2,030	1,519	13,090	694,763
718,5	23,0	3,5	53,075	2,030	1,519	13,238	702,614
719,0	23,5	3,5	53,075	2,030	1,519	13,384	710,378
719,5	24,0	3,5	53,075	2,030	1,519	13,529	718,058
720,0	24,5	3,5	53,075	2,030	1,519	13,672	725,657
720,5	25,0	3,5	53,075	2,030	1,519	13,814	733,177
721,0	25,5	3,5	53,075	2,030	1,519	13,954	740,620
721,5	26,0	3,5	53,075	2,030	1,519	14,093	747,990
722,0	26,5	3,5	53,075	2,030	1,519	14,231	755,287

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Contoh perhitungan: (pada elevasi 707,5)

1. Nilai A, dan R didapat dengan interpolasi pada tabel 4.1 dan 4.2.

2. Menghitung koefisien hambatan

- Koefisien pada outlet (Co)

$$Co = 1$$

- Koefisien gesekan (Cf)

$$Cv = n^2 \cdot L \cdot R^{4/3}$$

$$= 0,02 \cdot 197 / 2,03^{4/3}$$

$$= 0,985$$

- Koefisien inlet (C_i)

$$C_i = 0,5$$

- Sehingga $\sum C = C_i + C_o + C_f = 1,519$

3. Menghitung nilai v

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (\text{elevasi muka air} - \text{elevasi inlet} - \frac{D}{2} + L \cdot \sin\theta)}{1 + \sum c}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot (706,5 - 695,5 - 4 + 3,5)}{1 + 1,519}}$$

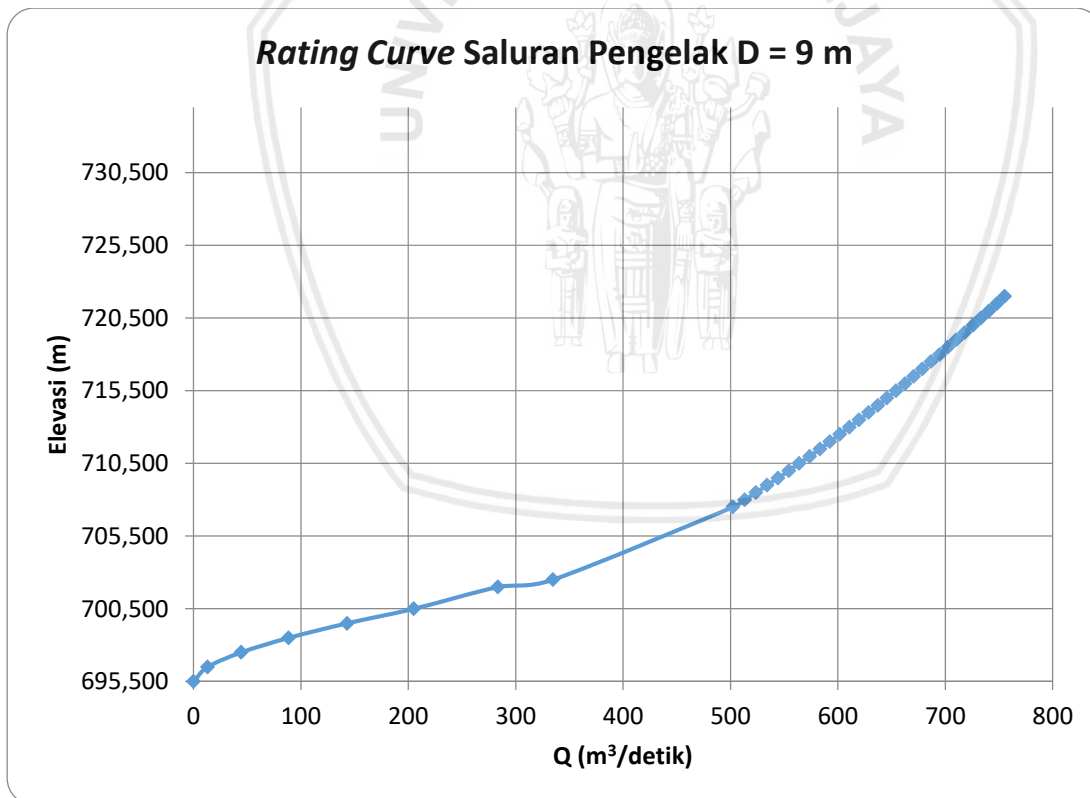
$$v = 9,464 \text{ m/dt}$$

4. Menghitung nilai Q , menggunakan rumus kontinuitas

$$Q = v \cdot A$$

$$= 9,464 \cdot 53,075$$

$$= 502,313 \text{ m}^3/\text{dt}$$



Gambar 4.10 Grafik Perhitungan *Rating Curve* Saluran Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 8 m)

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.16
Hubungan Antara H, Q, Psi dan Phi Terowongan Pengelak

Elevasi	H	S tampu- ngan)	ΔS	$\Delta S/\Delta t$	Q	Q/2	Psi $y = \Delta S/\Delta t$ $- Q/2$	Phi $\phi = \Delta S/\Delta t$ $+ Q/2$
(m)	(m)	(m ³)	(m ³)	(m ³ /detik)	(m ³ /detik)	(m ³ /detik)	(m ³ /detik)	(m ³ /detik)
695,5	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
696,0	0,5	196943,0	196943	54,706	6,555	3,277	51,429	57,984
697,0	1,5	276388,0	276388	76,774	28,764	14,382	62,392	91,156
698,0	2,5	340253,0	340253	94,515	66,475	33,238	61,277	127,752
699,0	3,5	393288,0	393288	109,247	115,724	57,862	51,384	167,109
700,0	4,5	426849,9	426849,9	118,569	173,987	86,993	31,576	205,563
701,0	5,5	482620,3	482620,3	134,061	231,207	115,604	18,458	249,665
702,0	6,5	565839,3	565839,3	157,178	283,507	141,754	15,424	298,931
703,0	7,5	627748,3	627748,3	174,375	351,334	175,667	-1,293	350,042
704,0	8,5	682868,3	682868,3	189,686	384,885	192,443	-2,757	382,128
705,0	9,5	741773,8	741773,8	206,048	418,436	209,218	-3,170	415,266
706,0	10,5	799457,3	799457,3	222,071	451,987	225,993	-3,922	448,065
707,0	11,5	844477,3	844477,3	234,577	485,538	242,769	-8,192	477,346
708,0	12,5	874532,3	874532,3	242,926	513,117	256,558	-13,633	499,484
709,0	13,5	902884,8	902884,8	250,801	534,069	267,034	-16,233	517,836
710,0	14,5	934631,8	934631,8	259,620	554,229	277,115	-17,495	536,735
711,0	15,5	970255,8	970255,8	269,516	573,682	286,841	-17,326	556,357
712,0	16,5	1008836,3	1008836	280,232	592,496	296,248	-16,016	576,480
713,0	17,5	1051243,3	1051243	292,012	610,731	305,366	-13,354	597,378
714,0	18,5	1095500,8	1095501	304,306	628,437	314,219	-9,913	618,524
715,0	19,5	1137559,8	1137560	315,989	645,658	322,829	-6,840	638,818
716,0	20,5	1178594,3	1178594	327,387	662,431	331,215	-3,828	658,603
717,0	21,5	1220798,8	1220799	339,111	678,790	339,395	-0,284	678,506
718,0	22,5	1263921,8	1263922	351,089	694,763	347,382	3,708	698,471
719,0	23,5	1307705,8	1307706	363,252	710,378	355,189	8,063	718,441
720,0	24,5	1352320,8	1352321	375,645	725,657	362,828	12,816	738,473
721,0	25,5	1397934,3	1397934	388,315	740,620	370,310	18,005	758,625
722,0	26,5	1443335,3	1443335	400,926	755,287	377,644	23,283	778,570

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.17
Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 8 m)

T	Inflow (I)	$(I_1+I_2)/2$	ψ_1	ϕ_2	Outflow (Q)	h	Elevasi
(jam)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m)	(m)
1	6,7	0,000	0,000	0,000	6,700	0,507	696,007
2	32,6	19,650	51,500	71,150	15,370	1,602	697,102
3	135,0	83,800	55,780	139,580	81,276	3,831	699,331

Lanjutan Tabel 4.17
 Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak

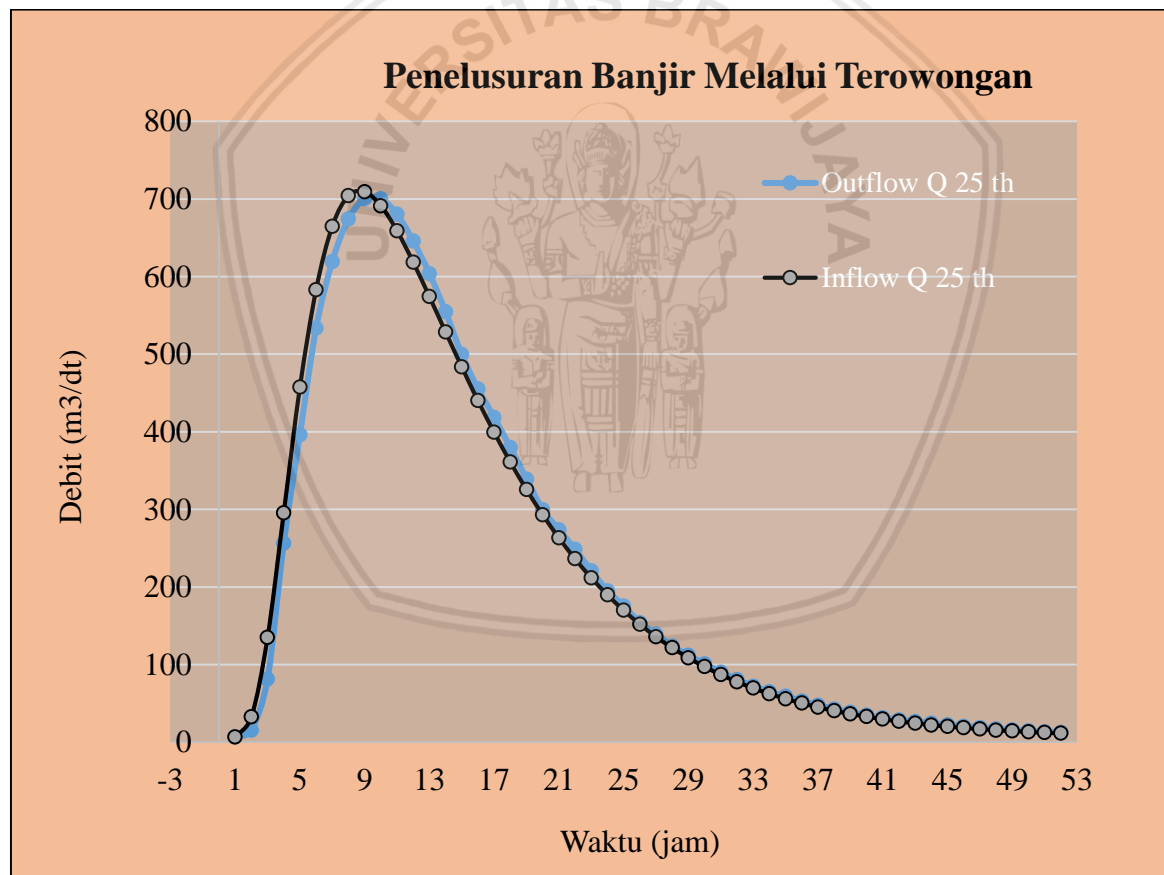
T (jam)	Inflow (I) (m ³ /det)	(I ₁ +I ₂)/2 (m ³ /det)	ψ ₁ (m ³ /det)	φ ₂ (m ³ /det)	Outflow (Q) (m ³ /det)	h (m)	Elevasi (m)
4	295,4	215,200	58,304	273,504	256,514	6,675	702,175
5	457,5	376,450	16,990	393,440	396,338	10,664	706,164
6	583,1	520,300	-2,898	517,402	533,574	16,001	711,501
7	664,9	624,000	-16,172	607,828	619,481	20,651	716,151
8	704,2	684,550	-11,653	672,897	674,180	23,104	718,604
9	709,3	706,750	-1,283	705,467	700,234	23,431	718,931
10	691,3	700,300	5,233	705,533	700,286	22,283	717,783
11	659,0	675,150	5,248	680,398	680,304	20,295	715,795
12	618,5	638,750	0,094	638,844	645,680	17,939	713,439
13	574,2	596,350	-6,836	589,514	603,869	15,528	711,028
14	528,6	551,400	-14,355	537,045	554,537	13,239	708,739
15	483,6	506,100	-17,492	488,608	499,568	11,442	706,942
16	440,2	461,900	-10,960	450,940	455,282	10,149	705,649
17	399,3	419,750	-4,341	415,409	418,582	8,930	704,430
18	361,0	380,150	-3,173	376,977	379,499	7,788	703,288
19	325,6	343,300	-2,522	340,778	339,041	7,121	702,621
20	293,1	309,350	1,737	311,087	299,639	6,641	702,141
21	263,4	278,250	11,448	289,698	273,706	6,116	701,616
22	236,4	249,900	15,993	265,893	248,434	5,599	701,099
23	211,9	224,150	17,458	241,608	220,754	5,163	700,663
24	189,9	200,900	20,854	221,754	194,994	4,778	700,278
25	170,0	179,950	26,760	206,710	175,475	4,432	699,932
26	152,1	161,050	31,235	192,285	153,869	4,124	699,624
27	136,0	144,050	38,416	182,466	138,992	3,848	699,348
28	121,7	128,850	43,474	172,324	123,626	3,603	699,103
29	108,8	115,250	48,698	163,948	111,769	3,359	698,859
30	97,3	103,050	52,179	155,229	100,858	3,126	698,626
31	87,1	92,200	54,371	146,571	90,024	2,919	698,419
32	77,9	82,500	56,547	139,047	80,609	2,732	698,232
33	69,7	73,800	58,438	132,238	72,089	2,565	698,065
34	62,5	66,100	60,150	126,250	64,927	2,395	697,895
35	56,0	59,250	61,323	120,573	59,077	2,222	697,722
36	50,3	53,150	61,496	114,646	52,969	2,071	697,571
37	45,2	47,750	61,677	109,427	47,591	1,936	697,436
38	40,6	42,900	61,836	104,736	42,757	1,814	697,314
39	36,6	38,600	61,979	100,579	38,473	1,708	697,208
40	33,0	34,800	62,105	96,905	34,688	1,612	697,112
41	29,8	31,400	62,217	93,617	31,300	1,527	697,027
42	27,0	28,400	62,317	90,717	28,470	1,421	696,921
43	24,5	25,750	62,247	87,997	26,649	1,308	696,808

Lanjutan Tabel 4.17

Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 8 m)

T (jam)	Inflow (I) (m ³ /det)	(I ₁ +I ₂)/2 (m ³ /det)	ψ_1 (m ³ /det)	ϕ_2 (m ³ /det)	Outflow (Q) (m ³ /det)	h (m)	Elevasi (m)
44	22,2	23,350	61,348	84,698	24,440	1,204	696,704
45	20,3	21,250	60,258	81,508	22,304	1,119	696,619
46	18,5	19,400	59,204	78,604	20,360	1,038	696,538
47	17,0	17,750	58,244	75,994	18,613	0,970	696,470
48	15,6	16,300	57,381	73,681	17,064	0,907	696,407
49	14,4	15,000	56,617	71,617	15,682	0,853	696,353
50	13,3	13,850	55,935	69,785	14,456	0,804	696,304
51	12,4	12,850	55,329	68,179	13,381	0,763	696,263
52	11,5	11,950	54,798	66,748	12,423	0,723	696,223
Max					700,286	23,431	718,931

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.11 Grafik Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

4.4.4 Perhitungan Penelusuran Banjir Dengan Diameter Terowongan 9 m

Pada kondisi ini, air yang berada di inlet terowongan belum memenuhi terowongan. Atau dapat dikatakan tinggi air < tinggi terowongan. Dalam perhitungan aliran bebas dihitung hingga tinggi air < 1,2D. Perhitungan hidrolika aliran bebas adalah sebagai berikut:

Tabel 4.18

Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Bebas $h < 1,2$ Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 9 m)

El. MA (m)	Tinggi MA (m)	A (m ²)	P (m)	R (m)	v (m/detik)	Q (m ³ /detik)	F Nilai	Keterangan
696,0	0,5	1,958	6,902	0,284	4,110	8,045	1,227	superkritis
696,5	1,0	5,511	8,096	0,681	7,367	40,599	1,531	superkritis
697,0	1,5	9,385	9,150	1,026	9,683	90,879	1,573	superkritis
697,5	2,0	13,451	10,195	1,319	11,453	154,061	1,585	superkritis
698,0	2,5	17,665	11,233	1,573	12,875	227,442	1,581	superkritis
698,5	3,0	21,994	12,250	1,796	14,065	309,341	1,564	superkritis
699,0	3,5	26,406	13,258	1,992	15,071	397,977	1,542	superkritis
699,5	4,0	30,873	14,268	2,164	15,928	491,729	1,514	superkritis
700,0	4,5	35,365	15,266	2,317	16,669	589,489	1,483	superkritis
700,5	5,0	39,812	16,254	2,449	17,300	688,720	1,443	superkritis
701,0	5,5	44,290	17,290	2,562	17,824	789,439	1,399	superkritis
701,5	6,0	48,611	18,324	2,653	18,245	886,924	1,344	superkritis
702,0	6,5	52,754	23,095	2,284	16,513	871,125	1,138	superkritis
702,5	7,0	56,648	20,577	2,753	18,702	1059,400	1,198	superkritis
703,0	7,5	60,205	21,839	2,757	18,718	1126,926	1,102	superkritis
703,5	8,0	63,309	23,282	2,719	18,548	1174,258	1,066	superkritis
704,0	8,5	65,780	25,124	2,618	18,086	1189,696	1,006	superkritis

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Contoh perhitungan: (pada elevasi 695)

1. Nilai A, P, dan R didapat dengan interpolasi pada tabel 4.1 dan 4.2.

2. Menghitung nilai v, menggunakan rumus manning

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \\
 &= \frac{1}{0,014} \cdot 0,284^{2/3} \cdot 0,038^{1/2} \\
 &= 4,110 \text{ m/dt}
 \end{aligned}$$

3. Menghitung nilai Q, menggunakan rumus kontinuitas

$$\begin{aligned}
 Q &= v \cdot A \\
 &= 4,110 \cdot 1,958 = 8,045 \text{ m}^3/\text{dt}
 \end{aligned}$$

4. Menghitung nilai F

$F = 1,227 \sim$ aliran superkritis

Karena slope saluran termasuk dalam kategori terjal (*steep slope*), maka akan terjadi aliran super kritis, sehingga rumus aliran seragam Manning tidak berlaku. Perhitungan kapasitas aliran dengan titik kontrol hidrolis di inlet terowongan dihitung dengan rumus aliran kritis sebagai berikut :

Tabel 4.19

Perhitungan Debit pada Saat Kondisi Kritis (Diameter Terowongan Pengelak 9 m)

El. MA	Tinggi MA	A	v_c	Q_c
(m)	(m)	(m ²)	(m/dt)	(m ³ /dt)
696,0	0,5	1,958	1,8083141	3,539
696,5	1,0	5,511	2,5573424	14,092
697,0	1,5	9,385	3,1320920	29,395
697,5	2,0	13,451	3,6166283	48,648
698,0	2,5	17,665	4,0435133	71,429
698,5	3,0	21,994	4,4294469	97,422
699,0	3,5	26,406	4,7843495	126,336
699,5	4,0	30,873	5,1146847	157,904
700,0	4,5	35,365	5,4249424	191,851
700,5	5,0	39,812	5,7183914	227,658
701,0	5,5	44,290	5,9974995	265,629
701,5	6,0	48,611	6,2641839	304,507
702,0	6,5	52,754	6,5199693	343,951
702,5	7,0	56,648	6,7660919	383,284
703,0	7,5	60,205	7,0035705	421,647
703,5	8,0	63,309	7,2332565	457,928
704,0	8,5	65,780	7,4558702	490,448

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

$$V_c = (g Y_c)^{1/2}$$

$$= 1,808 \text{ m/dt}$$

$$Q_c = A \cdot V_c$$

$$= 3,539 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Pada kondisi ini terowongan terisi penuh. Debit yang masuk tergantung pada tinggi muka air di bagian pemasukan. Perhitungannya kondisi aliran tertekan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.20

Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$ Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 9 m)

El. MA (m)	Tinggi MA (m)	L sin θ m	A (m ²)	R (m)	$\sum c$	v (m/detik)	Q (m ³ /detik)
710,5	15,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	10,267	851,422
711,0	15,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	10,455	867,046
711,5	16,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	10,640	882,393
712,0	16,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	10,822	897,478
712,5	17,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	11,001	912,313
713,0	17,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	11,177	926,911
713,5	18,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	11,350	941,282
714,0	18,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	11,521	955,438
714,5	19,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	11,689	969,387
715,0	19,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	11,855	983,137
715,5	20,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	12,019	996,699
716,0	20,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	12,180	1010,078
716,5	21,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	12,339	1023,282
717,0	21,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	12,496	1036,318
717,5	22,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	12,652	1049,192
718,0	22,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	12,805	1061,910
718,5	23,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	12,956	1074,477
719,0	23,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	13,106	1086,899
719,5	24,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	13,254	1099,181
720,0	24,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	13,401	1111,327
720,5	25,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	13,546	1123,342
721,0	25,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	13,689	1135,229
721,5	26,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	13,831	1146,994
722,0	26,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	13,971	1158,638

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Contoh perhitungan: (pada elevasi 706,5)

5. Nilai A, dan R didapat dengan interpolasi pada tabel 4.1 dan 4.2.

6. Menghitung koefisien hambatan

- Koefisien pada outlet (Co)

$$Co = 1$$

- Koefisien gesekan (Cf)

$$Cv = n^2 \cdot L \cdot / R^{4/3}$$

$$= 0,02 \cdot 197 / 3,005^{4/3}$$

$$= 0,985$$

- Koefisien inlet (C_i)
 $C_i = 0,5$
- Sehingga $\sum C = C_i + C_o + C_f = 1,513$

7. Menghitung nilai v

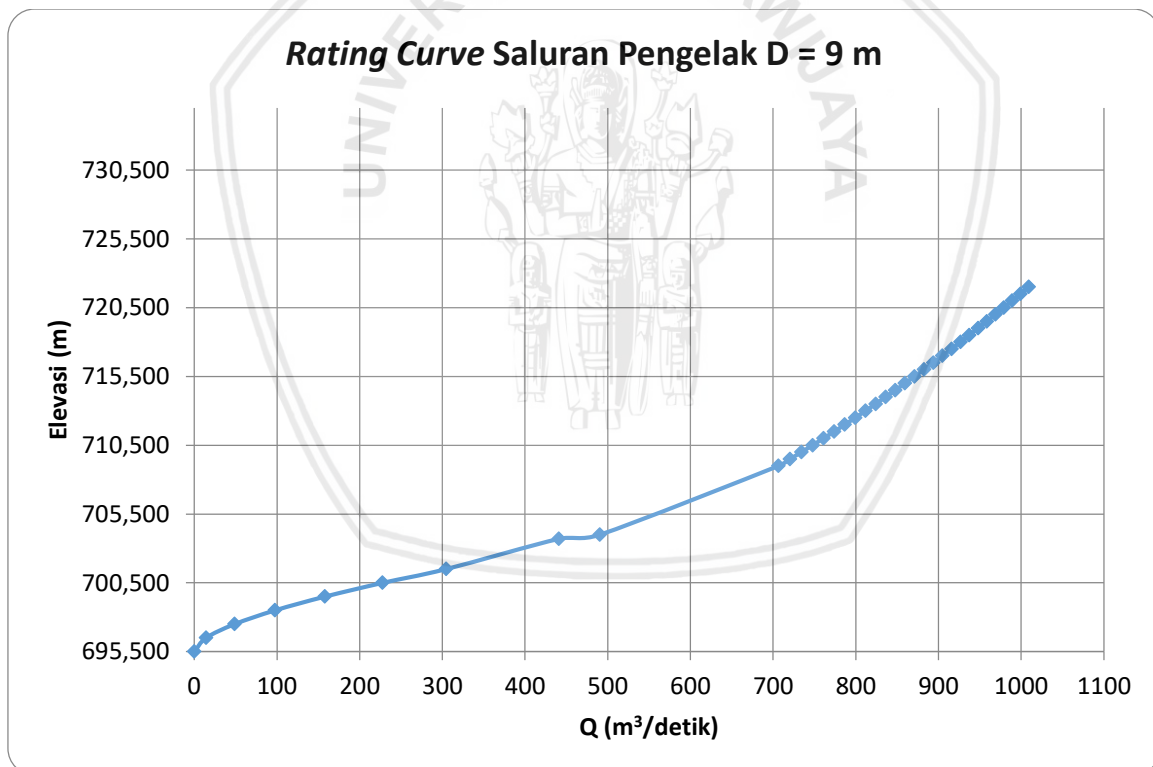
$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (\text{elevasi muka air} - \text{elevasi inlet} - \frac{D}{2} + L \cdot \sin\theta)}{1 + \sum c}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot (706,5 - 695,5 - 4,5 + 3,5)}{1 + 1,513}}$$

$$v = 10,267 \text{ m/dt}$$

8. Menghitung nilai Q , menggunakan rumus kontinuitas

$$\begin{aligned} Q &= v \cdot A \\ &= 10,267 \cdot 82,93 \\ &= 851,422 \text{ m}^3/\text{dt} \end{aligned}$$



Gambar 4.12 Grafik Perhitungan *Rating Curve* Saluran Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 9 m)

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.21

Hubungan Antara H, Q, Psi dan Phi Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 9 m)

Elevasi (m)	H (m)	S tampu- ngan) (m ³)	ΔS (m ³)	ΔS/Δt (m ³ /detik)	Q (m ³ /detik)	Q/2 (m ³ /detik)	Psi y = ΔS/Δt - Q/2 (m ³ /detik)	Phi φ = ΔS/Δt + Q/2 (m ³ /detik)
695,5	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
696,0	0,5	196943,0	196943,0	54,706	7,046	3,523	51,183	58,230
697,0	1,5	276388,0	276388,0	76,774	31,371	15,685	61,089	92,460
698,0	2,5	340253,0	340253,0	94,515	73,035	36,518	57,997	131,032
699,0	3,5	393288,0	393288,0	109,247	127,663	63,832	45,415	173,078
700,0	4,5	426849,9	426849,9	118,569	192,781	96,390	22,179	214,960
701,0	5,5	482620,3	482620,3	134,061	266,082	133,041	1,020	267,102
702,0	6,5	565839,3	565839,3	157,178	335,514	167,757	-10,579	324,934
703,0	7,5	627748,3	627748,3	174,375	397,527	198,763	-24,389	373,138
704,0	8,5	682868,3	682868,3	189,686	490,448	245,224	-55,538	434,910
705,0	9,5	741773,8	741773,8	206,048	533,663	266,831	-60,783	472,880
706,0	10,5	799457,3	799457,3	222,071	576,878	288,439	-66,367	510,510
707,0	11,5	844477,3	844477,3	234,577	620,092	310,046	-75,469	544,623
708,0	12,5	874532,3	874532,3	242,926	663,307	331,654	-88,728	574,579
709,0	13,5	902884,8	902884,8	250,801	706,522	353,261	-102,460	604,062
710,0	14,5	934631,8	934631,8	259,620	734,239	367,120	-107,500	626,740
711,0	15,5	970255,8	970255,8	269,516	760,948	380,474	-110,958	649,989
712,0	16,5	1008836,3	1008836,0	280,232	786,750	393,375	-113,143	673,607
713,0	17,5	1051243,3	1051243,0	292,012	811,732	405,866	-113,854	697,878
714,0	18,5	1095500,8	1095501,0	304,306	835,968	417,984	-113,678	722,290
715,0	19,5	1137559,8	1137560,0	315,989	859,521	429,761	-113,772	745,750
716,0	20,5	1178594,3	1178594,0	327,387	882,446	441,223	-113,836	768,610
717,0	21,5	1220798,8	1220799,0	339,111	904,790	452,395	-113,284	791,506
718,0	22,5	1263921,8	1263922,0	351,089	926,595	463,298	-112,208	814,387
719,0	23,5	1307705,8	1307706,0	363,252	947,899	473,950	-110,698	837,201
720,0	24,5	1352320,8	1352321,0	375,645	968,734	484,367	-108,723	860,012
721,0	25,5	1397934,3	1397934,0	388,315	989,131	494,566	-106,250	882,881
722,0	26,5	1443335,3	1443335,0	400,926	1009,116	504,558	-103,631	905,484

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.22

Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 9 m)

T (jam)	Inflow (I) (m ³ /det)	(I ₁ +I ₂)/2 (m ³ /det)	ψ ₁ (m ³ /det)	φ ₂ (m ³ /det)	Outflow (Q) (m ³ /det)	h (m)	Elevasi (m)
1	6,7	0,000	0,000	0,000	6,700	0,475	695,975
2	32,6	19,650	48,667	68,317	14,215	1,530	697,030
3	135,0	83,800	54,102	137,902	81,961	3,613	699,113

Lanjutan Tabel 4.22

Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 9 m)

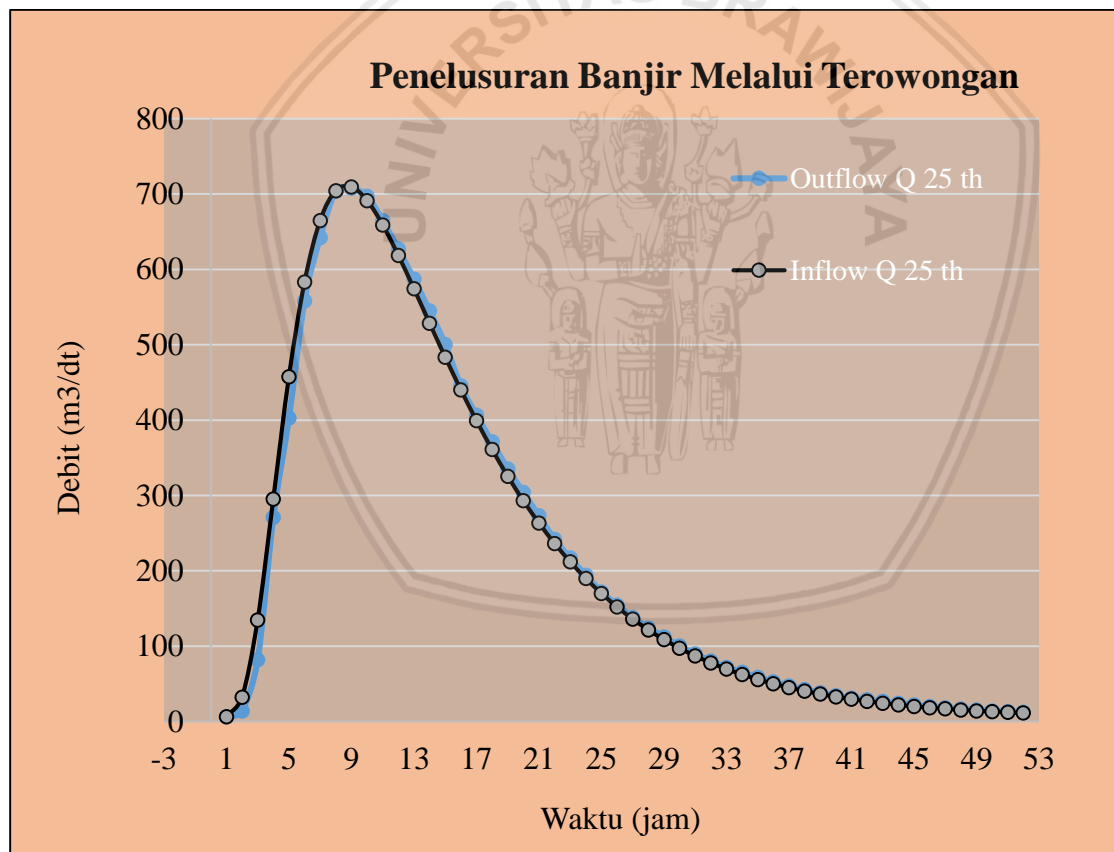
T	Inflow (I)	(I ₁ +I ₂)/2	ψ ₁	φ ₂	Outflow (Q)	h	Elevasi
(jam)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m)	(m)
4	295,4	215,200	55,941	271,141	270,931	5,922	701,422
5	457,5	376,450	0,210	376,660	402,825	8,145	703,645
6	583,1	520,300	-26,165	494,135	558,072	10,644	706,144
7	664,9	624,000	-63,937	560,063	642,366	12,537	708,037
8	704,2	684,550	-82,303	602,247	703,861	13,446	708,946
9	709,3	706,750	-101,614	605,136	707,834	13,600	709,100
10	691,3	700,300	-102,698	597,602	697,052	13,148	708,648
11	659,0	675,150	-99,451	575,699	664,949	12,400	707,900
12	618,5	638,750	-89,250	549,500	627,128	11,463	706,963
13	574,2	596,350	-77,628	518,722	587,281	10,438	705,938
14	528,6	551,400	-68,558	482,842	545,103	9,383	704,883
15	483,6	506,100	-62,261	443,839	500,610	8,426	703,926
16	440,2	461,900	-56,772	405,128	445,649	7,959	703,459
17	399,3	419,750	-40,521	379,229	406,690	7,519	703,019
18	361,0	380,150	-27,461	352,689	371,220	6,911	702,411
19	325,6	343,300	-18,531	324,769	335,315	6,357	701,857
20	293,1	309,350	-10,546	298,804	304,142	5,889	701,389
21	263,4	278,250	-5,338	272,912	273,057	5,463	700,963
22	236,4	249,900	-0,145	249,755	241,695	5,095	700,595
23	211,9	224,150	8,059	232,209	217,030	4,761	700,261
24	189,9	200,900	15,179	216,079	194,354	4,456	699,956
25	170,0	179,950	21,725	201,675	172,125	4,150	699,650
26	152,1	161,050	29,550	190,600	154,905	3,875	699,375
27	136,0	144,050	35,694	179,744	138,027	3,628	699,128
28	121,7	128,850	41,717	170,567	124,400	3,391	698,891
29	108,8	115,250	46,167	161,417	112,512	3,155	698,655
30	97,3	103,050	48,905	151,955	100,219	2,944	698,444
31	87,1	92,200	51,736	143,936	89,800	2,757	698,257
32	77,9	82,500	54,136	136,636	80,315	2,589	698,089
33	69,7	73,800	56,320	130,120	72,050	2,420	697,920
34	62,5	66,100	58,070	124,170	65,623	2,247	697,747
35	56,0	59,250	58,547	117,797	58,739	2,091	697,591
36	50,3	53,150	59,058	112,208	52,702	1,954	697,454
37	45,2	47,750	59,506	107,256	47,353	1,832	697,332
38	40,6	42,900	59,903	102,803	42,543	1,722	697,222
39	36,6	38,600	60,260	98,860	38,284	1,626	697,126
40	33,0	34,800	60,576	95,376	34,521	1,539	697,039
41	29,8	31,400	60,855	92,255	31,225	1,435	696,935
42	27,0	28,400	61,030	89,430	29,218	1,320	696,820
43	24,5	25,750	60,212	85,962	26,754	1,218	696,718

Lanjutan Tabel 4.22

Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 9 m)

T (jam)	Inflow (I) (m ³ /det)	(I ₁ +I ₂)/2 (m ³ /det)	ψ_1 (m ³ /det)	φ_2 (m ³ /det)	Outflow (Q) (m ³ /det)	h (m)	Elevasi (m)
44	22,2	23,350	59,209	82,559	24,335	1,123	696,623
45	20,3	21,250	58,224	79,474	22,143	1,045	696,545
46	18,5	19,400	57,331	76,731	20,194	0,971	696,471
47	17,0	17,750	56,537	74,287	18,457	0,909	696,409
48	15,6	16,300	55,830	72,130	16,924	0,852	696,352
49	14,4	15,000	55,206	70,206	15,557	0,802	696,302
50	13,3	13,850	54,649	68,499	14,344	0,757	696,257
51	12,4	12,850	54,155	67,005	13,282	0,720	696,220
52	11,5	11,950	53,723	65,673	12,336	0,683	696,183
Max					707,834	13,600	709,100

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.13 Grafik Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 9 m)

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

4.4.5 Perhitungan Penelusuran Banjir Dengan Diameter Terowongan 10 m

Pada kondisi ini, air yang berada di inlet terowongan belum memenuhi terowongan. Atau dapat dikatakan tinggi air < tinggi terowongan. Dalam perhitungan aliran bebas dihitung hingga tinggi air < 1,2D. Perhitungan hidrolika aliran bebas adalah sebagai berikut:

Tabel 4.23

Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Bebas $h < 1,2$ Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 10 m)

El. MA (m)	Tinggi MA (m)	A (m ²)	P (m)	R (m)	v (m/detik)	Q (m ³ /detik)	F Nilai	Keterangan
696,0	0,5	2,000	6,079	0,329	4,537	9,075	1,322	superkritis
696,5	1,0	5,850	8,731	0,670	7,290	42,646	1,534	superkritis
697,0	1,5	10,120	9,816	1,031	9,717	98,331	1,592	superkritis
697,5	2,0	14,570	10,865	1,341	11,578	168,688	1,611	superkritis
698,0	2,5	19,190	11,912	1,611	13,084	251,080	1,612	superkritis
698,5	3,0	23,030	12,449	1,850	14,348	330,431	1,542	superkritis
699,0	3,5	28,780	13,951	2,063	15,429	444,048	1,586	superkritis
699,5	4,0	33,700	14,964	2,252	16,358	551,250	1,564	superkritis
700,0	4,5	38,670	15,966	2,422	17,171	663,992	1,538	superkritis
700,5	5,0	43,660	16,962	2,574	17,882	780,721	1,509	superkritis
701,0	5,5	48,650	17,972	2,707	18,493	899,666	1,475	superkritis
701,5	6,0	53,590	18,977	2,824	19,022	1019,373	1,434	superkritis
702,0	6,5	58,480	23,042	2,538	17,715	1035,956	1,263	superkritis
702,5	7,0	63,120	21,082	2,994	19,778	1248,363	1,329	superkritis
703,0	7,5	67,580	22,201	3,044	19,997	1351,411	1,262	superkritis
703,5	8,0	71,750	23,394	3,067	20,098	1442,018	1,309	superkritis
704,0	8,5	75,540	24,719	3,056	20,050	1514,556	1,281	superkritis
704,5	9	78,840	26,236	3,005	19,826	1563,085	1,322	superkritis
705,0	9,5	81,460	28,158	2,893	19,330	1574,646	1,332	superkritis

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Contoh perhitungan: (pada elevasi 696)

1. Nilai A, P, dan R didapat dengan interpolasi pada tabel 4.1 dan 4.2.
2. Menghitung nilai v, menggunakan rumus manning

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \\
 &= \frac{1}{0,014} \cdot 0,329^{2/3} \cdot 0,038^{1/2} \\
 &= 4,537 \text{ m/dt}
 \end{aligned}$$

3. Menghitung nilai Q, menggunakan rumus kontinuitas

$$\begin{aligned}
 Q &= v \cdot A \\
 &= 4,537 \cdot 2 = 9,075 \text{ m}^3/\text{dt}
 \end{aligned}$$

4. Menghitung nilai F

$F = 1,322 \sim$ aliran superkritis

Karena slope saluran termasuk dalam kategori terjal (*steep slope*), maka akan terjadi aliran super kritis, sehingga rumus aliran seragam Manning tidak berlaku. Perhitungan kapasitas aliran dengan titik kontrol hidrolis di inlet terowongan dihitung dengan rumus aliran kritis sebagai berikut :

Tabel 4.24

Perhitungan Debit pada Saat Kondisi Kritis (Diameter Terowongan Pengelak 10 m)

El. MA (m)	Tinggi MA (m)	A (m ²)	v_c (m/dt)	Q_c (m ³ /dt)
696,0	0,5	2,000	1,8083141	3,6166
696,5	1,0	5,850	2,5573424	14,960
697,0	1,5	10,120	3,1320920	31,696
697,5	2,0	14,570	3,6166283	52,694
698,0	2,5	19,190	4,0435133	77,5950
698,5	3,0	23,030	4,4294469	102,010
699,0	3,5	28,780	4,7843495	137,694
699,5	4,0	33,700	5,1146847	172,365
700,0	4,5	38,670	5,4249424	209,783
700,5	5,0	43,660	5,7183914	249,665
701,0	5,5	48,650	5,9974995	291,778
701,5	6,0	53,590	6,2641839	335,698
702,0	6,5	58,480	6,5199693	381,288
702,5	7,0	63,120	6,7660919	427,076
703,0	7,5	67,580	7,0035705	473,301
703,5	8,0	71,750	7,2332565	518,986
704,0	8,5	75,540	7,4558702	563,216
704,5	9,0	78,840	7,6720271	604,863
705,0	9,5	81,460	7,8822586	642,089

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

$$V_c = (g Y_c)^{1/2}$$

$$= 1,808 \text{ m/dt}$$

$$Q_c = A \cdot V_c$$

$$= 3,6166 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Pada kondisi ini terowongan terisi penuh. Debit yang masuk tergantung pada tinggi muka air di bagian pemasukan. Perhitungannya kondisi aliran tertekan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.25

Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$ Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 10 m)

El. MA (m)	Tinggi MA (m)	L sin θ m	A (m ²)	R (m)	$\sum c$	v (m/detik)	Q (m ³ /detik)
710,5	15,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	10,267	851,422
711,0	15,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	10,455	867,046
711,5	16,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	10,640	882,393
712,0	16,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	10,822	897,478
712,5	17,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	11,001	912,313
713,0	17,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	11,177	926,911
713,5	18,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	11,350	941,282
714,0	18,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	11,521	955,438
714,5	19,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	11,689	969,387
715,0	19,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	11,855	983,137
715,5	20,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	12,019	996,699
716,0	20,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	12,180	1010,078
716,5	21,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	12,339	1023,282
717,0	21,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	12,496	1036,318
717,5	22,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	12,652	1049,192
718,0	22,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	12,805	1061,910
718,5	23,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	12,956	1074,477
719,0	23,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	13,106	1086,899
719,5	24,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	13,254	1099,181
720,0	24,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	13,401	1111,327
720,5	25,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	13,546	1123,342
721,0	25,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	13,689	1135,229
721,5	26,0	3,5	82,930	3,005	1,51285	13,831	1146,994
722,0	26,5	3,5	82,930	3,005	1,51285	13,971	1158,638

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Contoh perhitungan: (pada elevasi 710,5)

5. Nilai A, dan R didapat dengan interpolasi pada tabel 4.1 dan 4.2.

6. Menghitung koefisien hambatan

- Koefisien pada outlet (Co)

$$C_o = 1$$

- Koefisien gesekan (Cf)

$$\begin{aligned} C_v &= n^2 \cdot L \cdot / R^{4/3} \\ &= 0,02 \cdot 197 / 3,005^{4/3} \\ &= 0,985 \end{aligned}$$

- Koefisien inlet (C_i)

$$C_i = 0,5$$

- Sehingga $\sum C = C_i + C_o + C_f = 1,513$

7. Menghitung nilai v

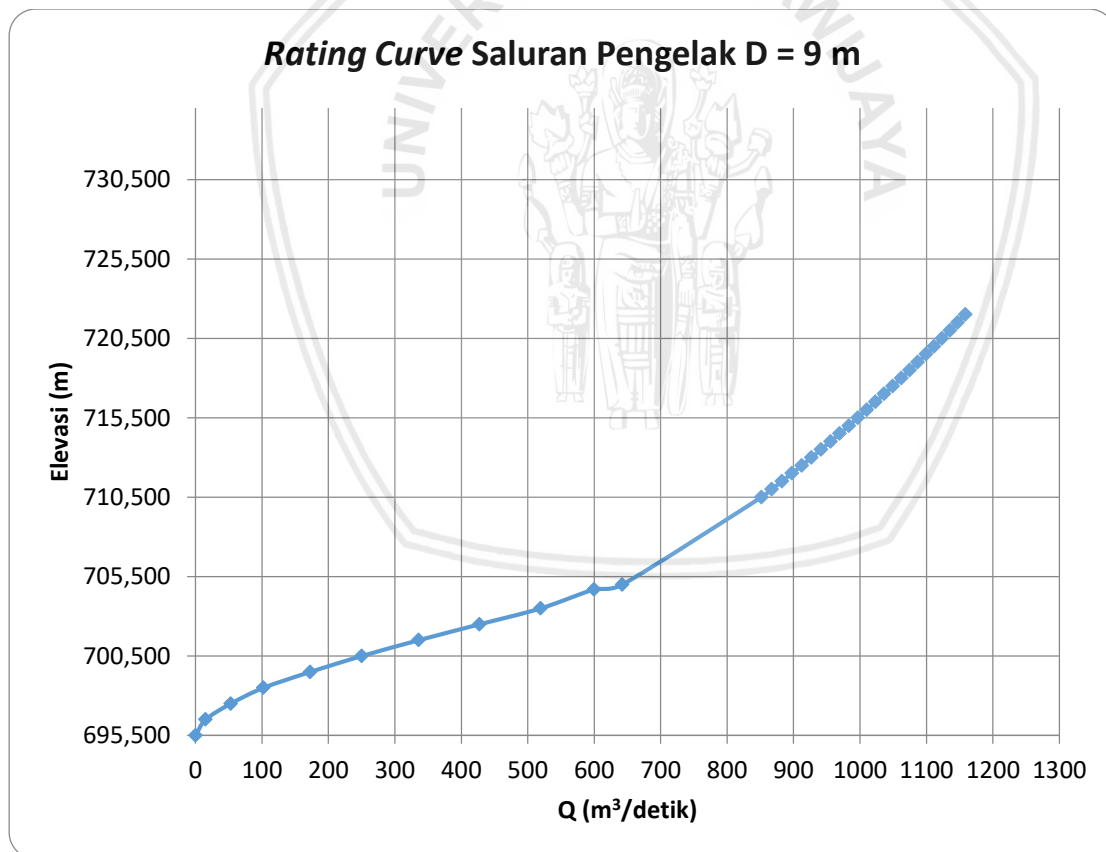
$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (\text{elevasi muka air} - \text{elevasi inlet} - \frac{D}{2} + L \cdot \sin\theta)}{1 + \sum c}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot (706,5 - 695,5 - 4,5 + 3,5)}{1 + 1,513}}$$

$$v = 10,267 \text{ m/dt}$$

8. Menghitung nilai Q , menggunakan rumus kontinuitas

$$\begin{aligned} Q &= v \cdot A \\ &= 10,267 \cdot 82,93 \\ &= 851,422 \text{ m}^3/\text{dt} \end{aligned}$$



Gambar 4.14 Grafik Perhitungan *Rating Curve* Saluran Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 10 m)

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.26
Hubungan Antara H, Q, Psi dan Phi (Diameter Terowongan Pengelak 10 m)

Elevasi (m)	H (m)	S tampu- ngan) (m ³)	ΔS (m ³)	$\Delta S/\Delta t$ (m ³ /detik)	Q (m ³ /detik)	Q/2 (m ³ /detik)	Psi	Phi
							$y = \Delta S/\Delta t - Q/2$ (m ³ /detik)	$\phi = \Delta S/\Delta t + Q/2$ (m ³ /detik)
695,5	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
696,0	0,5	196943,0	196943,0	54,706	7,480	3,740	50,966	58,447
697,0	1,5	276388,0	276388,0	76,774	33,827	16,914	59,861	93,688
698,0	2,5	340253,0	340253,0	94,515	77,352	38,676	55,839	133,191
699,0	3,5	393288,0	393288,0	109,247	137,188	68,594	40,653	177,840
700,0	4,5	426849,9	426849,9	118,569	211,015	105,507	13,062	224,077
701,0	5,5	482620,3	482620,3	134,061	292,681	146,341	-12,279	280,402
702,0	6,5	565839,3	565839,3	157,178	381,387	190,693	-33,516	347,871
703,0	7,5	627748,3	627748,3	174,375	473,031	236,515	-62,141	410,890
704,0	8,5	682868,3	682868,3	189,686	552,639	276,320	-86,634	466,005
705,0	9,5	741773,8	741773,8	206,048	642,089	321,044	-114,996	527,093
706,0	10,5	799457,3	799457,3	222,071	680,149	340,075	-118,003	562,146
707,0	11,5	844477,3	844477,3	234,577	718,210	359,105	-124,528	593,682
708,0	12,5	874532,3	874532,3	242,926	756,271	378,135	-135,210	621,061
709,0	13,5	902884,8	902884,8	250,801	794,331	397,166	-146,364	647,967
710,0	14,5	934631,8	934631,8	259,620	832,392	416,196	-156,576	675,816
711,0	15,5	970255,8	970255,8	269,516	867,046	433,523	-164,007	703,038
712,0	16,5	1008836,3	1008836,0	280,232	897,478	448,739	-168,506	728,971
713,0	17,5	1051243,3	1051243,0	292,012	926,911	463,455	-171,443	755,467
714,0	18,5	1095500,8	1095501,0	304,306	955,438	477,719	-173,413	782,025
715,0	19,5	1137559,8	1137560,0	315,989	983,137	491,569	-175,580	807,558
716,0	20,5	1178594,3	1178594,0	327,387	1010,078	505,039	-177,652	832,426
717,0	21,5	1220798,8	1220799,0	339,111	1036,318	518,159	-179,048	857,270
718,0	22,5	1263921,8	1263922,0	351,089	1061,910	530,955	-179,865	882,044
719,0	23,5	1307705,8	1307706,0	363,252	1086,899	543,450	-180,198	906,701
720,0	24,5	1352320,8	1352321,0	375,645	1111,327	555,664	-180,019	931,308
721,0	25,5	1397934,3	1397934,0	388,315	1135,229	567,615	-179,300	955,930
722,0	26,5	1443335,3	1443335,0	400,926	1158,638	579,319	-178,393	980,246

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.27
Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 10 m)

T (jam)	Inflow (I) (m ³ /det)	(I ₁ +I ₂)/2 (m ³ /det)	ψ_1 (m ³ /det)	ϕ_2 (m ³ /det)	Outflow (Q) (m ³ /det)	h (m)	Elevasi (m)
1	6,7	0,000	0,000	0,000	6,700	0,448	695,948
2	32,6	19,650	45,650	65,300	12,604	1,453	696,953
3	135,0	83,800	52,696	136,496	81,782	3,463	698,963

Lanjutan Tabel 4.27

Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 10 m)

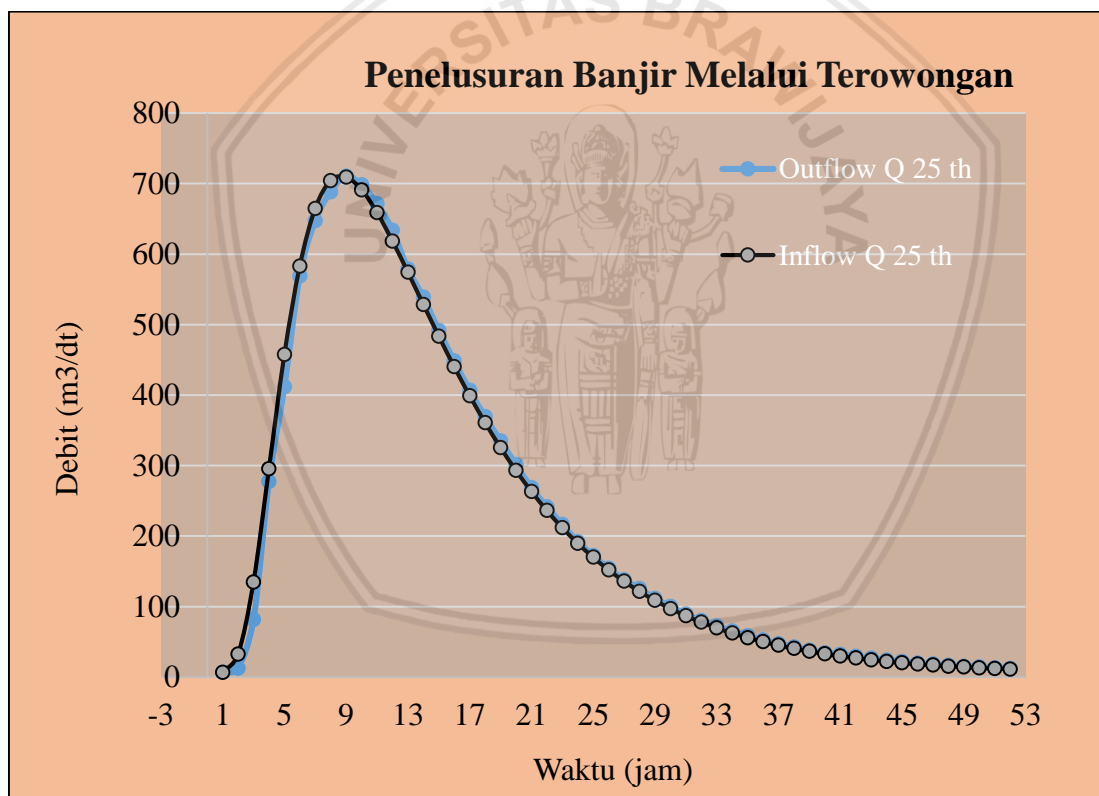
T (jam)	Inflow (I) (m ³ /det)	(I ₁ +I ₂)/2 (m ³ /det)	ψ_1 (m ³ /det)	φ_2 (m ³ /det)	Outflow (Q) (m ³ /det)	h (m)	Elevasi (m)
4	295,4	215,200	54,714	269,914	277,476	5,531	701,031
5	457,5	376,450	-7,561	368,889	411,952	7,331	702,831
6	583,1	520,300	-43,063	477,237	569,086	8,841	704,341
7	664,9	624,000	-91,849	532,151	647,581	10,099	705,599
8	704,2	684,550	-115,430	569,120	688,566	11,132	706,632
9	709,3	706,750	-119,446	587,304	710,512	11,266	706,766
10	691,3	700,300	-123,208	577,092	698,187	10,793	706,293
11	659,0	675,150	-121,095	554,055	671,364	9,944	705,444
12	618,5	638,750	-117,309	521,441	633,813	9,236	704,736
13	574,2	596,350	-112,372	483,978	578,956	8,741	704,241
14	528,6	551,400	-94,978	456,422	538,797	8,198	703,698
15	483,6	506,100	-82,375	423,725	491,570	7,633	703,133
16	440,2	461,900	-67,845	394,055	448,549	7,142	702,642
17	399,3	419,750	-54,494	365,256	406,668	6,695	702,195
18	361,0	380,150	-41,413	338,737	369,378	6,270	701,770
19	325,6	343,300	-30,641	312,659	335,092	5,871	701,371
20	293,1	309,350	-22,433	286,917	301,248	5,505	701,005
21	263,4	278,250	-14,330	263,920	268,784	5,141	700,641
22	236,4	249,900	-4,864	245,036	241,404	4,811	700,311
23	211,9	224,150	3,632	227,782	216,387	4,511	700,011
24	189,9	200,900	11,395	212,295	192,202	4,214	699,714
25	170,0	179,950	20,093	200,043	172,639	3,944	699,444
26	152,1	161,050	27,404	188,454	154,135	3,702	699,202
27	136,0	144,050	34,319	178,369	138,032	3,480	698,980
28	121,7	128,850	40,337	169,187	125,591	3,241	698,741
29	108,8	115,250	43,596	158,846	111,733	3,026	698,526
30	97,3	103,050	47,113	150,163	100,097	2,833	698,333
31	87,1	92,200	50,066	142,266	89,514	2,663	698,163
32	77,9	82,500	52,752	135,252	80,114	2,509	698,009
33	69,7	73,800	55,138	128,938	72,666	2,324	697,824
34	62,5	66,100	56,272	122,372	65,431	2,159	697,659
35	56,0	59,250	56,940	116,190	58,621	2,009	697,509
36	50,3	53,150	57,570	110,720	52,593	1,878	697,378
37	45,2	47,750	58,127	105,877	47,257	1,761	697,261
38	40,6	42,900	58,620	101,520	42,456	1,656	697,156
39	36,6	38,600	59,063	97,663	38,207	1,564	697,064
40	33,0	34,800	59,456	94,256	34,453	1,469	696,969
41	29,8	31,400	59,803	91,203	31,969	1,347	696,847
42	27,0	28,400	59,234	87,634	29,301	1,241	696,741
43	24,5	25,750	58,333	84,083	26,646	1,146	696,646

Lanjutan Tabel 4.27

Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 10 m)

T (jam)	Inflow (I) (m ³ /det)	(I ₁ +I ₂)/2 (m ³ /det)	ψ_1 (m ³ /det)	ϕ_2 (m ³ /det)	Outflow (Q) (m ³ /det)	h (m)	Elevasi (m)
44	22,2	23,350	57,436	80,786	24,182	1,059	696,559
45	20,3	21,250	56,605	77,855	21,990	0,987	696,487
46	18,5	19,400	55,865	75,265	20,054	0,918	696,418
47	17,0	17,750	55,211	72,961	18,331	0,861	696,361
48	15,6	16,300	54,630	70,930	16,813	0,808	696,308
49	14,4	15,000	54,117	69,117	15,457	0,763	696,263
50	13,3	13,850	53,659	67,509	14,256	0,721	696,221
51	12,4	12,850	53,254	66,104	13,205	0,687	696,187
52	11,5	11,950	52,899	64,849	12,267	0,653	696,153
Max					710,512	11,266	706,766

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.15 Grafik Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak (Diameter Terowongan Pengelak 10 m)

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

4.4.6 Analisa Pemilihan Dimensi Terowongan Pengelak

Analisa yang dilakukan setelah melakukan perhitungan penelusuran banjir menggunakan beberapa alternatif dimensi dari terowongan pengelak. Dari hasil penelusuran banjir didapatkan:

Tabel 4.28
Rekapitulasi Hasil Perhitungan Penelusuran Banjir

No	Diameter Terowongan (m)	H maks (m)	elevasi	keterangan
1	6	-	-	Diameter terlalu kecil
2	7	-	-	Diameter terlalu kecil
3	8	23,431	718,931	Diameter dapat digunakan
4	9	13,600	709,100	Diameter dapat digunakan
5	10	11,266	706,766	Diameter dapat digunakan

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Dari hasil perhitungan dilakukan analisa terhadap alternatif dimensi dari terowongan pengelak Bendungan Kualu. Dari hasil perhitungan dipilih digunakan Diameter terowongan 9 m, karena terowongan selebar 9 m menghasilkan desain yang paling efektif dan efisien dari segi biaya karena:

- Terowongan sepanjang 197 m dengan material dari beton bertulang, akan lebih efisien dari segi biaya jika menggunakan diameter 9 m dikarenakan volume beton akan lebih mahal jika dibandingkan dengan material urugan.
- Dari segi h air maksimum yang diperoleh akan menghasilkan tinggi *cofferdam* yang tidak terlalu tinggi (kurang dari 40% dari tinggi bendungan).

4.5 Cofferdam

Pada hakikatnya, bahan tubuh *cofferdam* dapat diklasifikasikan menjadi 2, yaitu:

- Bahan yang fungsi utamanya adalah penyangga tubuh bendungan, berupa bahan yang lulus air, seperti pasir, kerikil, dan batu.
- Bahan yang fungsi utamanya adalah pencegah rembesan air yang berlebihan dari waduk, berupa bahan yang kedap air yang umumnya adalah bahan tanah (lempungan).

4.5.1 Perhitungan Tinggi Cofferdam

Perhitungan tinggi *cofferdam* didasarkan pada elevasi permukaan air yang terdapat di depan pintu pemasukan saluran pengelak ditambah tinggi jagaan yang diperlukan untuk keamanan *cofferdam* tersebut. Kemudian untuk standard minimal ruang bebas yang diperlukan menggunakan standard yang telah disusun oleh *The Japanese National Committee on Large Dams (JANCOLD)*.

Tabel 4.29

Standar Ruang Bebas Menurut JANCOLD

No	Tinggi bendungan (m)	Bendungan beton	Bendungan urugan
1.	< 50	1 m	2 m
2.	50 – 100	2 m	3 m
3.	> 100	2,5 m	3,5 m

Sumber : Soediby (1993, p.121)

$$\begin{aligned}
 \text{Tinggi Cofferdam (H)} &= \text{tinggi maksimum muka air} + \text{tinggi jagaan} \\
 &= 13,6 + 1 \\
 &= 14,6 \sim 15 \text{ m}
 \end{aligned}$$

4.5.2 Perhitungan Lebar Puncak Cofferdam

Untuk memperoleh lebar minimum mercu bendungan, biasanya dihitung dengan rumus sebagai berikut (Sosrodarsono & Takeda, 2016) :

$$\begin{aligned}
 B &= 3,6 \cdot H^{1/3} - 3 \\
 &= 3,6 \cdot 15^{1/3} - 3 \\
 &= 7 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Keterangan:

B = lebar mercu (m), H = tinggi *cofferdam* (m)

4.5.3 Perhitungan Kemiringan Lereng Cofferdam

Pada tubuh *cofferdam* urugan mempunyai kemiringan lereng tertentu, untuk perhitungan kemiringan lereng *cofferdam* bendungan kualu berdasarkan tabel 2.3 Kemiringan Lereng yang dianjurkan (kodoatie, 2002). Maka dengan inti lempung dan urugan menggunakan kerikil dan kerakal diperoleh kemiringan hulu 1 : 1,5 dan kemiringan hilir 1 : 1,25.

4.5.4 Material Tubuh Cofferdam

Bahan yang dipakai untuk lapisan kedap air dapat berasal dari tanah dan tanah liat (*clay*), baik tanpa campuran maupun dicampur dengan pasir dengan perbandingan tertentu berdasarkan hasil percobaan penimbunan (*trial embankment*). Tanah ataupun tanah liat yang dipakai sebagai bahan timbunan lapisan kedap air ini haruslah memenuhi persyaratan utama untuk bahan kedap air yaitu :

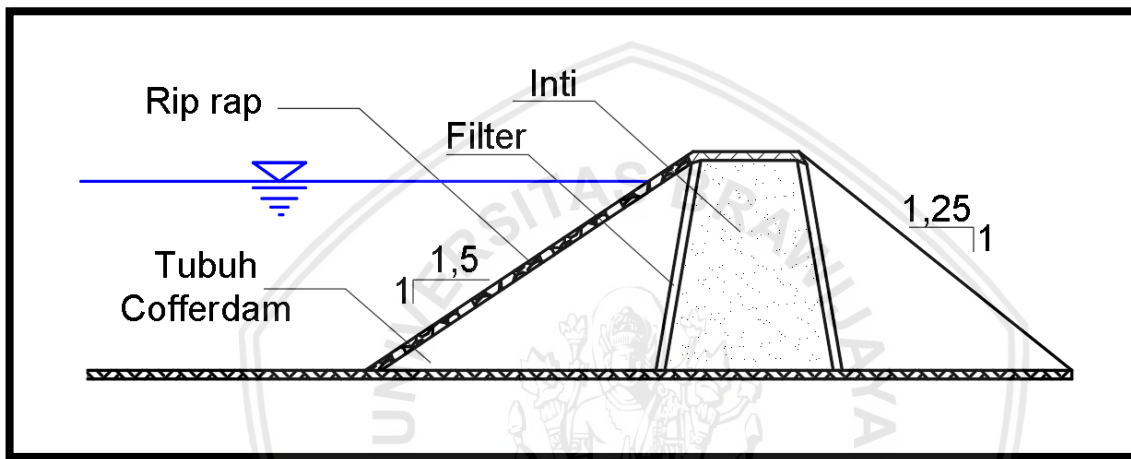
- Koefisien filtrasi serta kekuatan bagi yang diinginkan.
- Tingkat deformasi yang rendah.
- Mudah pelaksanaan pematatannya.
- Tidak mengandung zat-zat organis serta bahan mineral yang mudah terurai.

Lapisan kedap air harus mempunyai tingkat permeabilitas yang rendah, hal ini ditentukan oleh nilai koefisien filtrasinya. Sebagai standar koefisien filtrasi (k) bahan nilainya 1×10^{-5} cm/dtk. Hal ini bertujuan untuk mencegah terjadinya rembesan air melalui lapisan kedap air yang bersangkutan. Untuk mendapatkan nilai (k) yang memenuhi syarat untuk lapis kedap air biasanya diperkirakan berdasarkan prosentase butiran tanah yang lolos saringan No.300.

Lereng sebelah hulu dari *Cofferdam* Bendungan Kualu direncanakan dilindungi oleh lapisan timbunan batu (*rip-rap*) setebal 0,5 m, yang bertujuan untuk melindungi lereng dari pengaruh kekuatan ombak dan aliran air. Kondisi batu untuk perlindungan lereng ini harus baik dan tidak mudah lapuk.

Penggunaan *rip-rap* sebagai lapisan pelindung mempunyai kelebihan, antara lain

- Dapat mengikuti penurunan tubuh bendungan.
- Mempunyai kemampuan reduksi hempasan ombak yang besar.
- Cukup stabil terhadap pengaruh-pengaruh fluktuasi permukaan air dan gerakan ombak.
- Konstruksinya dapat dikerjakan secara mekanis.



Gambar 4.16 Desain Cofferdam

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

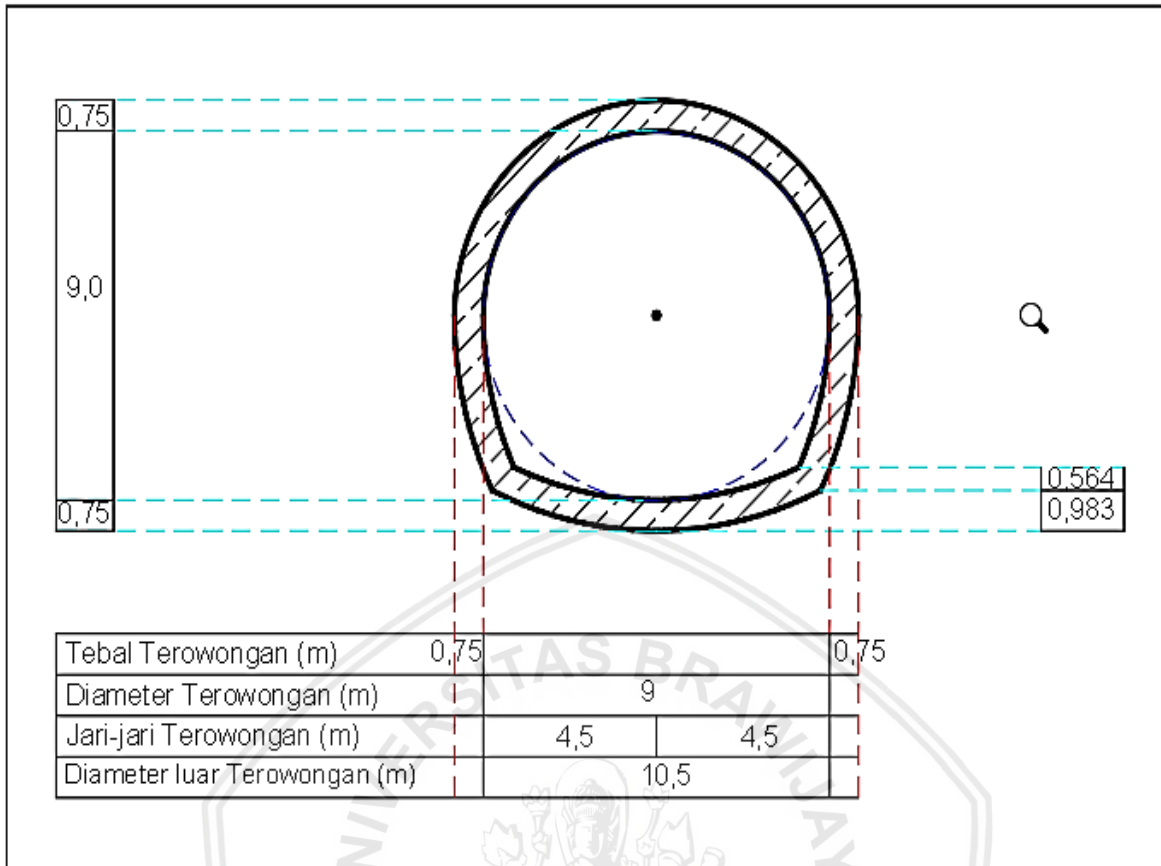
Keterangan:

- Material inti : lempung (*clay*)
- Material Filter : Pasir (*sand*)
- Material tubuh *cofferdam* : Urugan batu (pecahan batu)
- Material rip rap : batu

4.6 Perhitungan Konstruksi

Pada perencanaan konstruksi terowongan pengelak didesain dengan bentuk tapal kuda. Adapun kelebihan dari terowongan pengelak berbentuk tapal kuda adalah sebagai berikut:

1. Terowongan tapal kuda memiliki atap semi bulat dengan dinding dan dasar agak melengkung. Bentuk ini memberi keuntungan dasar yang lebih datar dan lebih lebar untuk memudahkan dalam pelaksanaan terowongan tanpa mengorbankan efisiensi hidrolis yang tetap sama seperti luas potongan melintang bentuk bulat.
2. Cocok digunakan pada kondisi batuan yang keras.

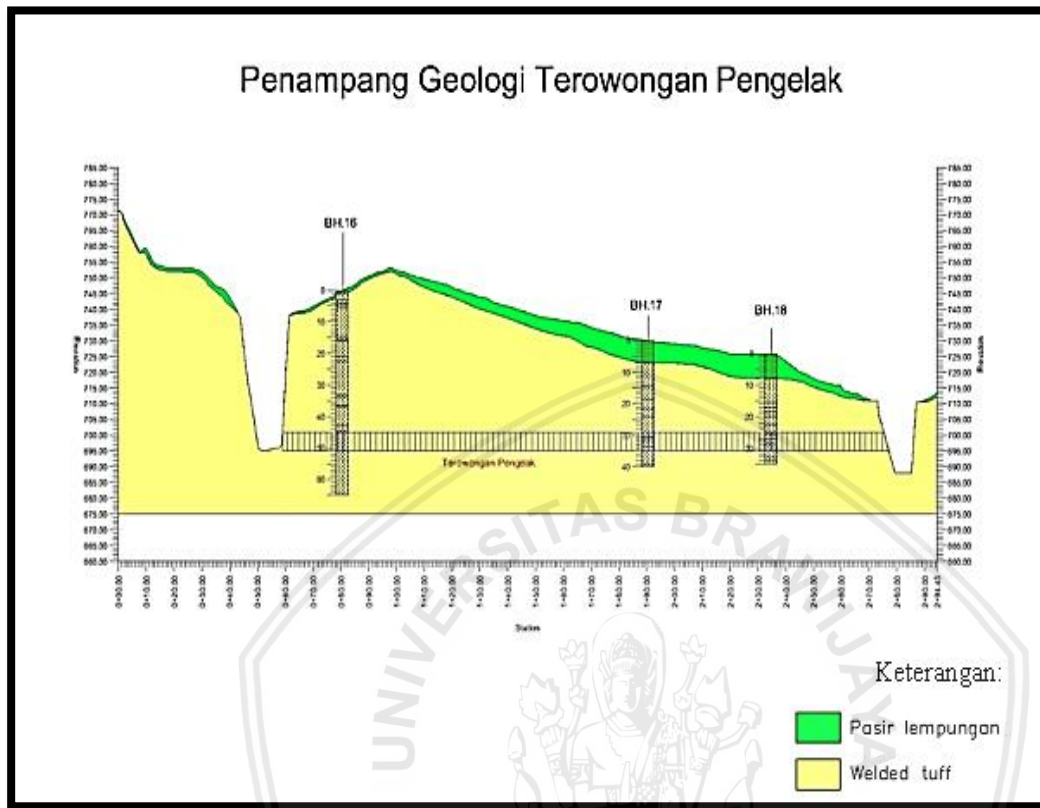


Gambar 4.17 Potongan Melintang Rencana Desain Terowongan Pengelak

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

4.7 Perhitungan Pembebanan

Perhitungan Pembebanan pada terowongan pengelak (pada *borehole* 16) sketsanya seperti pada gambar berikut:



Gambar 4.18 Potongan Memanjang Terowongan Pengelak dan Letak *Borehole*

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Dari sketsa rencana terowongan pengelak, didapat hasil sebagai berikut:

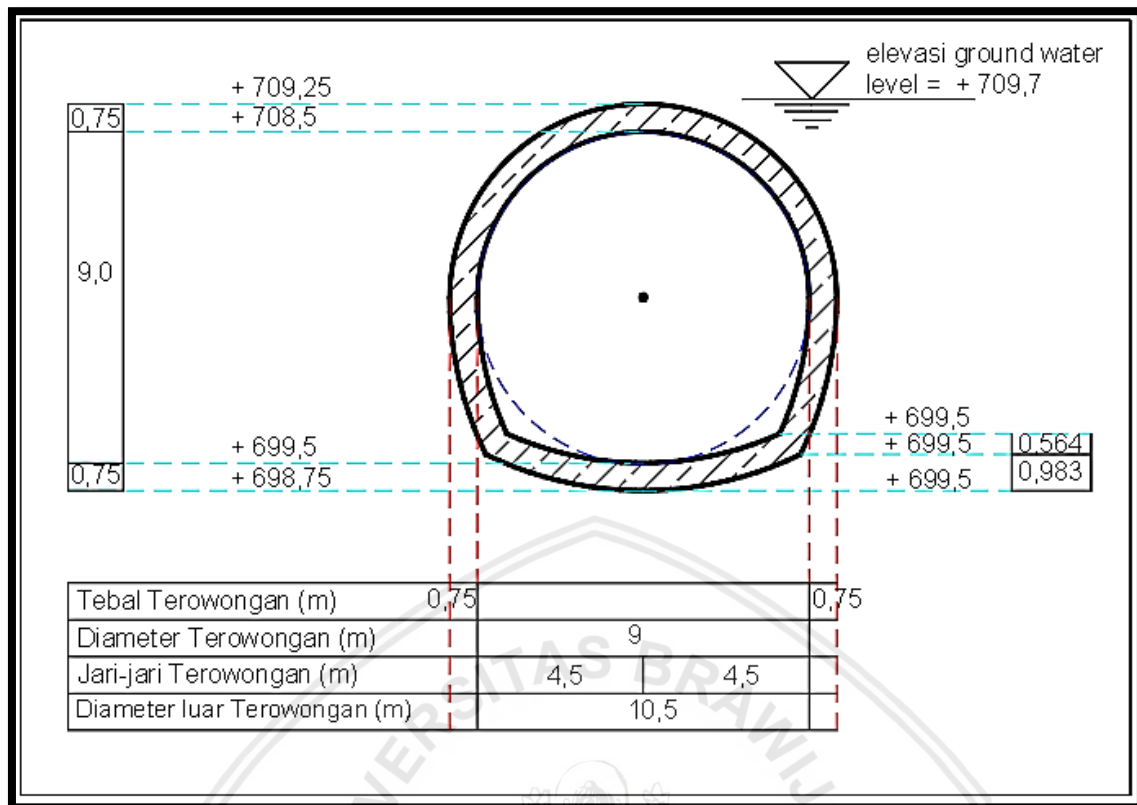
Tabel 4.30

Sketsa Rencana pada Terowongan Pengelak

	BH 16	BH 17	BH 18
Elevasi dasar terowongan	+699,5	+696,5	+693,5
Elevasi di atas terowongan	+708,5	+705,5	+702,5
RQD	70%	87%	99%

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Dari tabel diatas, maka data yang akan digunakan dalam perencanaan terowongan pengelak pada Bendungan Kualu berdasarkan data BH 16, dikarenakan memiliki kondisi batuan yang paling buruk apabila dibandingkan dengan data lain yang tersedia.



Gambar 4.19 Desain Terowongan Pengelak pada Borehole 16

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Pada gambar 4.5 dapat diketahui bahwa elevasi di atas terowongan adalah +708,5. Apabila dilihat dari data bor yang ada, maka pada elevasi tersebut memiliki RQD = 70 %, sehingga untuk menentukan H_p yang didapat dari tabel 2.9 klasifikasi tinggi muatan batuan (H_p), maka $H_p = (0,2-0,6) (B + H_t)$. Dalam perhitungan dipilih penggunaan rumus $H_p = 0,5 (B + H_t)$, dikarenakan 0,5 merupakan angka yang paling efektif jika dilihat dari nilai RQD 70% dan dikorelasikan pada tabel yang memiliki rentangan 30 – 75 %.

Beban yang bekerja pada terowongan adalah:

1. Tekanan Batuan Vertikal

Merupakan tekanan akibat adanya batuan aktif yang bekerja secara vertikal diatas terowongan. Beban ini berpengaruh pada terowongan yang bisa dikatakan sebagai beban hidup. Sketsa beban batuan vertikal dapat dilihat pada gambar 4.20.

$$q_{bv} = \gamma_{\text{batuan}} \cdot H_p$$

$$B = 9 \text{ m} = 354,331 \text{ inch}$$

$$H_t = 10,5 \text{ m} = 413,386 \text{ inch}$$

$$H_p = 0,5 (B + H_t)$$

$$= 0,5 (354,331 + 413,386)$$

$$= 383,859 \text{ inch}$$

$$= 9,75 \text{ m}$$

Perhitungan γ_{batuan} , dilakukan korelasi dengan n spt pada data bor log. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

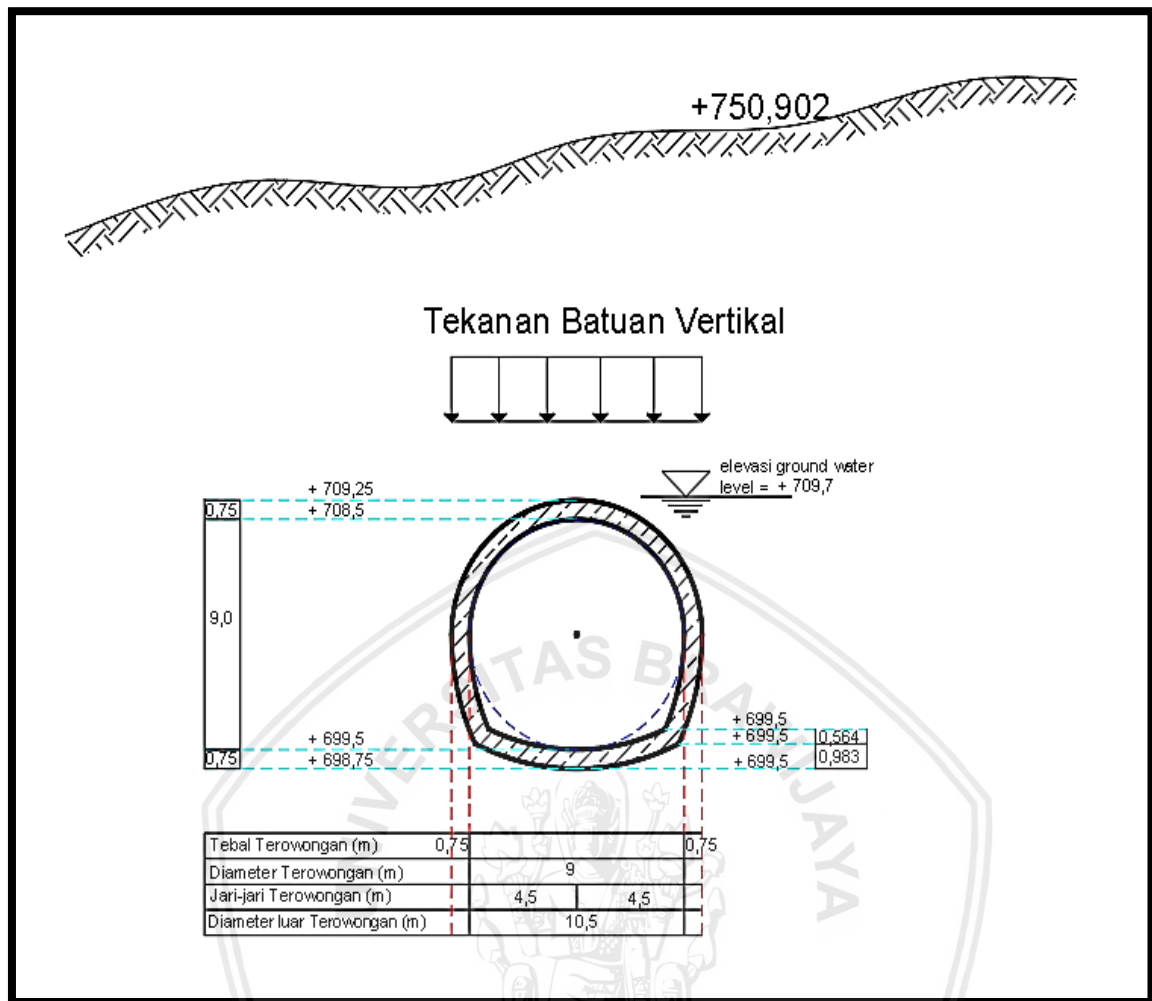
Tabel 4.31
Korelasi N SPT

SPT N-value	0 to 2	2 to 4	4 to 8	8 to 16	16 to 32	>32
Consistency	very soft	soft	medium	stiff	very stiff	hard
lb / ft2	0 to 250	250 to 500	500 to 1000	1000 to 2000	2000 to 4000	>4000
Unconfined Comp. test	kPa	0 to 25	25 to 50	50 to 100	100 to 200	200 to >400
Unit weight	pcf	<100	100 to 120	110 to 125	115 to 130	120 to >130
	kN/m3	<15,7	15,7 to 18,8	17,3 to 19,6	18,1 to 20,4	18,8 to >20,4

Sumber: Research Gate (2019, p.8)

Dari tabel dapat diketahui korelasi Antara N SPT dengan *unit weight*. Kemudian dari data bor log, diketahui pada *borehole* 16 pada kedalaman 41 m didapatkan nilai N SPT > 50. Sehingga pada tabel digunakan untuk nilai N > 32, maka nilai dari $\gamma_{\text{batuan}} > 20,4$, digunakan nilai $\gamma_{\text{batuan}} = 23 \text{ kN/m}^3$.

$$\begin{aligned} q_{bv} &= \gamma_{\text{batuan}} \cdot H_p \\ &= 23 \cdot 9,75 \\ &= 22,425 \text{ ton/m} \end{aligned}$$



Gambar 4.20 Tekanan Batuan Vertikal

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

2. Tekanan Batuan Horizontal

Merupakan tekanan dari batuan di sekitar terowongan yang bekerja dalam arah horizontal terowongan pengelak. perlu diperhitungkan agar terowongan tetap berada dalam kondisi yang statis dan tidak bergerak ke arah horizontal. Tekanan batuan horizontal dihitung dalam kondisi normal dan kondisi gempa. Sketsa tekanan batuan horizontal (kondisi normal) dapat dilihat pada gambar 4.22.

a. Kondisi normal

$$\begin{aligned}
 H_p &= 0,5 (B + H_t) \\
 &= 0,5 (354,331 + 413,386) \\
 &= 383,859 \text{ inch} \\
 &= 9,75 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Koefisien tekanan tanah aktif (K_a) menggunakan rumus coulomb.

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

$$= 0,815$$

dimana,

ϕ = sudut bagi dalam tanah (°) = 30°

δ = sudut kemiringan tegak lurus tegangan = 45°

α = 0°

Tekanan tanah aktif:

$$Pa_2 = K_a \times \gamma_{\text{batuan}} \times h_t$$

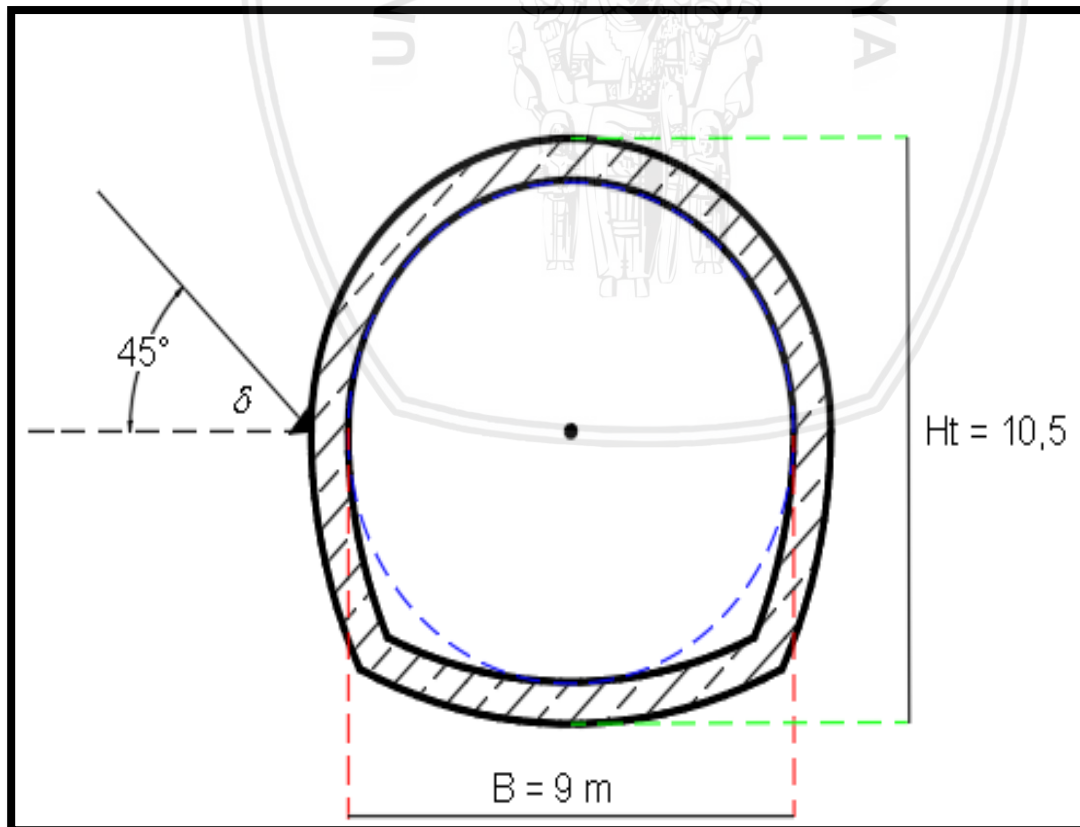
$$= 0,815 \times 2,3 \times 10,5$$

$$= 17,543 \text{ t/m}$$

$$Pa_1 = K_a \times \gamma_{\text{batuan}} \times (h_p + h_t)$$

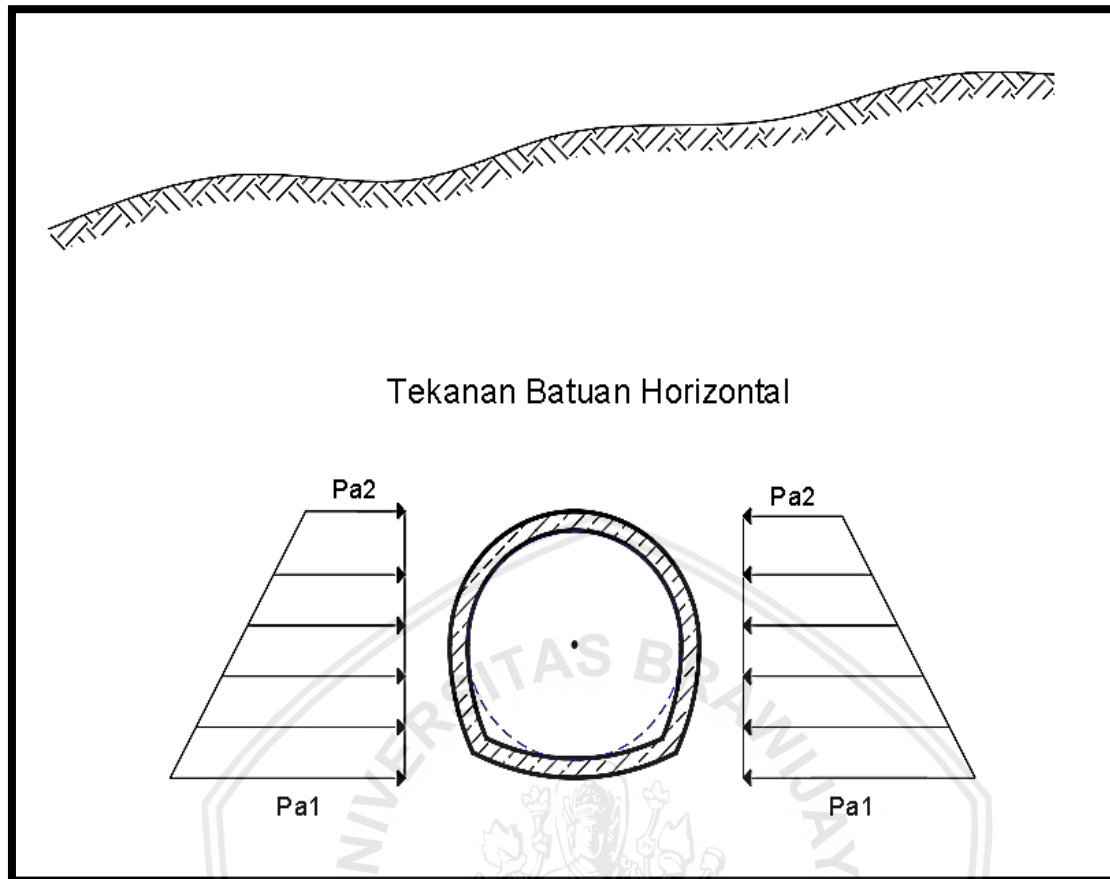
$$= 0,815 \times 2,3 \times (9,75 + 10,5)$$

$$= 33,83 \text{ t/m}$$



Gambar 4.21 Sketsa δ pada Terowongan Pengelak

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

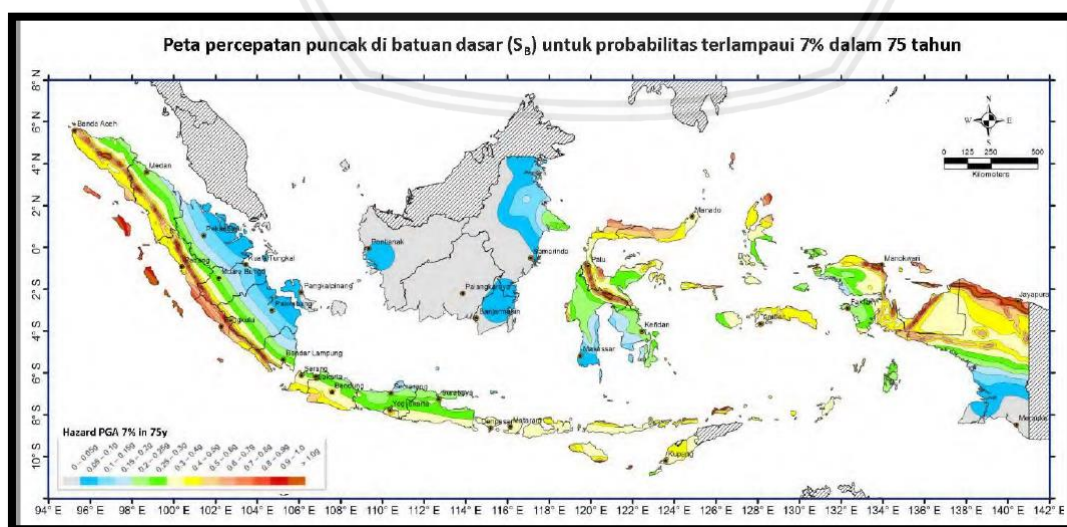


Gambar 4.22 Diagram Tekanan Batuan Horizontal

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

b. Kondisi gempa

Untuk perhitungan kondisi gempa, dilakukan perhitungan koefisien gempa terlebih dahulu. Sketsa tekanan batuan horizontal (kondisi gempa) dapat dilihat pada gambar 4.23.



Gambar 4.23 Peta Zona Gempa Indonesia 2017

Sumber: BNPB (2017)

Setelah menghitung nilai percepatan gempa melalui Online *PGA Calculator* pada wilayah Kabupaten Toba Samosir.

Tabel 4.32
Nilai Percepatan Gempa

Jenis tanah	50 Tahun			200 Tahun			1000 Tahun		
	PBA	F _{PGA}	PSA	PBA	F _{PGA}	PSA	PBA	F _{PGA}	PSA
Batuan	0,102	1	0,102	0,187	1	0,187	0,303	1	0,303
Tanah keras	0,102	1,2	0,123	0,187	1,2	0,225	0,303	1,097	0,332
Tanah sedang	0,102	1,596	0,163	0,187	1,426	0,267	0,303	1,197	0,363
Tanah Lunak	0,102	2,483	0,254	0,187	1,803	0,337	0,303	1,191	0,361

Sumber: Online *PGA Calculator*, 2019

Maka dari tabel 4.8 diperoleh PBA, F_{PGA}, dan PSA. Dalam perhitungan koefisien gempa untuk terowongan pengelak digunakan kala ulang gempa 1000 tahun. Kemudian perhitungan percepatan gempa dasar sebagai berikut:

$$PGA_M = F_{PGA} \times PSA$$

$$= 1 \times 0,303$$

$$= 0,303 \text{ g}$$

$$Kh = 0,303 \text{ g / g}$$

$$= 0,303$$

Keterangan:

PGA_M = nilai percepatan puncak dipermukaan tanah berdasarkan klasifikasi site

F_{PGA} = faktor amplifikasi untuk PGA

PSA = Nilai PGA di batuan dasar (Sb) mengacu pada Peta Gempa Indonesia

Kh = Koefisien gempa

$$Hp = 0,5 (B + Ht)$$

$$= 0,5 (354,331 + 413,386)$$

$$= 383,859 \text{ inch}$$

$$= 9,75 \text{ m}$$

Koefisien tekanan tanah aktif, kondisi gempa (Kae) menggunakan rumus Mononobe – Okabe.

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

$$= 0,901$$

Dimana,

$$\theta_0 = \arctan k_h = 16,857^\circ$$

$$\phi = \text{sudut bagi dalam tanah } (^\circ) = 30^\circ$$

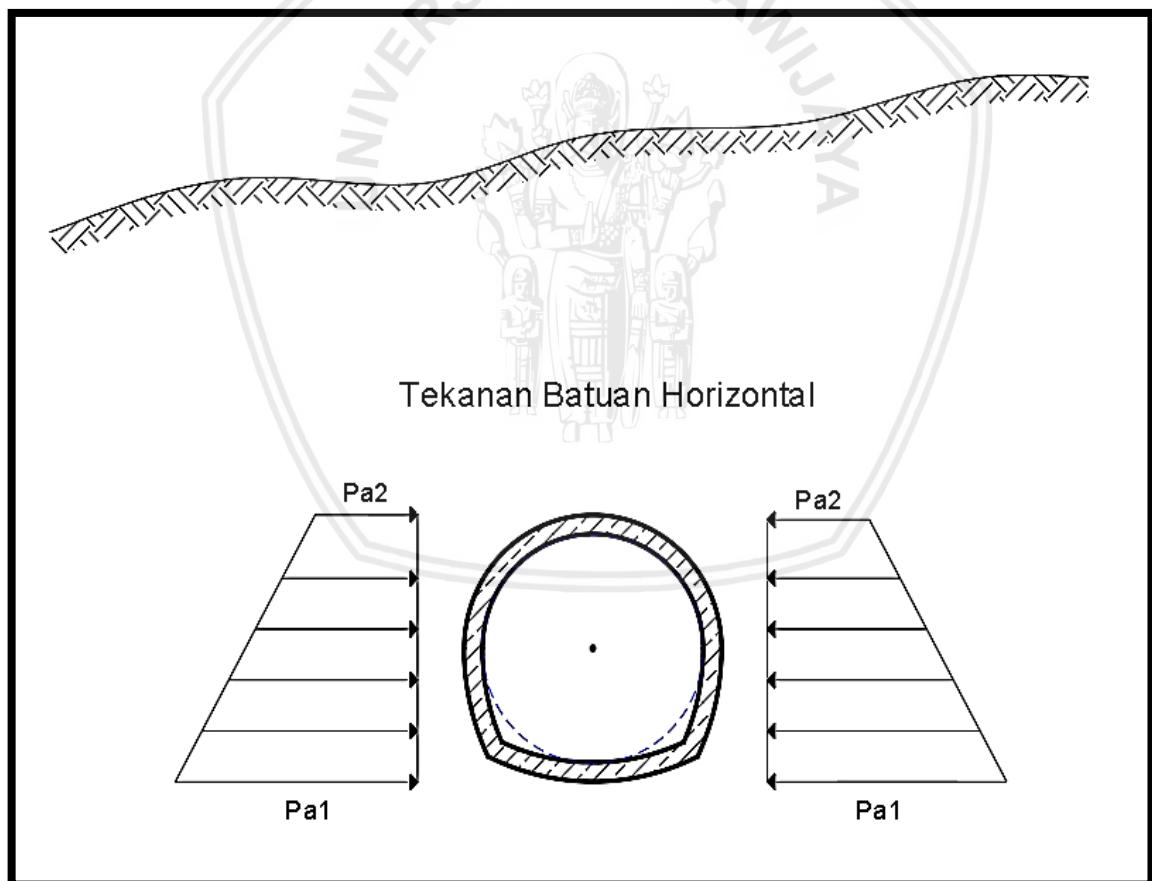
$$\delta = \text{sudut kemiringan tegak lurus tegangan} = 45^\circ$$

$$\alpha = 0^\circ$$

Tekanan tanah aktif (kondisi gempa)

$$\begin{aligned} Pa_2 &= K_{ae} \times \gamma_{\text{batuan}} \times h_t \\ &= 0,901 \times 2,3 \times 10,5 \\ &= 19,394 \text{ t/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Pa_1 &= K_{ae} \times \gamma_{\text{batuan}} \times (h_p + h_t) \\ &= 0,901 \times 2,3 \times (9,75 + 10,5) \\ &= 39,69 \text{ t/m} \end{aligned}$$



Gambar 4.24 Tekanan Batuan Horizontal (Gempa)

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

3. Tekanan Air Horizontal

Merupakan tekanan air yang bekerja secara horizontal dari luar terowongan pengelak.

Sketsa tekanan air horizontal dapat dilihat pada gambar 4.25.

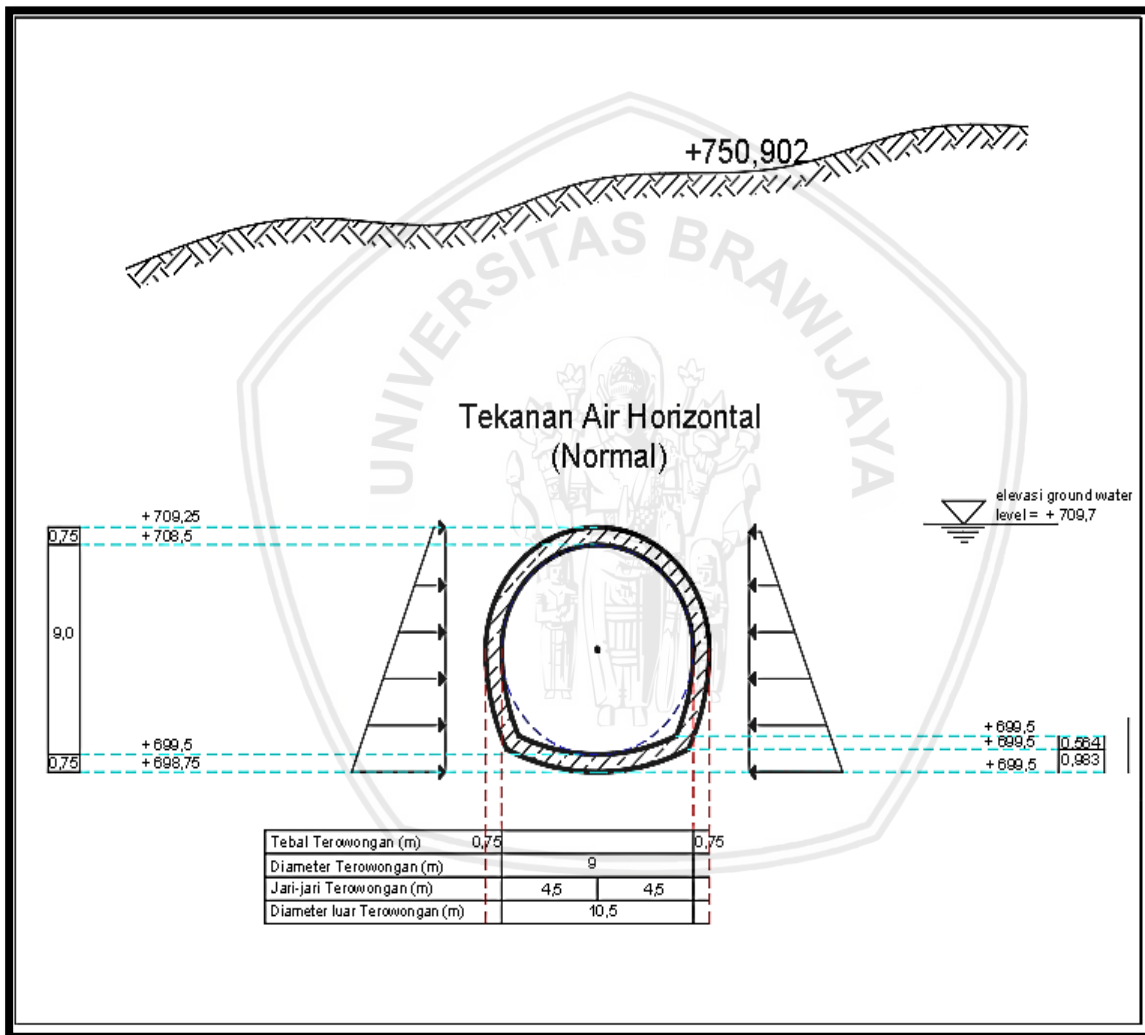
H_w = elevasi muka air tanah – elevasi puncak terowongan

$$= 0,45 \text{ m}$$

P_{wh} = $\gamma_w \cdot (H_w + H_t)$

$$= 1 \cdot (0,45 + 10,5)$$

$$= 10,95 \text{ ton/m}$$



Gambar 4.25 Tekanan Air Horizontal

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

4. Tekanan Air Vertikal

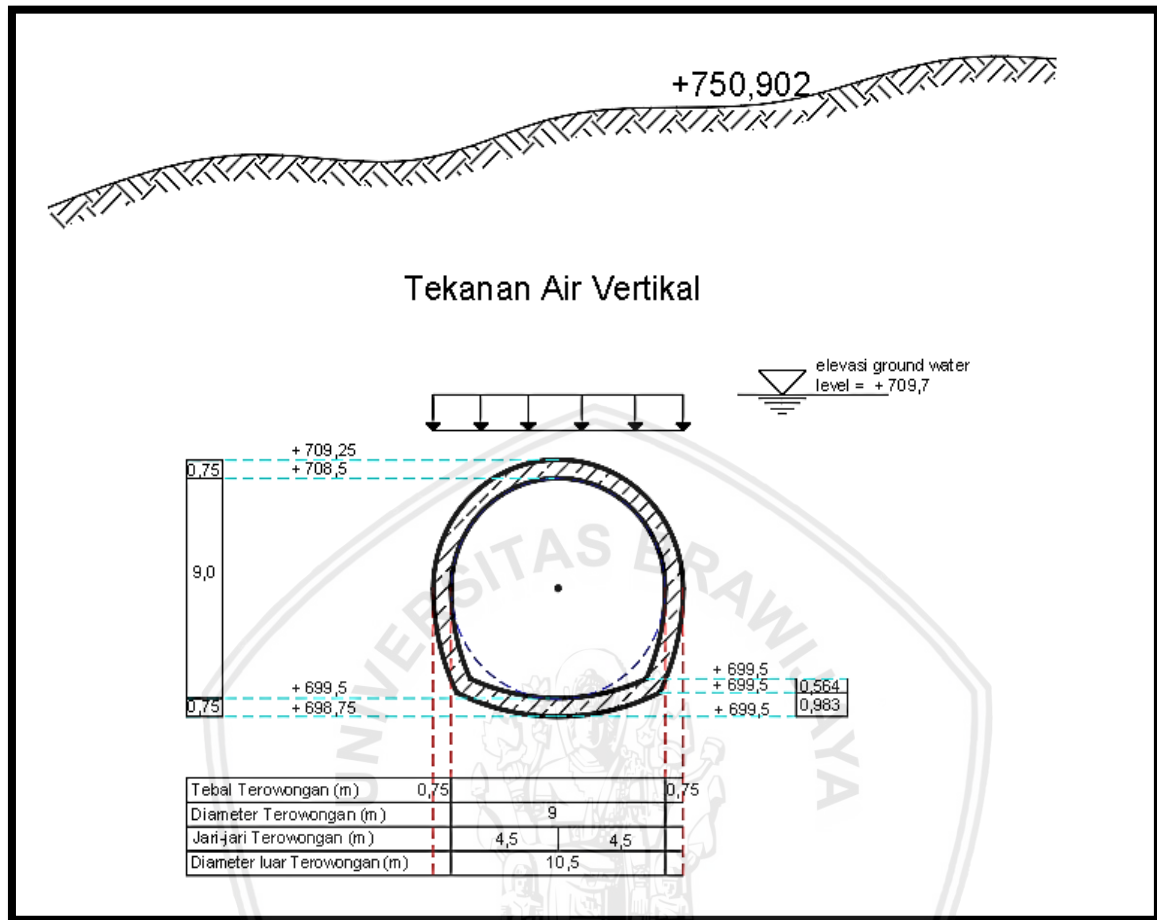
Tekanan yang diakibatkan oleh adanya air tanah di atas terowongan. beban ini termasuk beban hidup.

H_w = tinggi air di atas terowongan hingga permukaan

q_{wv} = $\gamma_w \cdot H_w$

$$= 1 \cdot 41,625$$

$$= 41,625 \text{ ton/m}$$



Gambar 4.26 Diagram Tekanan Air Vertikal

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

5. Berat Akibat Konstruksi Terowongan Sendiri

Merupakan beban dengan besar yang konstan dan berada pada posisi yang sama setiap saat. Beban ini termasuk kedalam beban mati.

$$q = \gamma_c \cdot t$$

$$= 2,4 \cdot 0,75$$

$$= 1,8 \text{ ton/m}$$

Keterangan:

γ_c = berat isi beton ($t \cdot m^{-3}$)

t = tebal terowongan (m)

6. Tekanan Air dalam Terowongan

Tekanan ini memiliki pengaruh pada pengoperasian terowongan. perlu diperhitungkan agar terowongan mampu menahan tekanan air dari dalam. Sketsa tekanan air dalam terowongan dapat dilihat pada gambar 4.27.

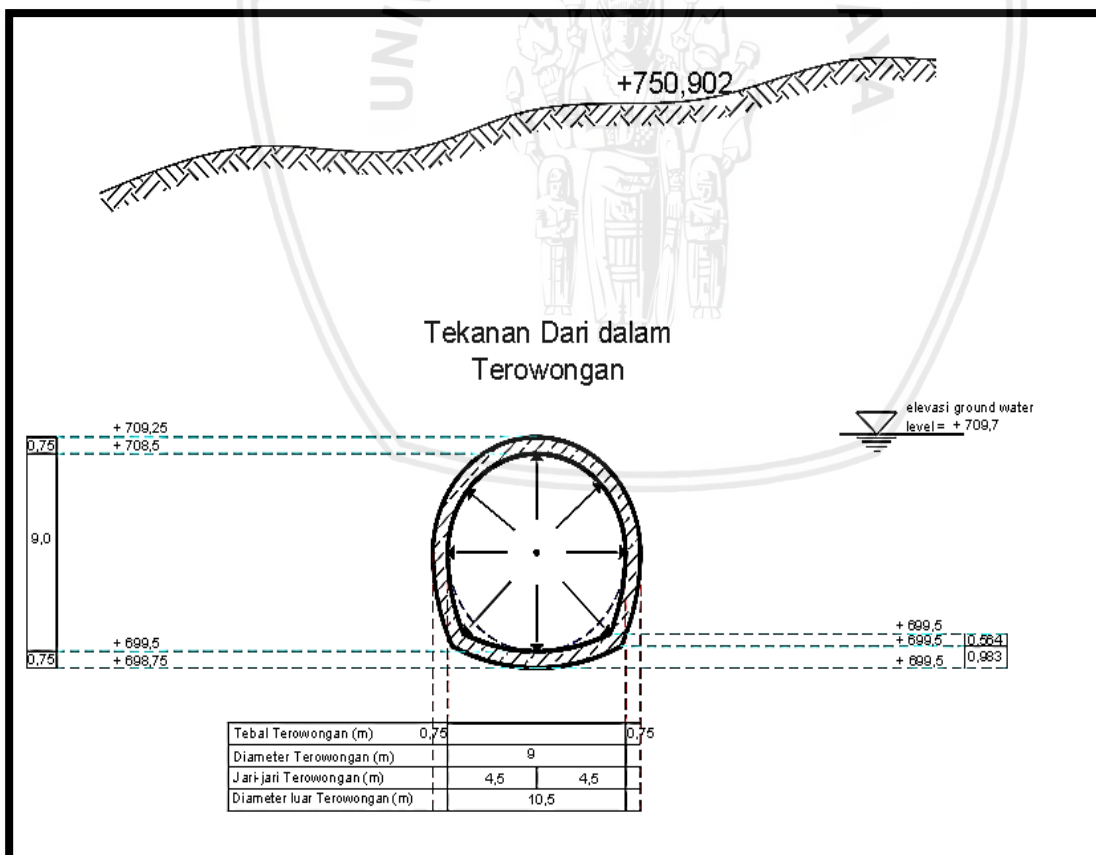
$$\begin{aligned} V \text{ per } 1 \text{ m} &= A \cdot 1 \text{ m} \cdot 1000 \\ &= 67,173 \cdot 1 \text{ m} \cdot 1000 \\ &= 67173 \text{ liter} \end{aligned}$$

Maka, $V \text{ per } 1 \text{ m} = 67,173 \text{ ton}$

$$\begin{aligned} P &= \gamma_w \cdot g \cdot h \\ &= 1000 \cdot 9,81 \cdot 9 \\ &= 8,829 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

Keterangan:

- γ_w = berat jenis air
- g = gravitasi (m/s^2)
- h = tinggi muka air (m)



Gambar 4.27 Tekanan Air dari Dalam

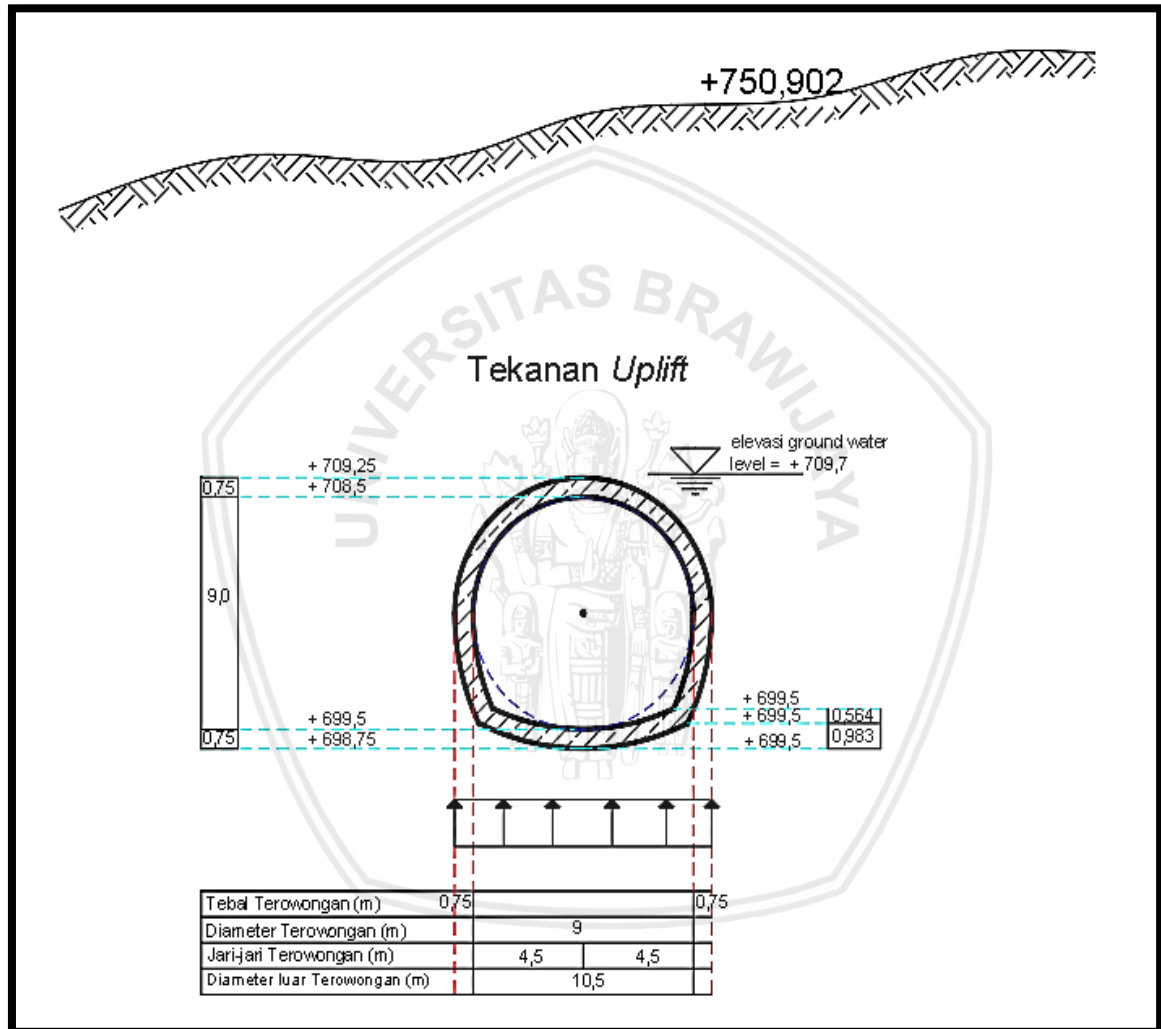
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

7. Tekanan Uplift

Tekanan ini berasal dari bawah terowongan yang bekerja secara vertikal ke atas. perlu diperhitungkan agar terowongan berada dalam kondisi statis dan tidak bergerak ke atas.

Sketsa tekanan air horizontal dapat dilihat pada gambar 4.28.

$$\begin{aligned}
 P &= \gamma_w \cdot H_t \\
 &= 1 \cdot 10,5 \\
 &= 10,5 \text{ ton/m}
 \end{aligned}$$

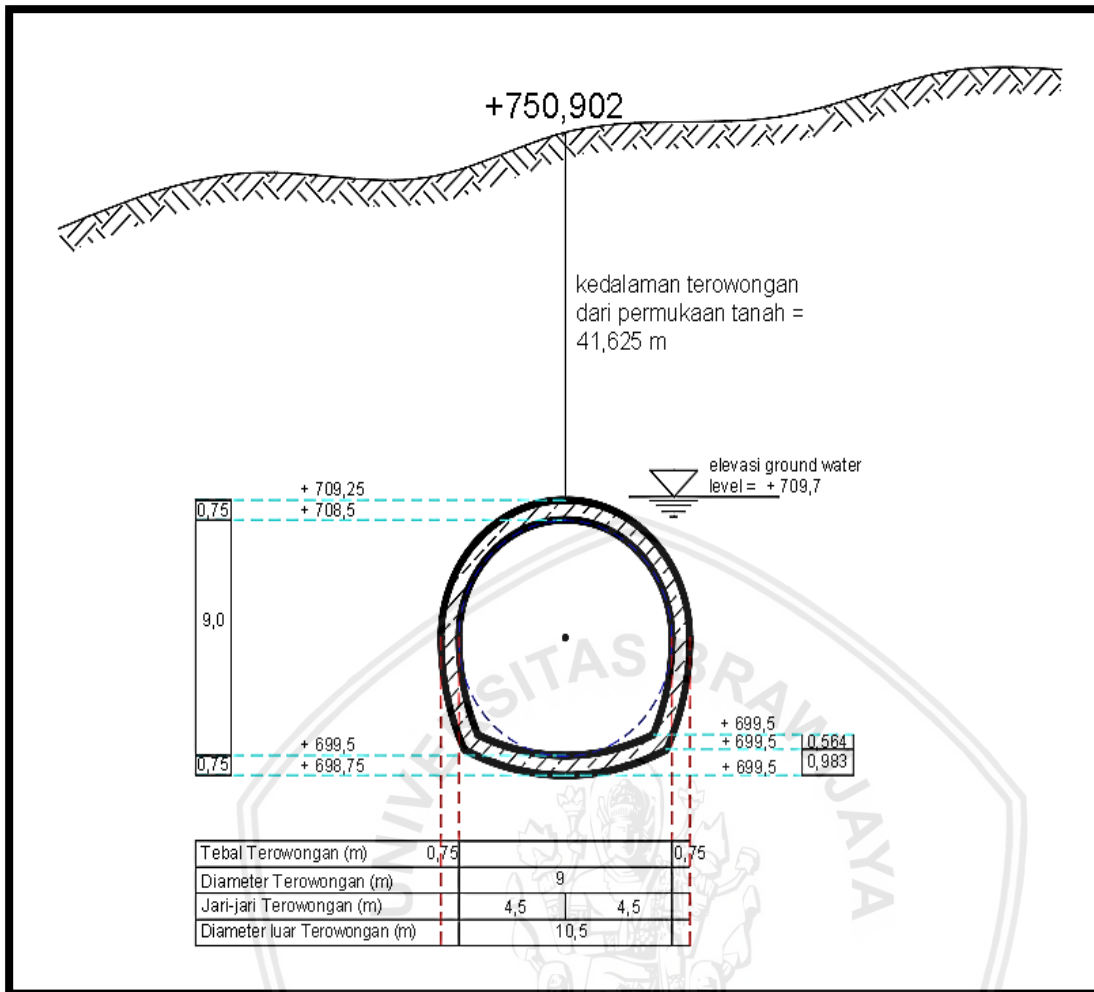


Gambar 4.28 Tekanan Uplift

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

8. Beban Kendaraan

Beban kendaraan berpengaruh pada terowongan apabila terowongan berada pada kedalaman kurang dari 10 ft atau sekitar 3 m. karena lokasi terowongan berada > 10 ft, maka beban kendaraan tidak diperhitungkan pada perencanaan. (*Structural Design for Tunnel*, Doyle Drive, hal.11).



Gambar 4.29 Kedalaman Terowongan dari Permukaan Tanah

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

9. Reaksi Pondasi

Reaksi pondasi terjadi akibat adanya gaya vertikal. Besarnya reaksi yang dihasilkan adalah :

- Akibat berat sendiri $= A \times \gamma_c$
 $= 23,8046 \times 2,4$
 $= 57,131 \text{ ton}$
- Akibat tanah di atas terowongan $= q \times B$
 $= 17,258 \times 9$
 $= 155,322 \text{ ton}$
- Akibat air di dalam terowongan $= A \times \gamma_w$
 $= 67,173 \times 1$
 $= 67,173 \text{ ton}$

$$\begin{aligned}
 - \text{ Akibat gaya angkat} &= 10,5 \times B \\
 &= 94,5 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

- Kondisi setelah dibangun

Pada kondisi ini, belum terdapat air di dalam terowongan pengelak, maka beban yang bekerja adalah:

Tabel 4.33

Reaksi Pondasi Kondisi Setelah Dibangun

No	Uraian	Pv (ton)
1.	Berat Sendiri	57,131
2.	Akibat tanah di atas terowongan	155,322
Total		212,453

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

$$B = 9 \text{ m}$$

$$R_v = P_v / B$$

$$= 212,453 / 9$$

$$= 23,606 \text{ ton/m}$$

- Kondisi saat beroperasi

Pada kondisi ini, terowongan pengelak sudah beroperasi, maka beban yang bekerja adalah:

Tabel 4.34

Reaksi Pondasi Kondisi Pengoperasian

No	Uraian	Pv (ton)
1.	Berat Sendiri	57,131
2.	Akibat tanah di atas terowongan	155,322
3.	Gaya Angkat	-94,5
4.	Berat Air di dalam terowongan	67,173
Total		185,126

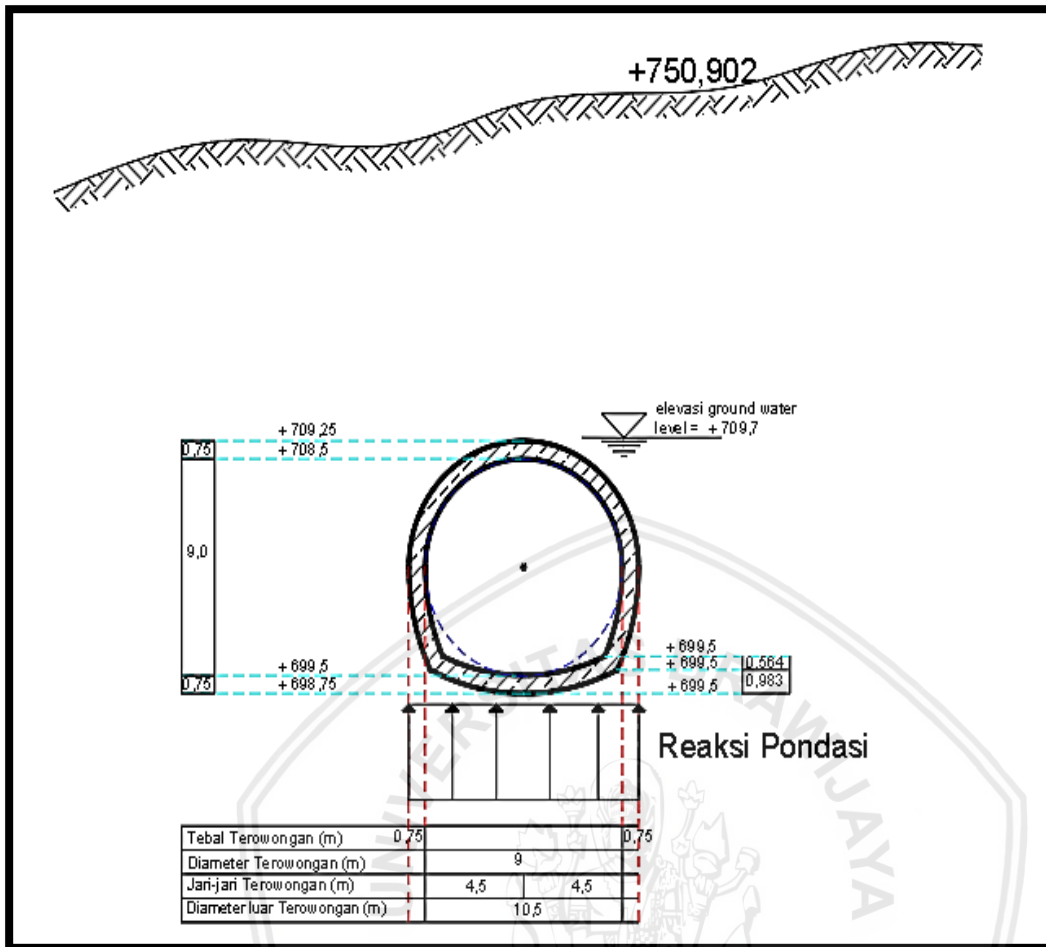
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

$$B = 9 \text{ m}$$

$$R_v = P_v / B$$

$$= 185,126 / 9$$

$$= 20,5696 \text{ ton/m}$$



Gambar 4.30 Diagram Reaksi Pondasi

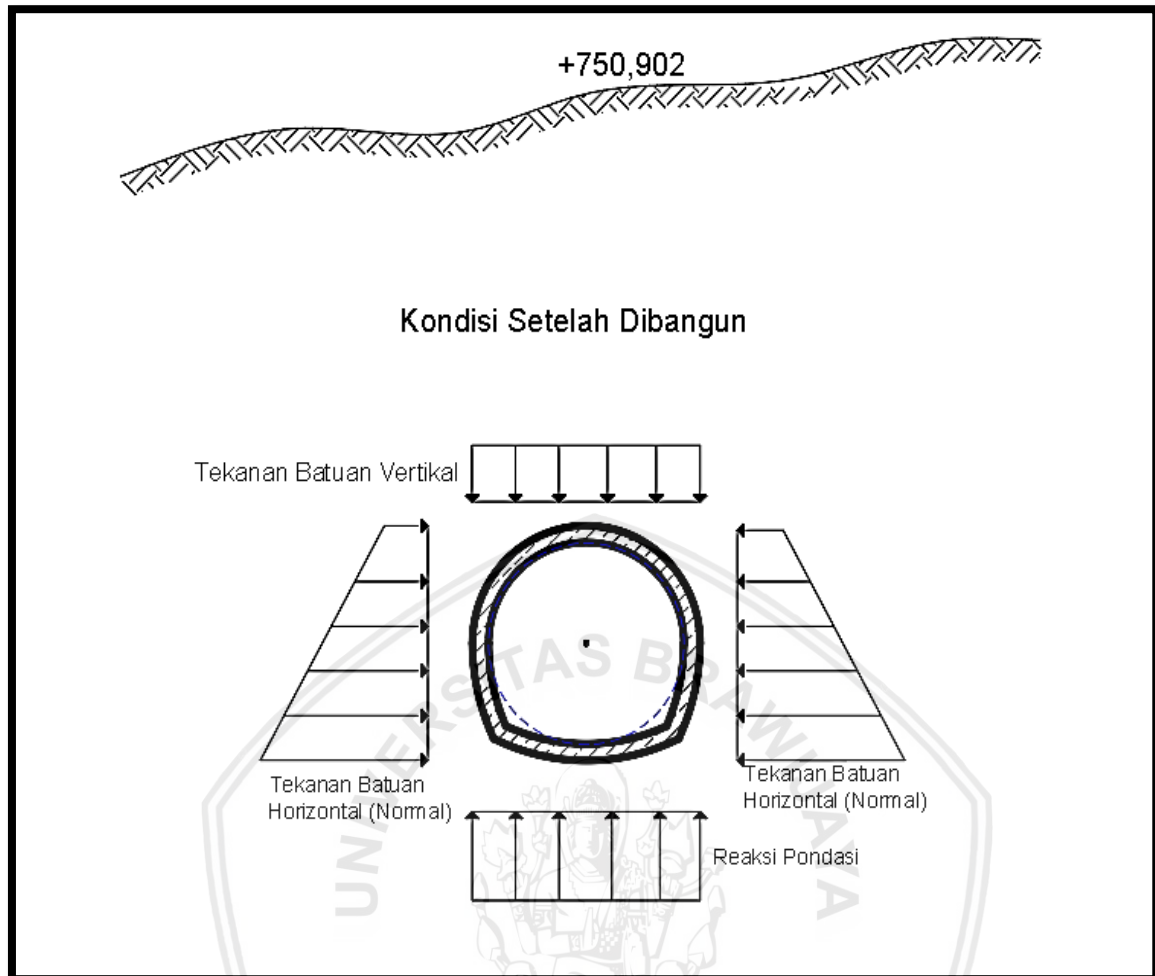
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

4.8 Kondisi Perencanaan

Kondisi 1 : Kasus pembebanan pada saat setelah selesai dibangun (*just after completion*)

1. Kondisi setelah dibangun (*Just After Completion*), beban yang bekerja antara lain :

- Berat sendiri tunnel (*selfweight*)
- Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)
- Tekanan tanah aktif di samping terowongan
- Reaksi akibat beban vertikal

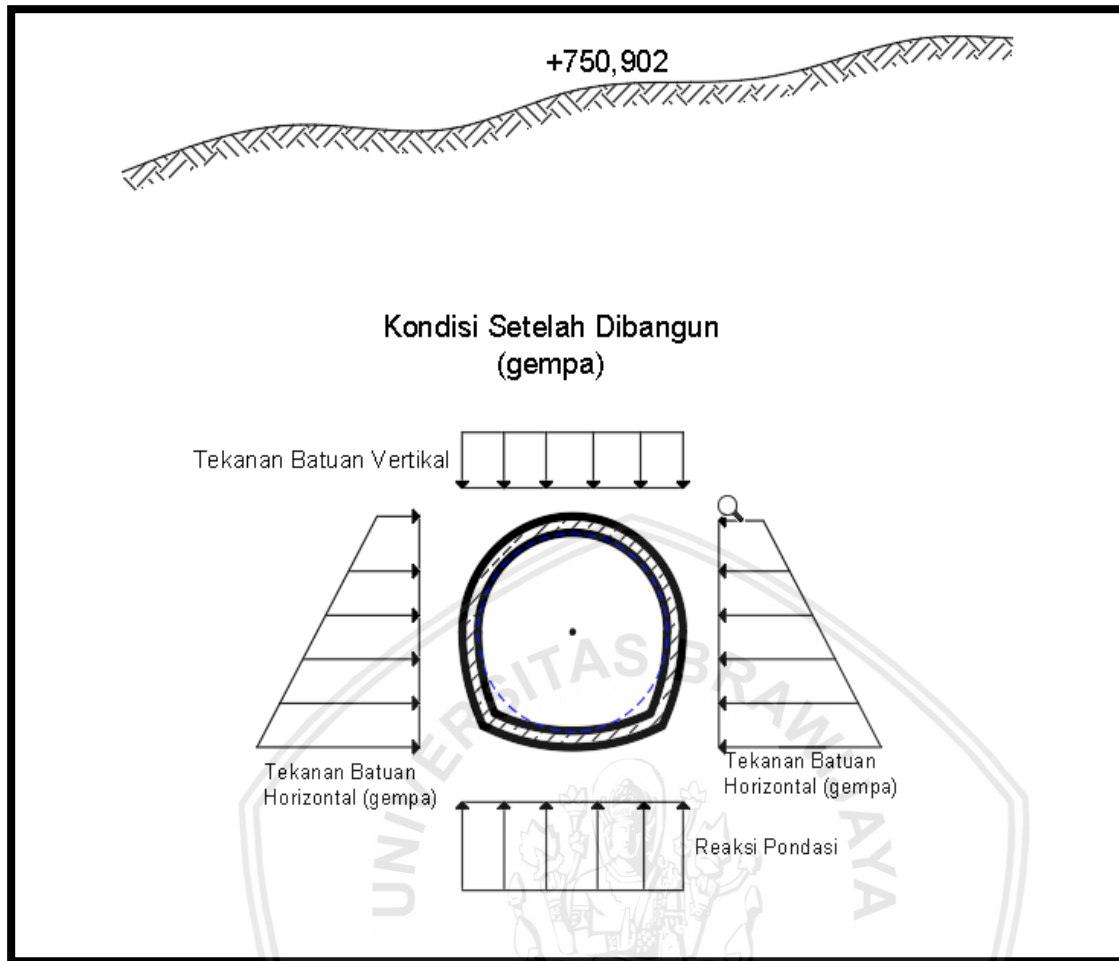


Gambar 4.31 Diagram pada saat Kondisi Setelah Dibangun

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

2. Kondisi setelah dibangun (*Just After Completion*) – gempa, beban yang bekerja antara lain :

- Berat sendiri tunnel (*selfweight*)
- Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)
- Tekanan tanah aktif di samping terowongan
- Reaksi akibat beban vertikal



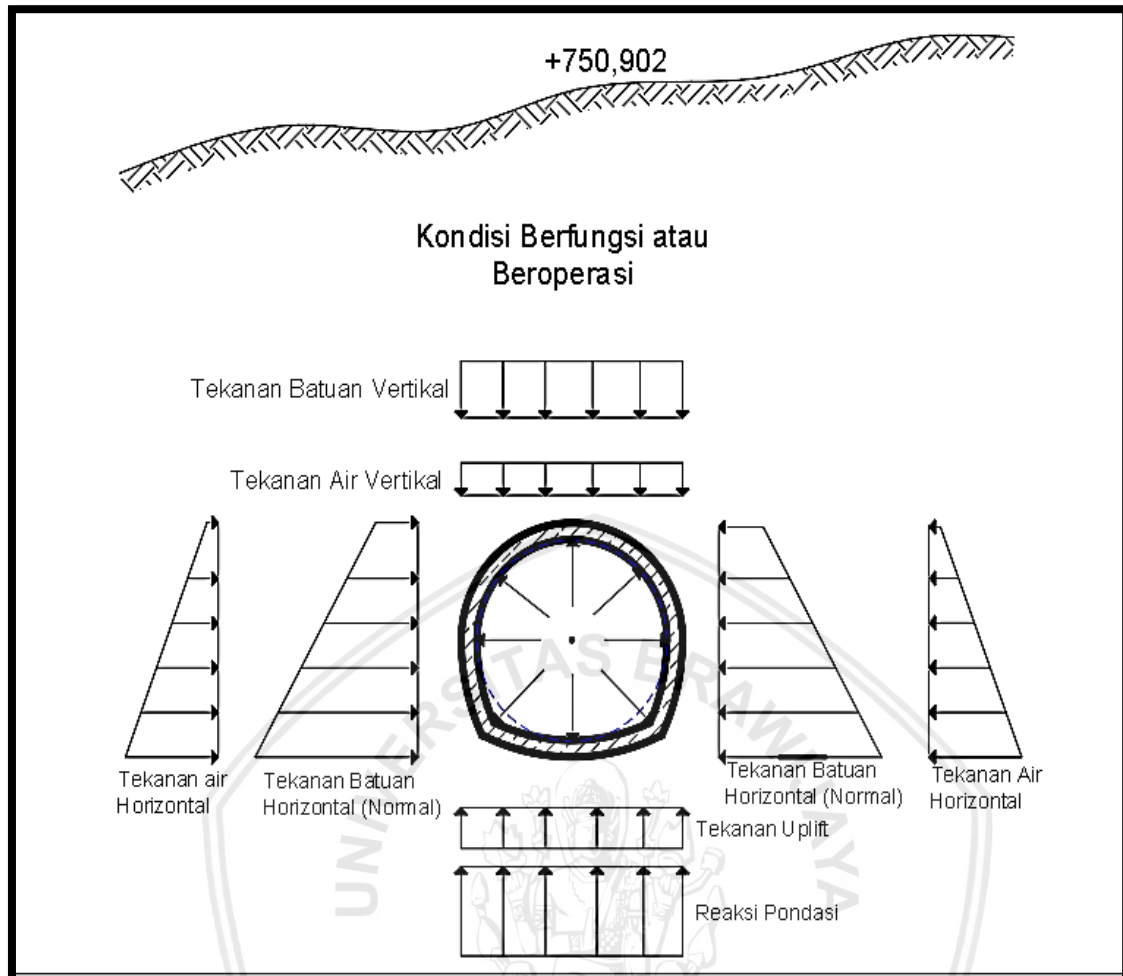
Gambar 4.32 Diagram pada saat Kondisi Setelah Dibangun (Gempa)

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Kondisi 2 : Berfungsi atau beroperasi sebagai terowong pengelak, kondisi air penuh

1. Berfungsi atau beroperasi sebagai terowong pengelak dan kondisi air penuh, beban yang bekerja antara lain :

- Berat sendiri terowong (*selfweight*)
- Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)
- Tekanan air tanah (*external water pressure*)
- Tekanan tanah aktif di samping terowongan
- Gaya angkat (*uplift pressure*)
- Reaksi akibat beban vertikal
- Tekanan air dari dalam terowongan (*internal water pressure*)

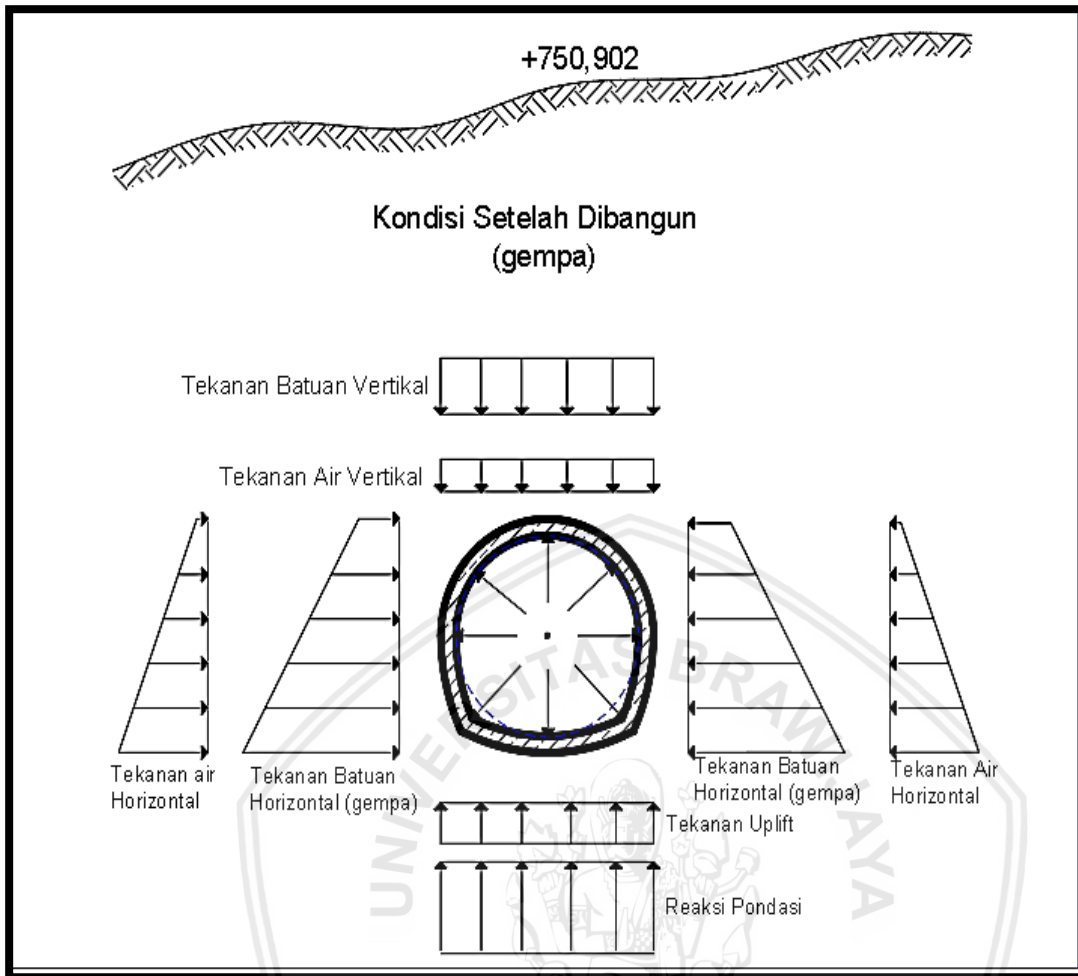


Gambar 4.33 Diagram pada Saat Beroperasi

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

2. Berfungsi atau beroperasi sebagai terowong pengelak dan kondisi air penuh - gempa, beban yang bekerja antara lain :

- Berat sendiri tunnel (*selfweight*)
- Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)
- Tekanan air tanah (*external water pressure*)
- Tekanan tanah aktif di samping terowongan
- Gaya angkat (*uplift pressure*)
- Reaksi akibat beban vertikal
- Tekanan air dari dalam terowongan (*internal water pressure*)

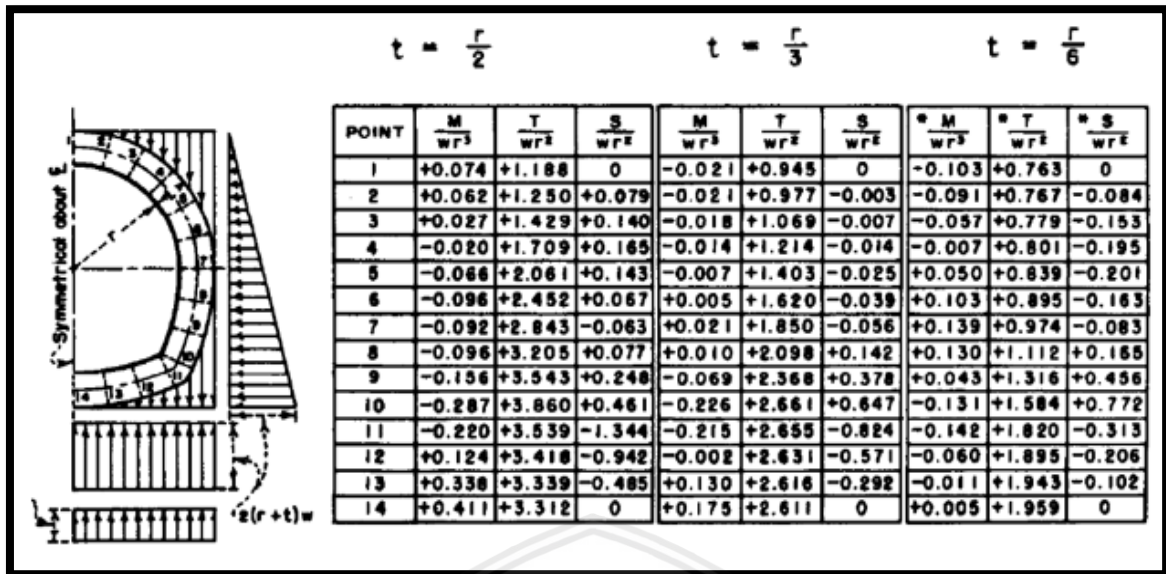


Gambar 4.34 Diagram pada saat Kondisi Setelah Dibangun

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

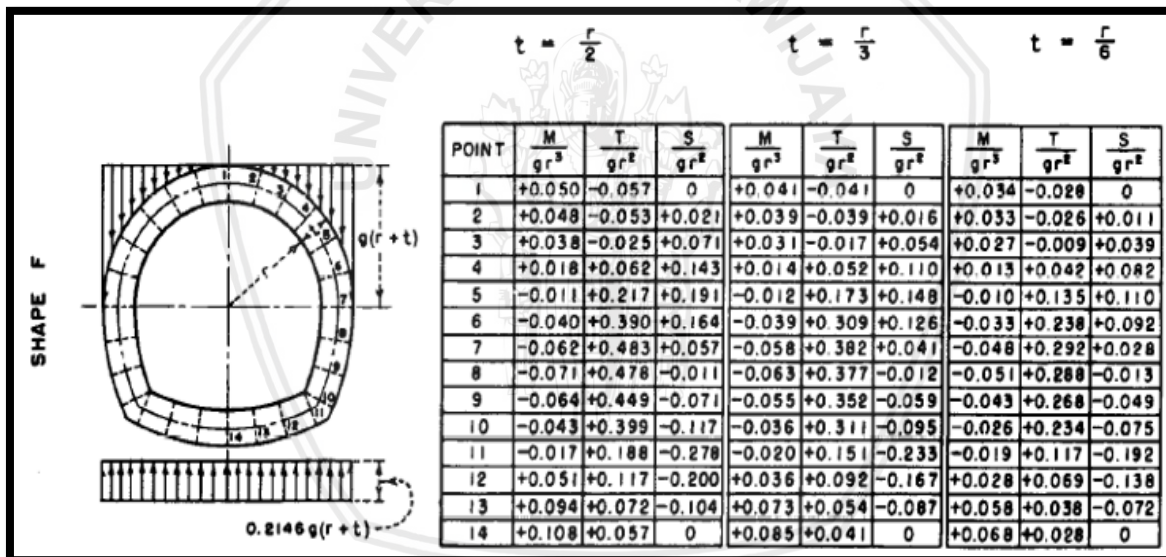
4.9 Perhitungan Momen, Lintang, dan Normal

Perhitungan momen, lintang, dan normal pada perencanaan terowongan pengelak berdasarkan tabel *Beggs Deformation Analysis of Single Barel Conduit*. Nilai dari perhitungan ini nantiinya akan digunakan untuk mendesain tulangan pada terowongan. Untuk koefisien yang akan digunakan dalam perhitungan momen, lintang, dan normal adalah sebagai berikut:



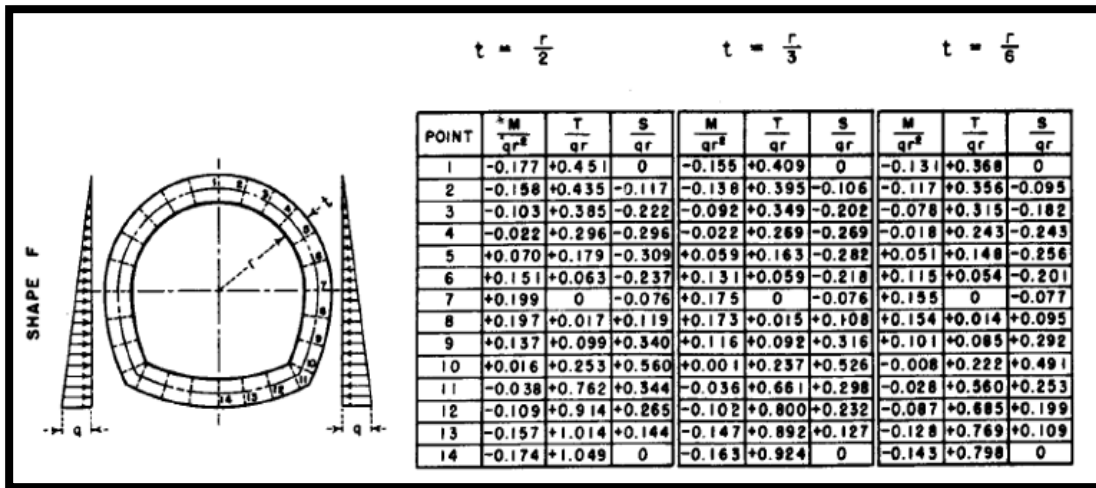
Gambar 4.35 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Berat Sendiri

Sumber : Philips & Allen (1986, p.39)



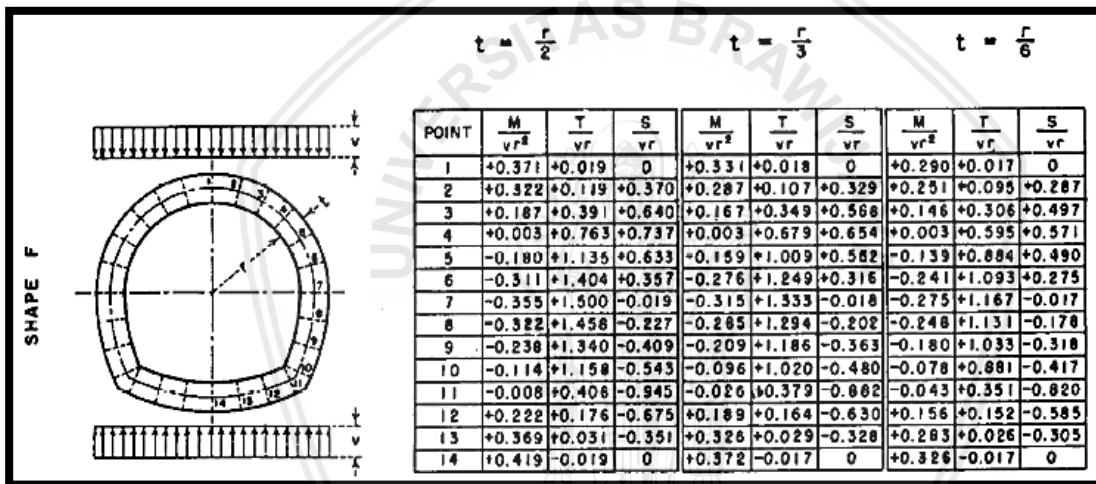
Gambar 4.36 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Batuan Vertikal

Sumber : Philips & Allen (1986, p.31)



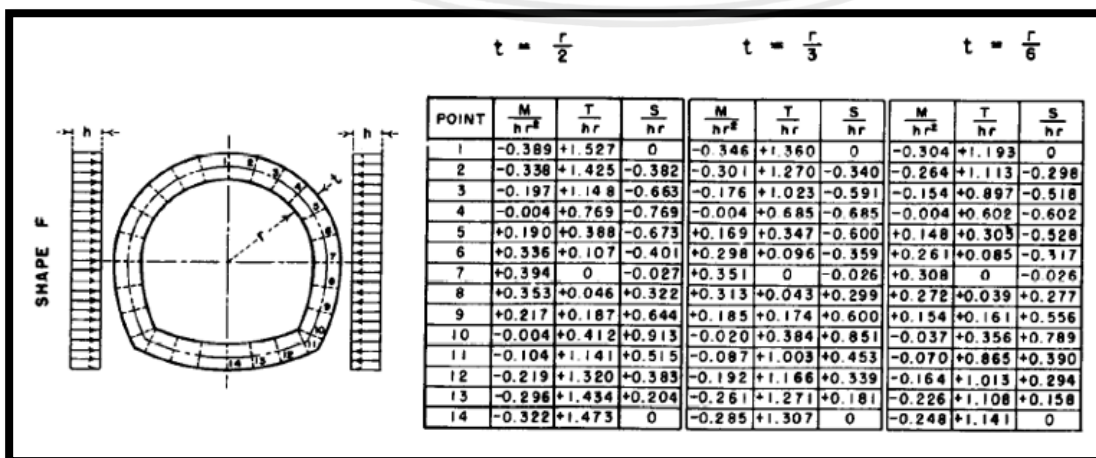
Gambar 4.37 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Air Horizontal

Sumber : Philips & Allen (1986, p.35)



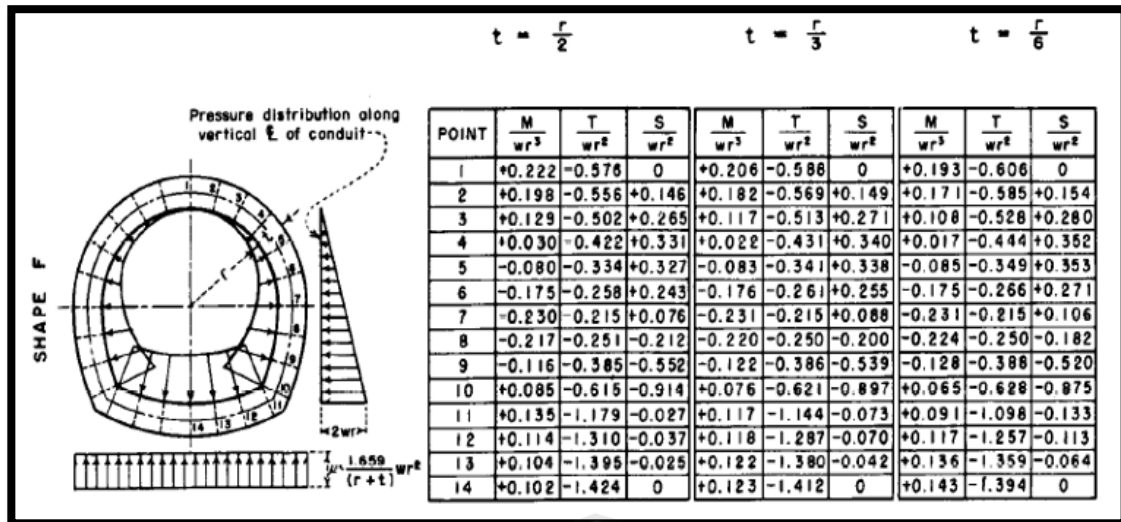
Gambar 4.38 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Air Vertikal

Sumber : Philips & Allen (1986, p.25)



Gambar 4.39 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Batuan Horizontal

Sumber : Philips & Allen (1986, p.34)



Gambar 4.40 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Air dari Dalam

Sumber : Philips & Allen (1986, p.34)

4.9.1 Kondisi Setelah Dibangun (*Just After Completion*)

Kondisi setelah dibangun (*Just After Completion*), beban yang bekerja antara lain :

- Berat sendiri tunnel (*selfweight*)

Tabel 4.35

Momen, Normal, dan Lintang Beban Akibat Berat Sendiri Kondisi Setelah Dibangun

point	Momen	Normal	Lintang
1	-16,895	27,811	0,000
2	-14,926	27,957	-3,062
3	-9,349	28,395	-5,577
4	-1,148	29,196	-7,108
5	8,201	30,582	-7,326
6	16,895	32,623	-5,941
7	22,799	35,502	-3,025
8	21,323	40,532	5,650
9	7,053	47,968	16,621
10	-21,487	57,737	28,139
11	-23,292	66,339	-11,409
12	-9,842	69,073	-7,509
13	-1,804	70,895	-3,718
14	0,820	71,406	0,000

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Contoh perhitungan momen menggunakan tabel Beggs (Pada Point 1):

Pada tabel Beggs dipilih koefisien dari kolom dengan ketebalan $t = r/6$, sedangkan beban diambil dari perhitungan beban akibat berat sendiri.

$$km = -0,103$$

$$W = \gamma c \cdot t$$

$$= 2,4 \cdot 0,75$$

$$= 1,8 \text{ ton/m}$$

$$M = k_m \cdot W \cdot r^3$$

$$= -0,013 \cdot 1,8 \cdot 4,5^3$$

$$= -16,895 \text{ ton} \cdot \text{m}$$

Keterangan:

M = Momen persatuan panjang pada segmen dinding (ton . m)

k_m = Koefisien momen

W = Beban yang bekerja (ton.m⁻²)

R = Jari-jari terowongan (m)

Untuk menentukan besarnya gaya lintang menggunakan rumus:

$$k = 0,763$$

$$W = \gamma_c \cdot t$$

$$= 2,4 \cdot 0,75$$

$$= 1,8 \text{ ton/m}$$

$$D = k \cdot W \cdot r^2$$

$$= 0 \cdot 1,8 \cdot 4,5^2$$

$$= 0 \text{ ton}$$

Keterangan:

D = Gaya lintang pada segmen dinding (ton)

k = Koefisien gaya lintang

W = Beban yang bekerja (ton.m⁻²)

R = Jari-jari terowongan (m)

Untuk menentukan besarnya gaya normal menggunakan rumus:

$$k = 0$$

$$W = \gamma_c \cdot t$$

$$= 2,4 \cdot 0,75$$

$$= 1,8 \text{ ton/m}$$

$$N = k \cdot W \cdot r^2$$

$$= 27,811 \text{ ton}$$

Keterangan:

N = Gaya normal pada segmen dinding (ton)

k = Koefisien gaya normal

W = Beban yang bekerja (ton.m⁻²)

R = Jari-jari terowongan (m)

- Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)
- Tekanan batuan vertikal dan reaksi akibat beban vertikal

Tabel 4.36

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Vertikal untuk Kondisi setelah Dibangun

point	Tekanan batuan vertikal		
	Momen	Normal	Lintang
1	61,92627	-11,3329	0
2	60,10491	-10,5234	4,452216
3	49,17675	-3,64272	15,78513
4	23,67769	19,42785	33,18924
5	-18,2136	54,64083	44,52216
6	-60,1049	96,32976	37,23671
7	-87,4253	118,1861	11,33291
8	-109,706	137,6702	-6,21428
9	-92,4972	128,1098	-23,4231
10	-55,9285	111,857	-35,8516
11	-40,8708	55,92852	-91,7801
12	60,23071	32,98348	-65,967
13	124,7636	18,16482	-34,4175
14	146,2746	13,3846	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

- Tekanan tanah aktif di samping terowongan
- Tekanan Batuan Horizontal

Tabel 4.37

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Horizontal untuk Kondisi setelah Dibangun

point	Tekanan Batuan Horizontal		
	Momen	Normal	Lintang
1	-208,257	181,6164	0
2	-180,855	169,4376	-45,366
3	-105,499	136,5548	-78,8577
4	-2,74023	91,64547	-91,6455
5	101,3885	46,43168	-80,3801
6	178,8	12,93998	-48,2585
7	210,9977	0	-3,95811
8	186,3356	5,937165	42,1691
9	105,4989	24,50984	84,64266
10	-25,3471	54,19566	120,1134
11	-47,954	131,6833	59,37165
12	-112,349	154,2141	44,75709
13	-154,823	168,6764	24,05313
14	-169,894	173,7001	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.38

Total Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang untuk Kondisi setelah Dibangun

point	Total		
	Momen	Normal	Lintang
1	-163,226	198,0948	0
2	-135,677	186,8713	-43,9756
3	-65,672	161,3066	-68,6495
4	19,789	140,2698	-65,5640
5	91,376	131,6541	-43,1844
6	135,590	141,8925	-16,9631
7	146,372	153,6884	4,3494
8	97,953	184,1398	41,6045
9	20,055	200,5878	77,8408
10	-102,763	223,7895	112,4012
11	-112,116	253,9508	-43,8173
12	-61,960	256,2703	-28,7186
13	-31,864	257,7364	-14,0823
14	-22,800	258,4903	0
max	-163,226	258,4903	112,4012

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

4.9.2 Kondisi setelah dibangun (*Just After Completion*) – gempa

- Berat sendiri tunnel (*selfweight*)

Tabel 4.39

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Berat Sendiri untuk Kondisi setelah Dibangun (Gempa)

point	berat sendiri		
	Momen	Normal	Lintang
1	-16,8946	27,81135	0
2	-14,9263	27,95715	-3,0618
3	-9,34943	28,39455	-5,57685
4	-1,14818	29,19645	-7,10775
5	8,20125	30,58155	-7,32645
6	16,89458	32,62275	-5,94135
7	22,79948	35,5023	-3,02535
8	21,32325	40,5324	5,64975
9	7,053075	47,9682	16,6212
10	-21,4873	57,7368	28,1394
11	-23,2916	66,339	-11,4089
12	-9,8415	69,07275	-7,5087
13	-1,80428	70,89525	-3,7179
14	0,18225	15,8679	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

- Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)
- Tekanan batuan vertikal dan reaksi akibat beban vertikal

Tabel 4.40

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Vertikal untuk Kondisi setelah Dibangun (Gempa)

point	Tekanan batuan vertikal		
	Momen	Normal	Lintang
1	61,9262	-11,332	0
2	60,1049	-10,523	4,452
3	49,1767	-3,642	15,785
4	23,6776	19,427	33,189
5	-18,2136	54,640	44,522
6	-60,1049	96,329	37,236
7	-87,4253	118,186	11,332
8	-109,706	137,670	-6,214
9	-92,4972	128,109	-23,423
10	-55,9285	111,857	-35,851
11	-40,8708	55,928	-91,780
12	60,2307	32,983	-65,967
13	124,7636	18,164	-34,417
14	146,2746	13,384	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.41

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Horizontal untuk Kondisi setelah Dibangun (Gempa)

point	Tekanan Batuan Horizontal (Gempa)		
	Momen	Normal	Lintang
1	-244,332	213,0758	0
2	-212,183	198,7874	-53,2243
3	-123,773	160,2087	-92,5174
4	-3,21489	107,5202	-107,52
5	118,9509	54,47453	-94,3034
6	209,7716	15,18143	-56,6178
7	247,5465	0	-4,64373
8	218,6125	6,965595	49,47359
9	123,7733	28,75541	99,30438
10	-29,7377	63,58338	140,9193
11	-56,2606	154,4933	69,65595
12	-131,81	180,9269	52,50987
13	-181,641	197,8943	28,21959
14	-199,323	203,7883	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.42
Total Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang untuk Kondisi setelah Dibangun (Gempa)

point	Total		
	Momen	Normal	Lintang
1	-199,300	229,5542	0
2	-167,004	216,2211	-51,8339
3	-83,946	184,9605	-82,3091
4	19,315	156,1445	-81,4387
5	108,939	139,6969	-57,1077
6	166,561	144,1339	-25,3224
7	182,921	153,6884	3,6638
8	130,230	185,1682	48,9090
9	38,329	204,8334	92,5025
10	-107,154	233,1772	133,2071
11	-120,423	276,7608	-33,5330
12	-81,421	282,9831	-20,9658
13	-58,682	286,9544	-9,91586
14	-52,228	288,5785	0
max	-199,300	288,5785	133,2071

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

4.9.3 Kondisi Berfungsi atau Beroperasi sebagai Terowongan Pengelak

- Berat sendiri tunnel (*selfweight*)

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Berat Sendiri untuk Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi

Tabel 4.43

Total Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang akibat berat sendiri

point	berat sendiri		
	Momen	Normal	Lintang
1	-16,894	27,811	0
2	-14,926	27,957	-3,0618
3	-9,349	28,394	-5,5768
4	-1,148	29,196	-7,1077
5	8,201	30,581	-7,3264
6	16,894	32,622	-5,9413
7	22,799	35,502	-3,0253
8	21,323	40,532	5,6497
9	7,053	47,968	16,6212
10	-21,487	57,736	28,1394
11	-23,291	66,339	-11,4089
12	-9,841	69,072	-7,5087
13	-1,804	70,895	-3,7179
14	0,820	71,405	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

- Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)
- Tekanan batuan vertikal dan reaksi akibat beban vertikal

Tabel 4.44

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Vertikal untuk Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi

point	Tekanan batuan vertikal		
	Momen	Normal	Lintang
1	61,92627	-11,3329	0
2	60,10491	-10,5234	4,452216
3	49,17675	-3,64272	15,78513
4	23,67769	19,42785	33,18924
5	-18,2136	54,64083	44,52216
6	-60,1049	96,32976	37,23671
7	-87,4253	118,1861	11,33291
8	-193,447	242,757	-10,9578
9	-163,102	225,8989	-41,3024
10	-98,62	197,2401	-63,218
11	-72,0685	98,62003	-161,838
12	106,2062	58,16053	-116,321
13	219,9985	32,03044	-60,6893
14	257,9293	23,60138	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

- Tekanan air tanah (*external water pressure*)
- Tekanan Air Horizontal

Tabel 4.45

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Air Horizontal untuk Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi

point	Tekanan air horizontal		
	Momen	Normal	Lintang
1	-29,0476	18,1332	0
2	-25,9433	17,5419	-4,68113
3	-17,2955	15,52163	-8,96805
4	-3,99128	11,97383	-11,9738
5	11,30861	7,2927	-12,6144
6	25,49981	2,66085	-9,90428
7	34,36931	0	-3,79418
8	34,14758	0,68985	4,681125
9	22,39549	4,188375	14,3883
10	-1,7739	10,93905	24,19403
11	-6,20865	27,594	12,46658
12	-19,2912	33,75338	9,805725
13	-28,3824	37,89248	5,370975
14	-31,7085	39,32145	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

- Tekanan air vertikal dan tekanan *uplift*

Tabel 4.46

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Air Vertikal untuk Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi

point	Tekanan air vertikal		
	Momen	Normal	Lintang
1	244,442	3,184	0
2	211,569	17,794	53,7586
3	123,064	57,317	93,0943
4	2,528	111,450	106,9554
5	-117,164	165,584	91,7831
6	-203,140	204,732	51,5109
7	-58,471	55,140	-0,8032
8	-52,731	53,439	-8,4105
9	-38,272	48,809	-15,0255
10	-16,584	41,627	-19,7033
11	-9,142	16,584	-38,7450
12	33,169	7,182	-27,6413
13	60,172	1,228	-14,4113
14	69,315	-0,803	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

- Tekanan tanah aktif di samping terowongan

- Tekanan Batuan Horizontal

Tabel 4.47

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Horizontal untuk Terowongan Pengelak Beroperasi

point	Tekanan Batuan Horizontal		
	Momen	Normal	Lintang
1	-208,257	181,6164	0
2	-180,855	169,4376	-45,366
3	-105,499	136,5548	-78,8577
4	-2,74023	91,64547	-91,6455
5	101,3885	46,43168	-80,3801
6	178,8	12,93998	-48,2585
7	210,9977	0	-3,95811
8	186,3356	5,937165	42,1691
9	105,4989	24,50984	84,64266
10	-25,3471	54,19566	120,1134
11	-47,954	131,6833	59,37165
12	-112,349	154,2141	44,75709
13	-154,823	168,6764	24,05313
14	-169,894	173,7001	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.48

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Air dari Dalam untuk Kondisi setelah Dibangun

point	Tekanan air dari dalam		
	Momen	Normal	Lintang
1	155,2767	-108,345	0
2	137,5768	-104,591	27,5332365
3	86,8906	-94,3997	50,06043
4	13,67722	-79,3815	62,933112
5	-68,3861	-62,3968	63,11189925
6	-140,795	-47,5574	48,45134475
7	-185,849	-38,4393	18,9514485
8	-180,218	-44,6968	-32,5392795
9	-102,981	-69,3695	-92,96937
10	52,29527	-112,278	-156,4388438
11	73,21338	-196,308	-23,77870425
12	94,13149	-224,736	-20,20295925
13	109,4178	-242,972	-11,442384
14	115,0496	-249,229	0

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.49

Total Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang untuk Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi

point	Total		
	Momen	Normal	Lintang
1	14,852	108,5583	0
2	20,833	103,597	-9,72085
3	30,026	94,58611	-7,81101
4	30,012	96,5017	8,081426
5	9,447	111,6718	26,78107
6	-22,793	140,4214	32,50982
7	-63,580	170,3899	18,70348
8	-184,589	298,6594	0,592409
9	-169,409	282,0051	-33,6451
10	-111,518	249,4604	-66,9132
11	-85,452	144,5127	-163,932
12	92,025	97,64714	-117,111
13	204,580	67,75117	-60,8367
14	241,512	57,99583	0
max	241,512	298,6594	32,50982

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

4.9.4 Kondisi Berfungsi atau Beroperasi Sebagai Terowongan Pengelak – Gempa

- Berat sendiri tunnel (*selfweight*)

Tabel 4.50

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Berat Sendiri untuk Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi (Gempa)

point	berat sendiri		
	Momen	Normal	Lintang
1	-16,8946	27,81135	0
2	-14,9263	27,95715	-3,0618
3	-9,34943	28,39455	-5,57685
4	-1,14818	29,19645	-7,10775
5	8,20125	30,58155	-7,32645
6	16,89458	32,62275	-5,94135
7	22,79948	35,5023	-3,02535
8	21,32325	40,5324	5,64975
9	7,053075	47,9682	16,6212
10	-21,4873	57,7368	28,1394
11	-23,2916	66,339	-11,4089
12	-9,8415	69,07275	-7,5087
13	-1,80428	70,89525	-3,7179
14	0,820125	71,40555	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

- Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)

- Tekanan batuan vertikal dan reaksi akibat beban vertikal

Tabel 4.51

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Vertikal untuk Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi (Gempa)

point	Tekanan batuan vertikal		
	Momen	Normal	Lintang
1	61,926	-11,3329	0
2	60,104	-10,5234	4,4522
3	49,176	-3,6427	15,7851
4	23,677	19,4278	33,1892
5	-18,213	54,6408	44,5221
6	-60,104	96,3297	37,2367
7	-87,425	118,1861	11,3329
8	-193,447	242,7570	-10,9578
9	-163,102	225,8980	-41,3024
10	-98,620	197,2401	-63,2180
11	-72,068	98,6200	-161,8380
12	106,206	58,1605	-116,3210
13	219,998	32,0304	-60,6893
14	257,929	23,6013	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

- Tekanan air tanah (*external water pressure*)

- Tekanan Air Horizontal

Tabel 4.52

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Air Horizontal untuk Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi (Gempa)

Tekanan air horizontal			
point	Momen	Normal	Lintang
1	-29,0476	18,1332	0
2	-25,9433	17,5419	-4,68113
3	-17,2955	15,52163	-8,96805
4	-3,99128	11,97383	-11,9738
5	11,30861	7,2927	-12,6144
6	25,49981	2,66085	-9,90428
7	34,36931	0	-3,79418
8	34,14758	0,68985	4,681125
9	22,39549	4,188375	14,3883
10	-1,7739	10,93905	24,19403
11	-6,20865	27,594	12,46658
12	-19,2912	33,75338	9,805725
13	-28,3824	37,89248	5,370975
14	-31,7085	39,32145	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

- Tekanan air vertikal dan tekanan *uplift*

Tabel 4.53

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Air Vertikal untuk Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi (Gempa)

Tekanan air vertikal			
point	Momen	Normal	Lintang
1	244,4428	3,184313	0
2	211,5695	17,79469	53,7586875
3	123,0643	57,31763	93,0943125
4	2,528719	111,4509	106,9554375
5	-117,164	165,5843	91,783125
6	-203,14	204,7326	51,5109375
7	-58,4719	55,14075	-0,80325
8	-52,731	53,43975	-8,4105
9	-38,2725	48,80925	-15,0255
10	-16,5848	41,62725	-19,70325
11	-9,14288	16,58475	-38,745
12	33,1695	7,182	-27,64125
13	60,17288	1,2285	-14,41125
14	69,31575	-0,80325	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

- Tekanan tanah aktif di samping terowongan
- Tekanan Batuan Horizontal

Tabel 4.54

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Batuan Horizontal untuk Terowongan Pengelak Beroperasi (Gempa)

Tekanan Batuan Horizontal (Gempa)			
point	Momen	Normal	Lintang
1	-244,332	213,0758	0
2	-212,183	198,7874	-53,2243
3	-123,773	160,2087	-92,5174
4	-3,214	107,5202	-107,5200
5	118,950	54,4745	-94,3034
6	209,771	15,1814	-56,6178
7	247,546	0	-4,6437
8	218,612	6,9655	49,4735
9	123,773	28,7554	99,3043
10	-29,737	63,5833	140,9193
11	-56,260	154,4933	69,6559
12	-131,810	180,9269	52,5098
13	-181,641	197,8943	28,2195
14	-199,323	203,7883	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.55

Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang Akibat Tekanan Air dari dalam untuk Kondisi setelah Dibangun (Gempa)

Tekanan air dari dalam			
point	Momen	Normal	Lintang
1	155,2767	-108,35	0
2	137,5768	-104,59	27,5332
3	86,8906	-94,40	50,0604
4	13,6772	-79,38	62,9331
5	-68,3861	-62,39	63,1118
6	-140,7950	-47,55	48,4513
7	-185,8490	-38,43	18,9514
8	-180,2180	-44,69	-32,5392
9	-102,9810	-69,36	-92,9693
10	52,2952	-112,28	-156,4388
11	73,2133	-196,31	-23,7787
12	94,1314	-224,74	-20,2029
13	109,4178	-242,97	-11,4423
14	115,0496	-249,23	0

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.56

Total Hasil Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang untuk Kondisi Terowongan Pengelak Beroperasi (Gempa)

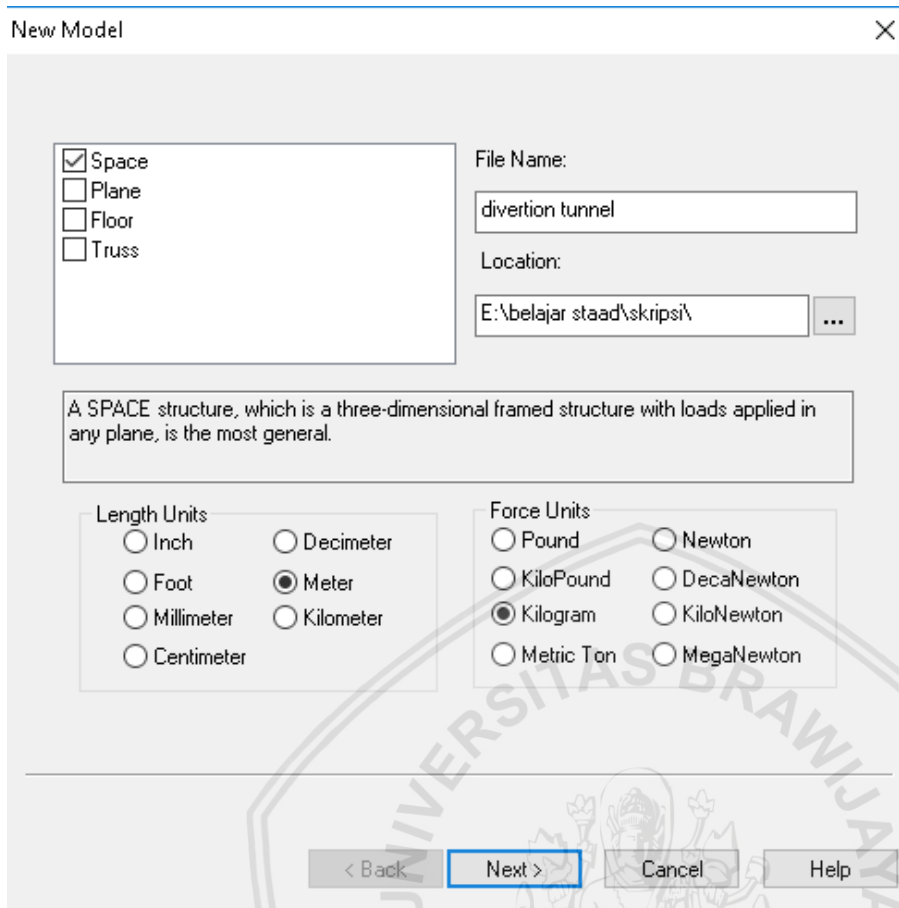
point	Momen	Total	
		Normal	Lintang
1	-21,223	140,0177	0
2	-10,495	132,9469	-17,5791
3	11,752	118,2400	-21,4707
4	29,537	112,3764	-7,7933
5	27,010	119,7146	12,8577
6	8,178	142,6628	24,1505
7	-27,031	170,3899	18,0178
8	-152,312	299,6878	7,8968
9	-151,134	286,2507	-18,9834
10	-115,908	258,8481	-46,1073
11	-93,759	167,3227	-153,6480
12	72,564	124,3599	-109,3580
13	177,761	96,9691	-56,6702
14	212,083	88,0840	0
max	212,083	299,6878	24,15053

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

4.10 Perhitungan Momen, Lintang, dan Normal Menggunakan Software Staad Pro

Langkah desain menggunakan software Staad Pro v8i . Program ini dapat digunakan untuk menghitung nilai momen, lintang, dan normal. Perhitungan Desain Terowongan Pengelak Bendungan Kualu dilakukan dengan analisis cangkang (*shell analysis*).

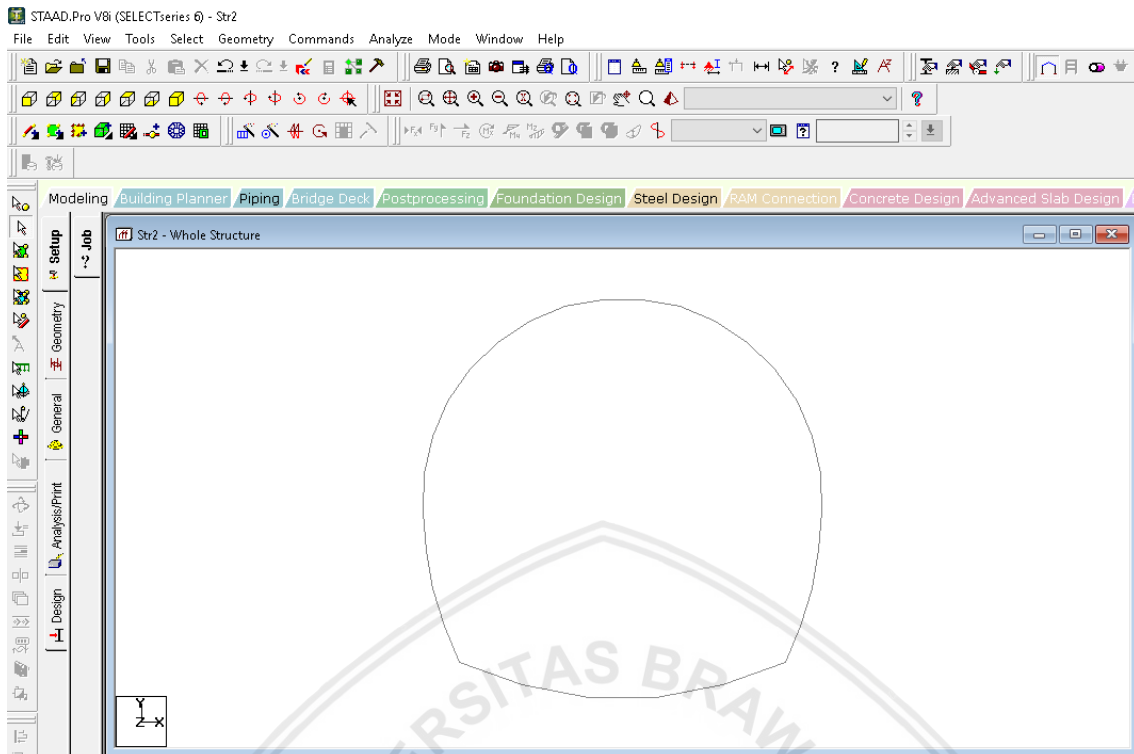
1. Buka software Staad Pro v8i, kemudian pada jendela awal pilih project task > new project. Kemudian akan muncul jendela seperti gambar berikut.



Gambar 4.41 Jendela *New Model*

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

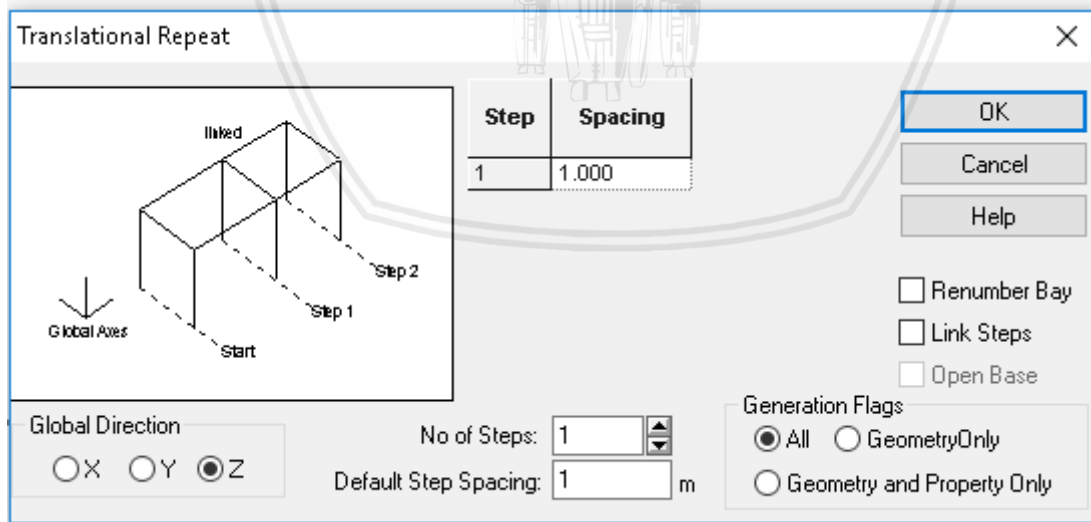
2. Pada jendela *new model* tersebut, pilih jenis konstruksi, memberikan nama file dan lokasi dimana file tersebut akan disimpan. Kemudian memilih jenis satuan panjang dan satuan gaya yang nantinya akan digunakan dalam perhitungan. Jika sudah maka klik tombol *next*.
3. Pada jendela awal Staad pilih tab *modelling*, dan gambarkan bentuk konstruksi yang diinginkan, dalam hal ini terowongan pengelak yang digunakan berbentuk tapal kuda *shape F*.



Gambar 4.42 Bentuk Terowongan Tapal Kuda Shape F Tampak Depan.

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

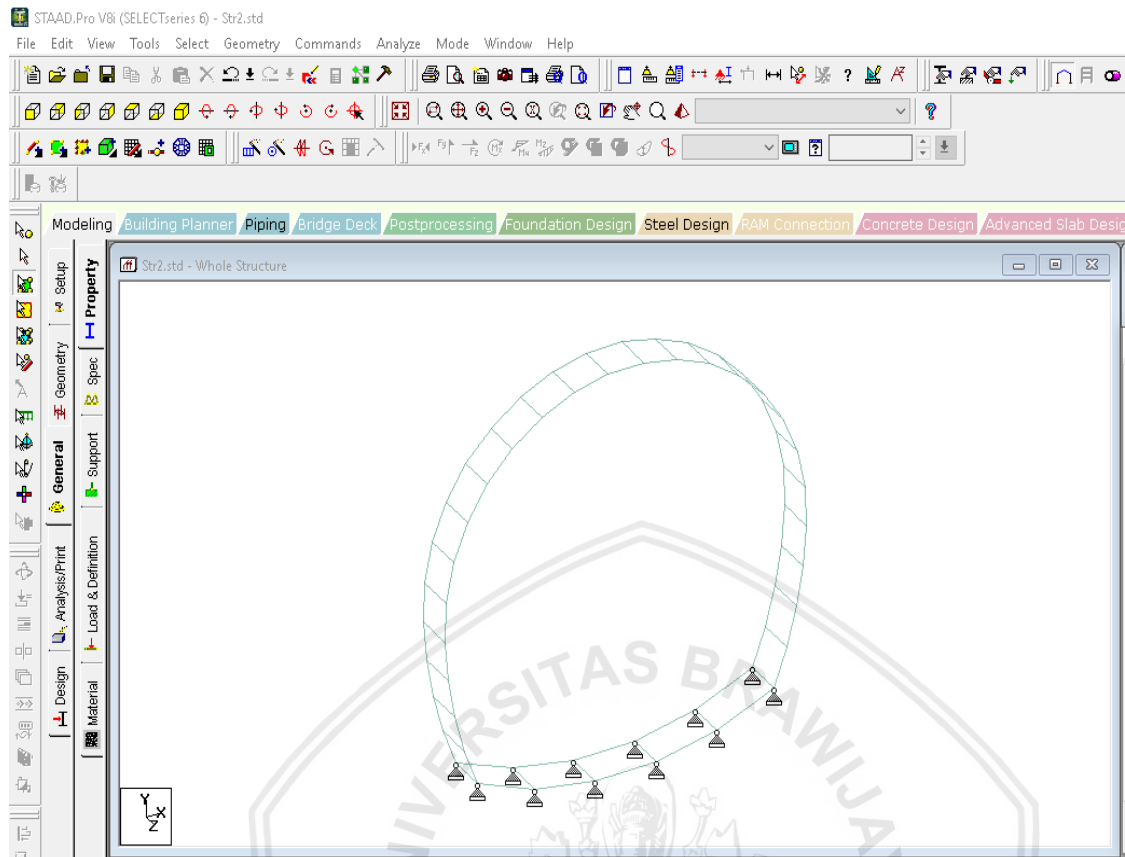
4. Karena nantinya akan digunakan konsep plat dalam perhitungannya, maka perlu didesain kearah sumbu Z sepanjang 1 meter. Maka untuk melakukannya klik *translational repeat* > pilih *global direction* searah sumbu Z > dan *step spacing* 1 m > klik tombol ok.



Gambar 4.43 Jendela *Translational Repeat*

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

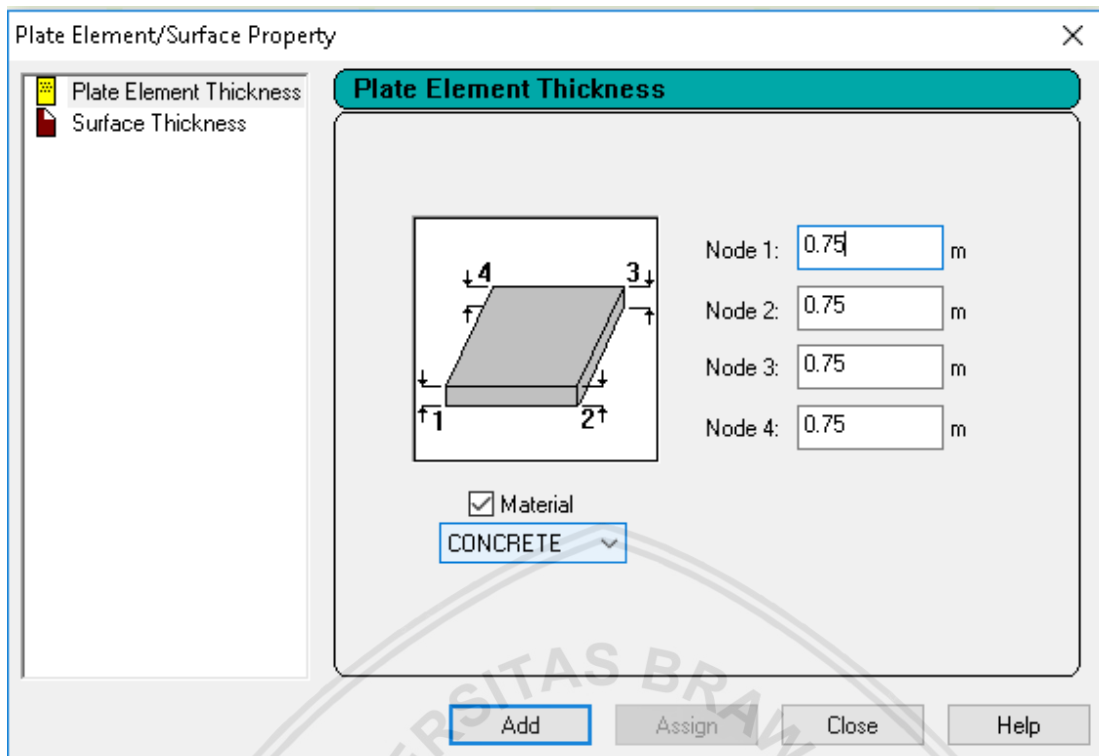
5. Pemilihan jenis tumpuan. Pilih tab *General* > *Support* >Klik *create* pada jendela *support*. Kemudian pilih sendi.



Gambar 4.44 Bentuk Terowongan Tapal Kuda Shape F Tampak Isometric

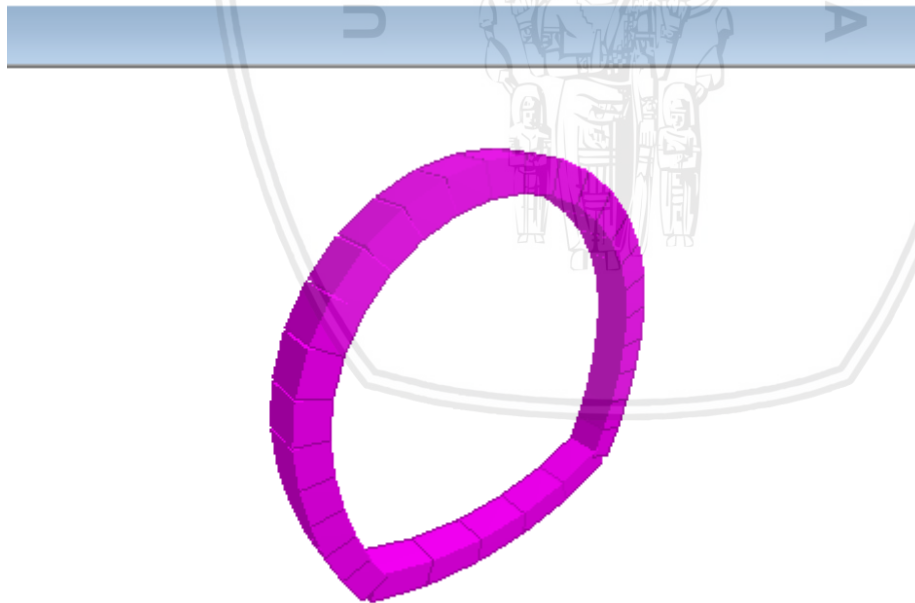
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

6. Setelah itu membuat desain menjadi plat dengan menggunakan *add 4 nodes plates*. Setelah itu mengatur ketebalan plat pada tab *general > property > thickness*. Masukan ketebalan plat, kemudian klik tombol *add > close*.



Gambar 4.45 Jendela *Plate Element*

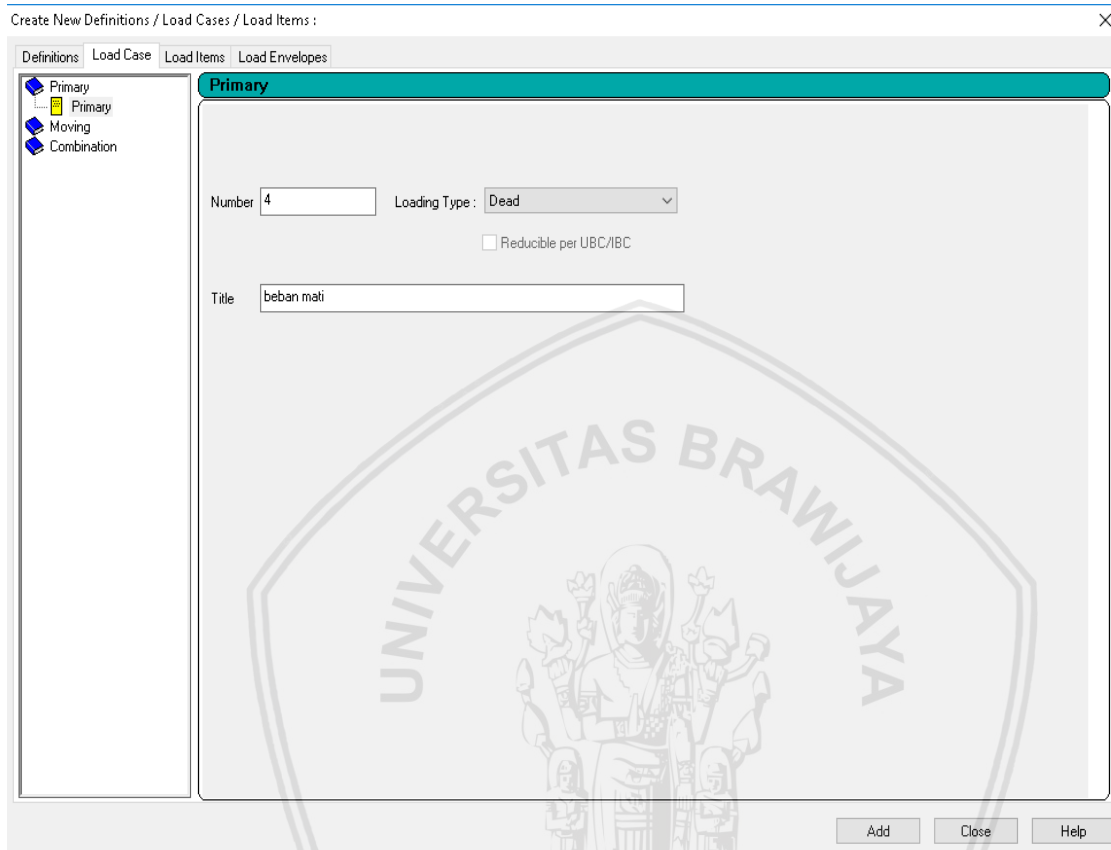
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.46 Bentuk Terowongan Tapal Kuda *Shape F* Tampak *3D Rendered*

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

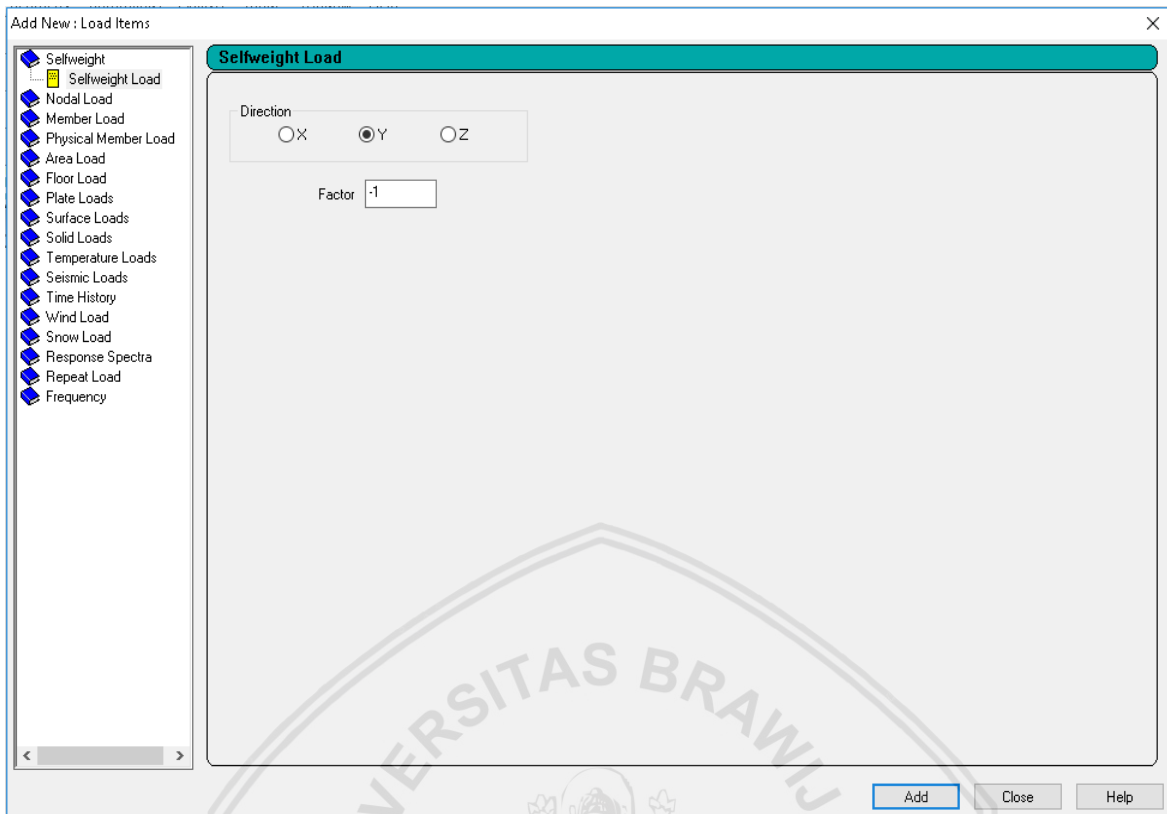
7. Kemudian memasukan pembebanan pada terowongan. langkah yang dilakukan adalah klik tab *general* > *load and definition* > *new* > *load case* > masukan jenis pembebanan yang diinginkan, misalnya beban mati atau beban hidup > klik tombol *add* > *close*.



Gambar 4.47 Input Load Case

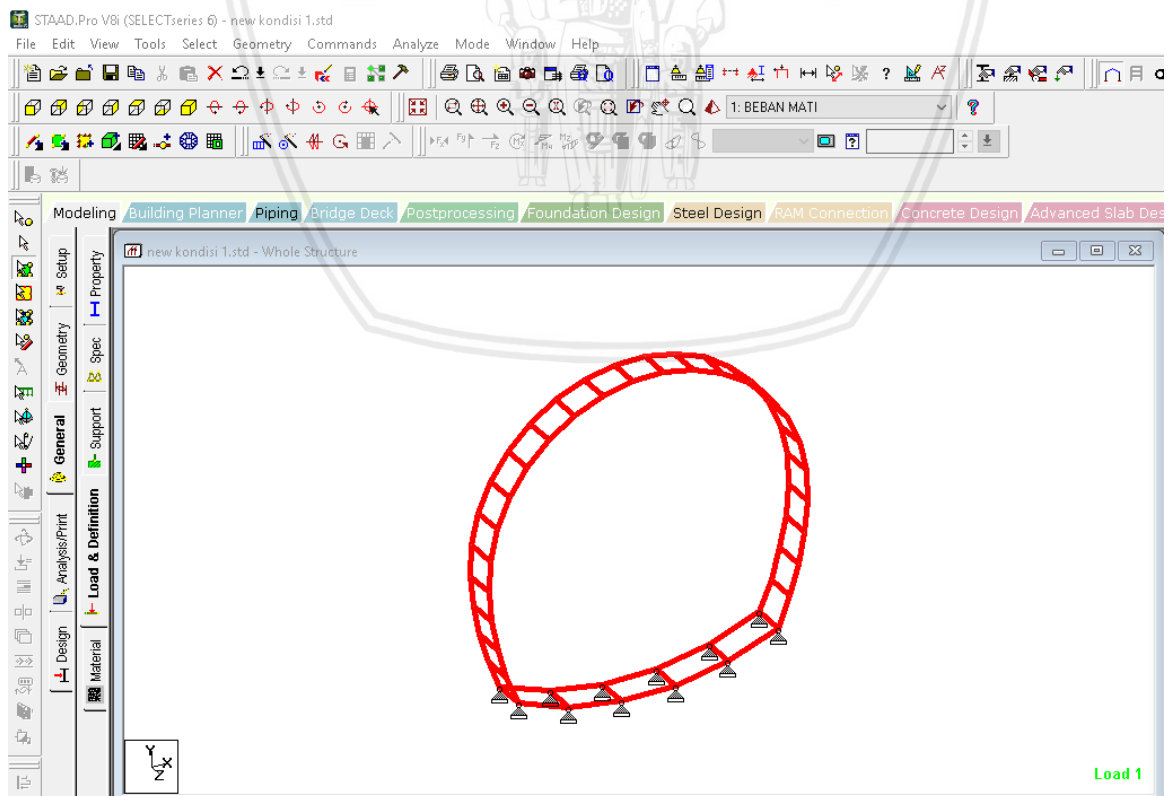
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

8. Pada tab *general* > *load and definition* > pilih beban mati > *add*. Karena beban mati yang bekerja hanya beban akibat berat sendiri, maka pada jendela *load item*, pilih *selfweight load* searah sumbu y negatif.



Gambar 4.48 Input Beban akibat Berat Sendiri

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

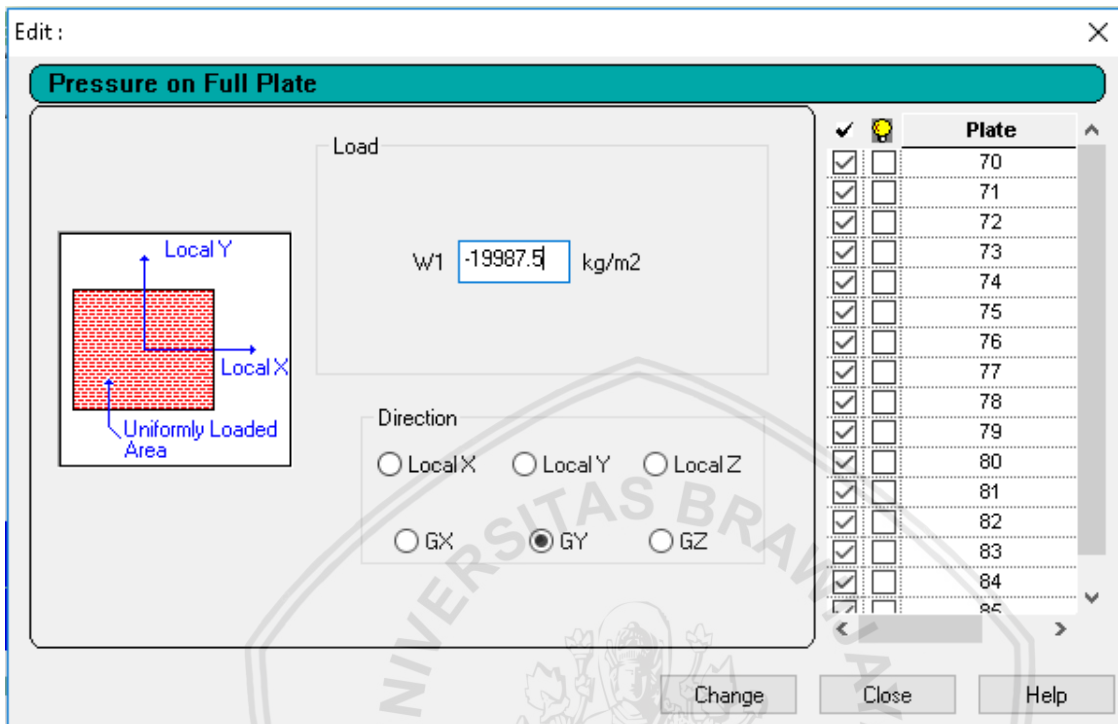


Gambar 4.49 Beban Akibat Berat Sendiri

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

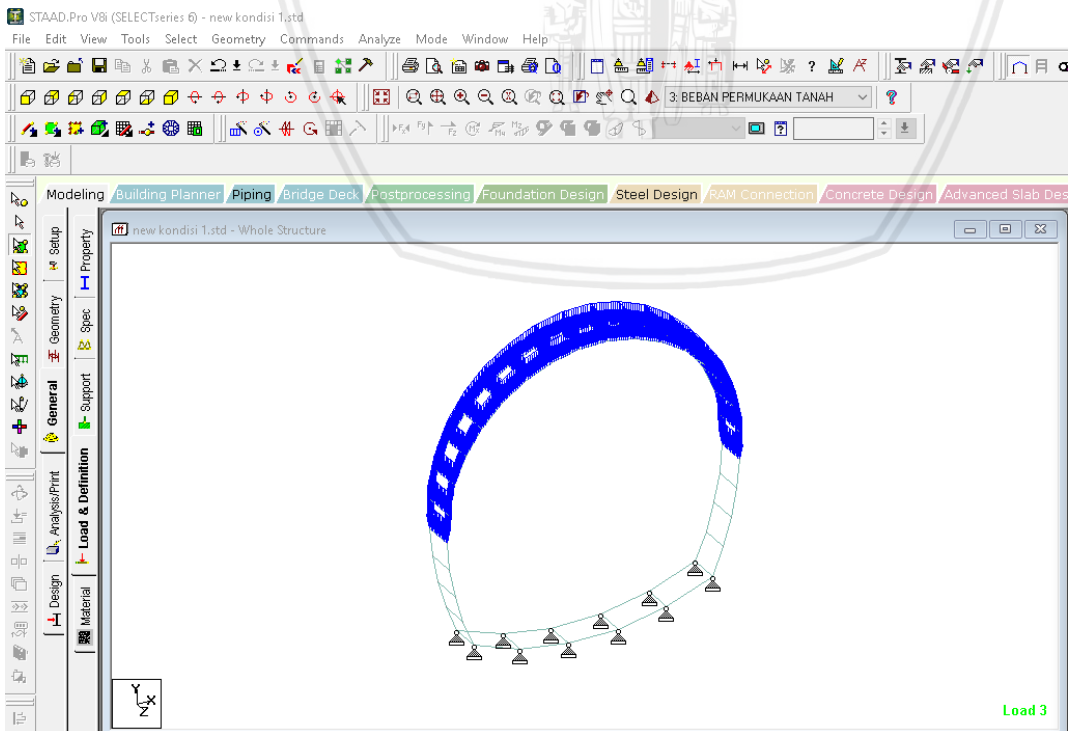
9. Setelah itu dilanjutkan dengan memasukan semua beban yang bekerja pada terowongan. beban yang dimasukan adalah :

- Beban batuan vertikal



Gambar 4.50 Input Beban Batuan Vertikal

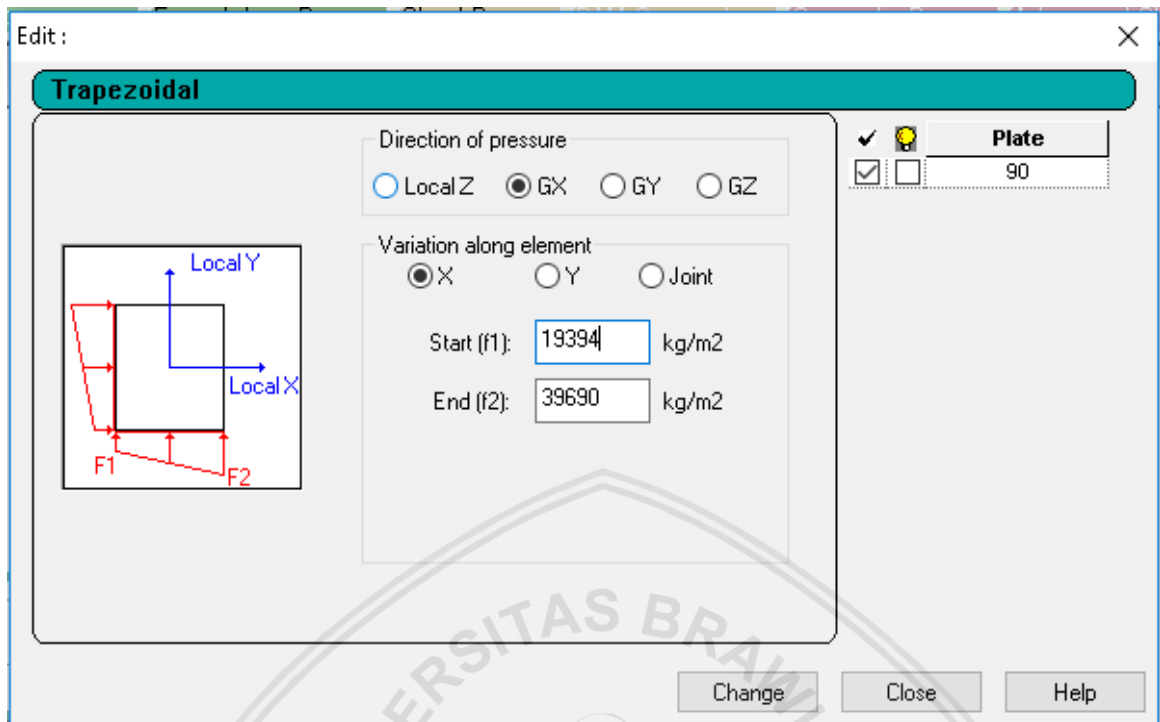
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.51 Bentuk Beban akibat Batuan Vertikal

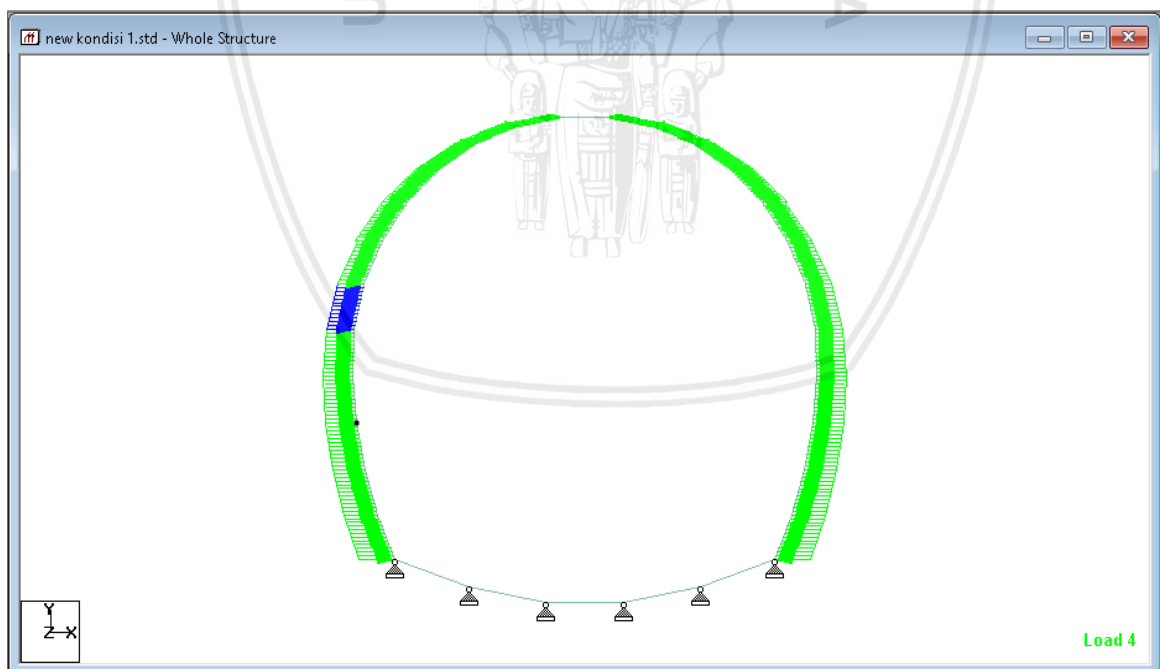
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

- Tekanan batuan horizontal



Gambar 4.52 Input Beban Batuan Horizontal

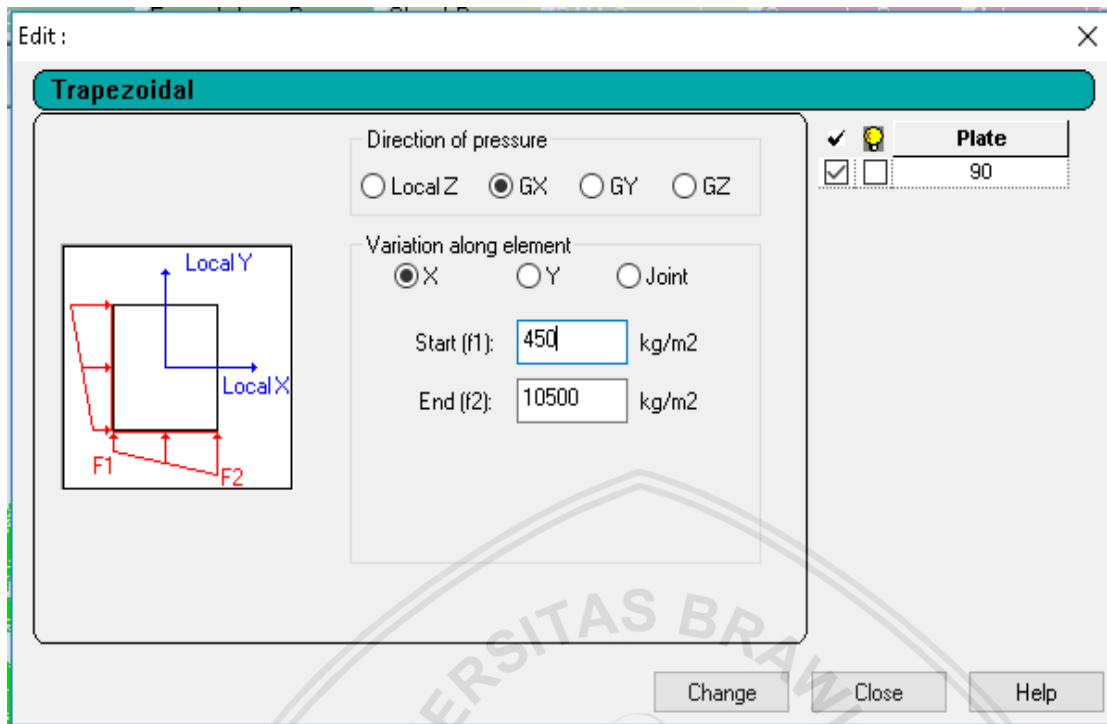
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.53 Bentuk Beban akibat Batuan Horizontal

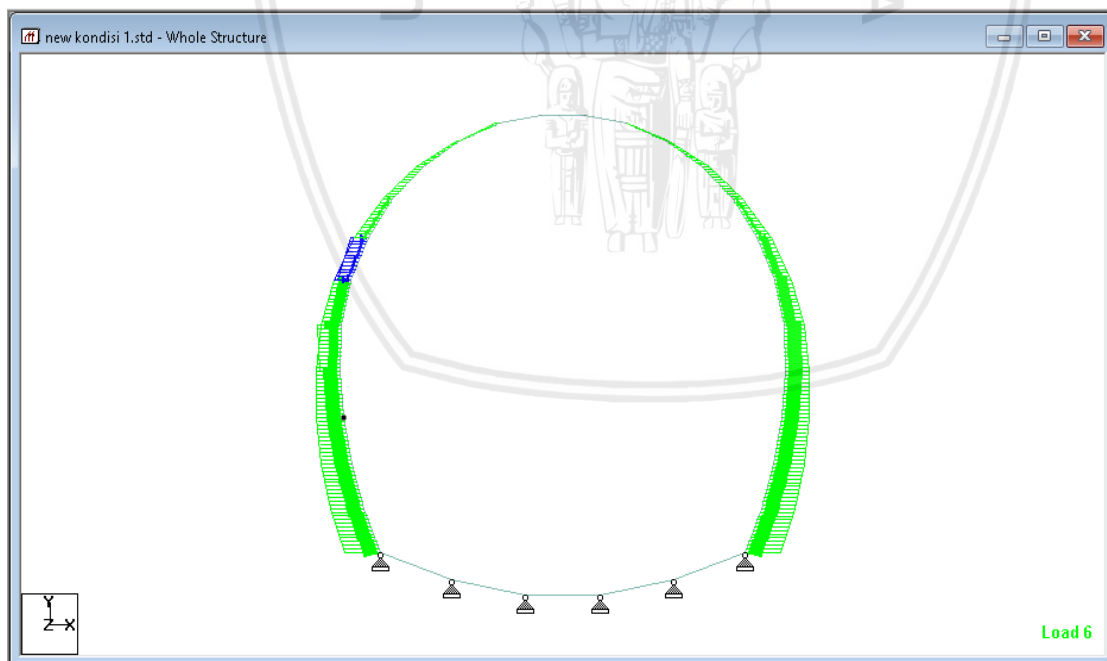
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

- Tekanan air horizontal



Gambar 4.54 Input Beban Akibat Tekanan Air Horizontal

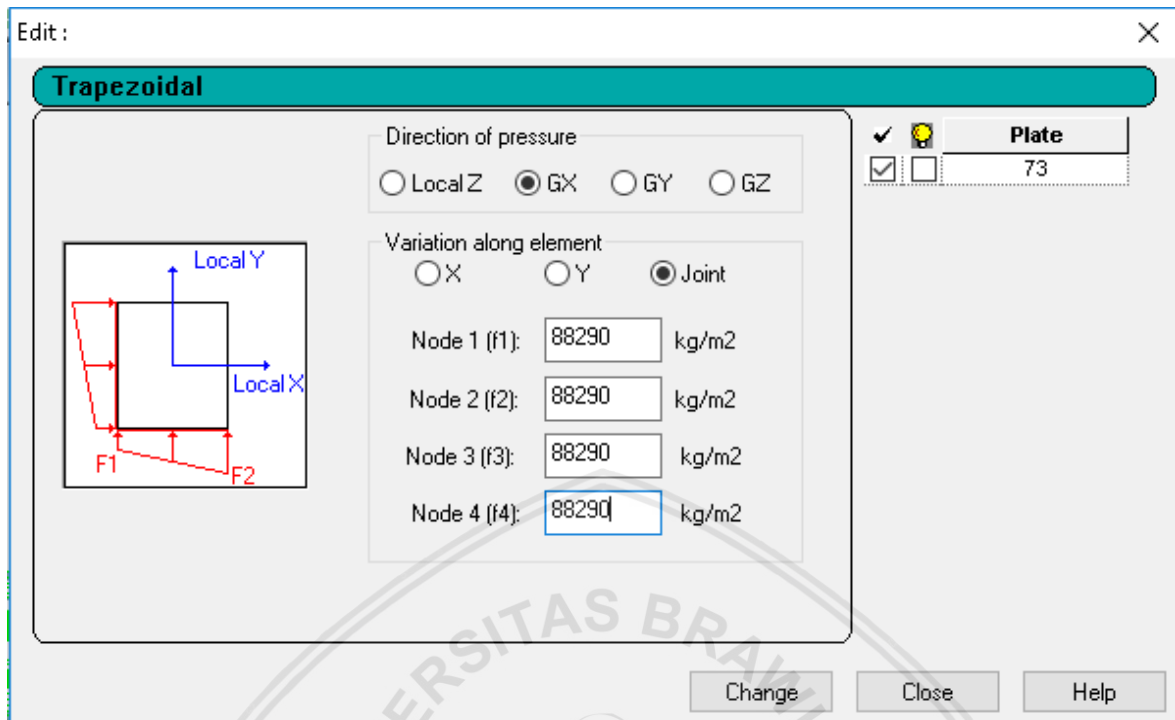
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.55 Bentuk Beban akibat Tekanan Air Horizontal

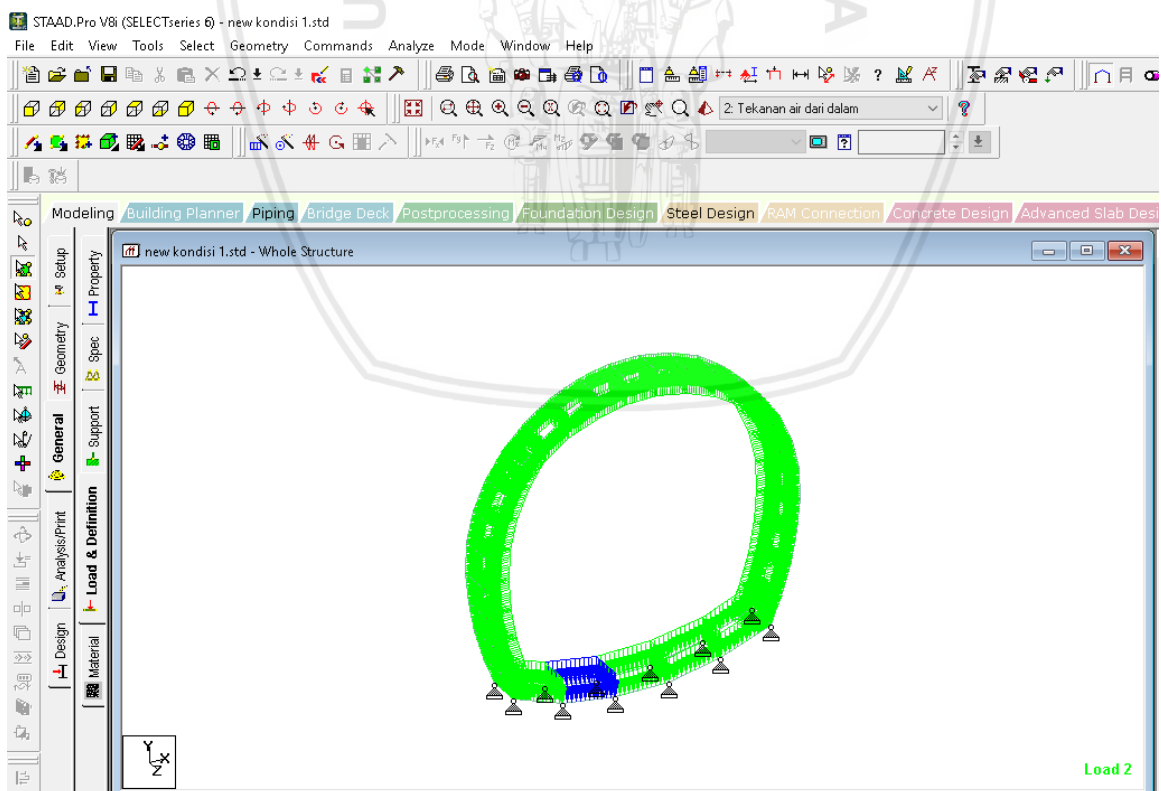
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

- Tekanan dari dalam terowongan



Gambar 4.56 Input Beban Akibat Tekanan Air dari Dalam

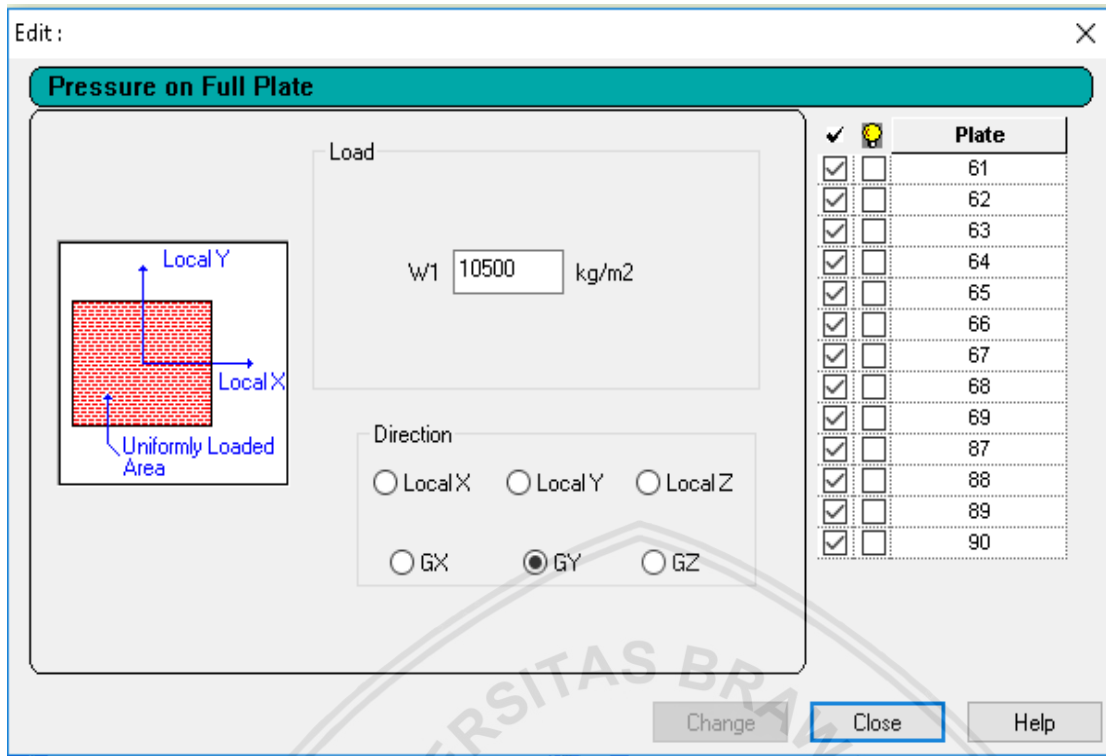
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.57 Bentuk Beban akibat Tekanan Air dari Dalam

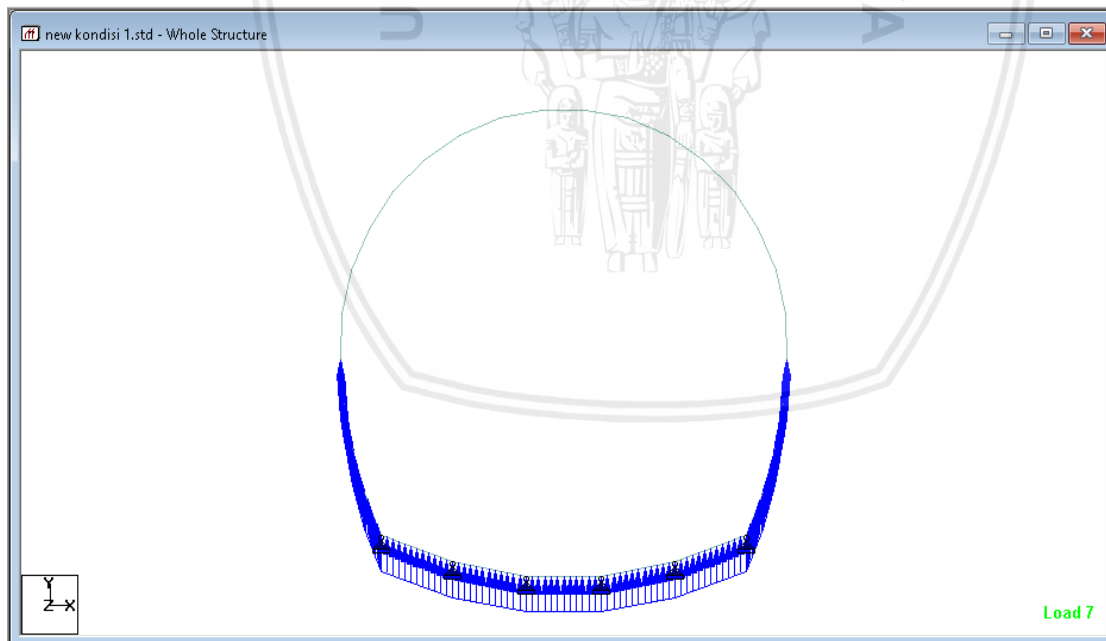
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

- Tekanan *uplift*



Gambar 4.58 Input Beban akibat Tekanan *Uplift*

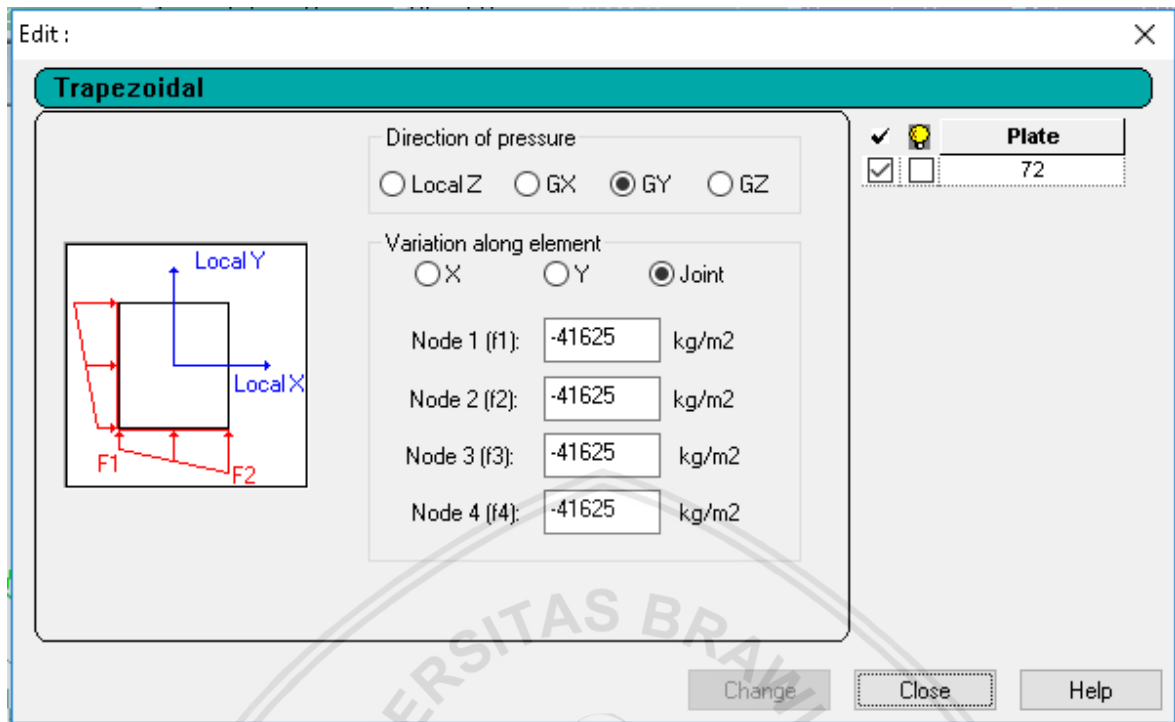
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.59 Bentuk Input Beban akibat Tekanan *Uplift*

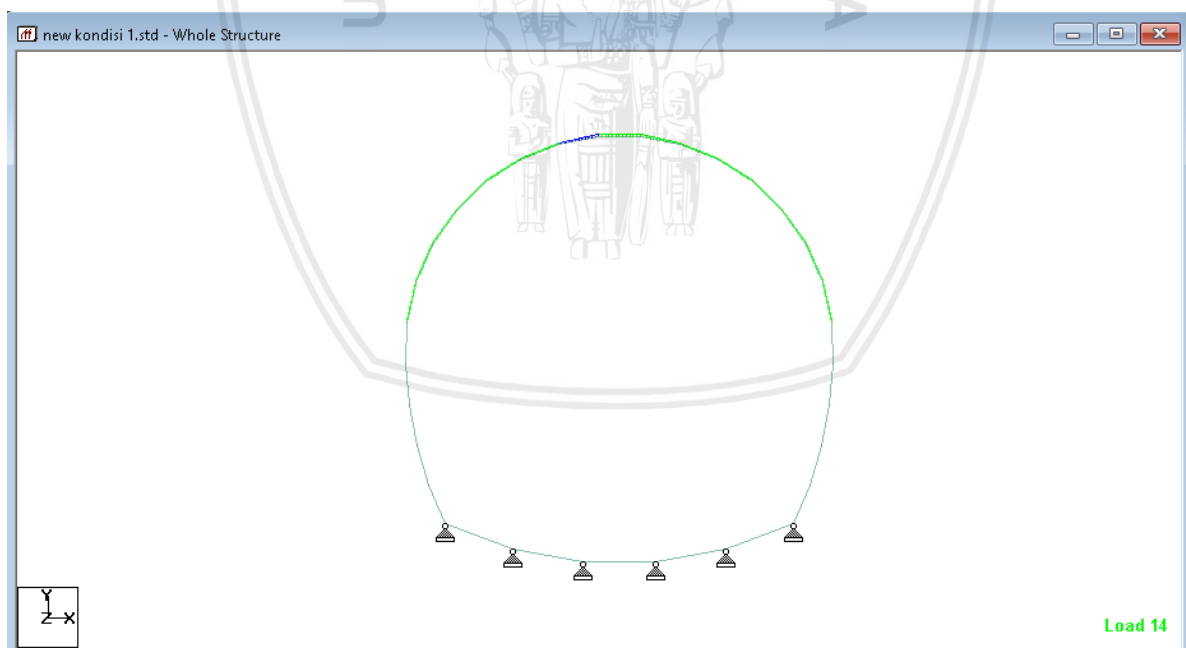
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

- Tekanan air vertikal



Gambar 4.60 Input Beban akibat Tekanan Air Vertikal

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.61 Bentuk Beban akibat Tekanan Air Vertikal

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

10. Kemudian memasukan kombinasi pembebanan. Klik pada tab *general > load and definition > load case > combination > define combination*. Kombinasi pembebanan yang digunakan:

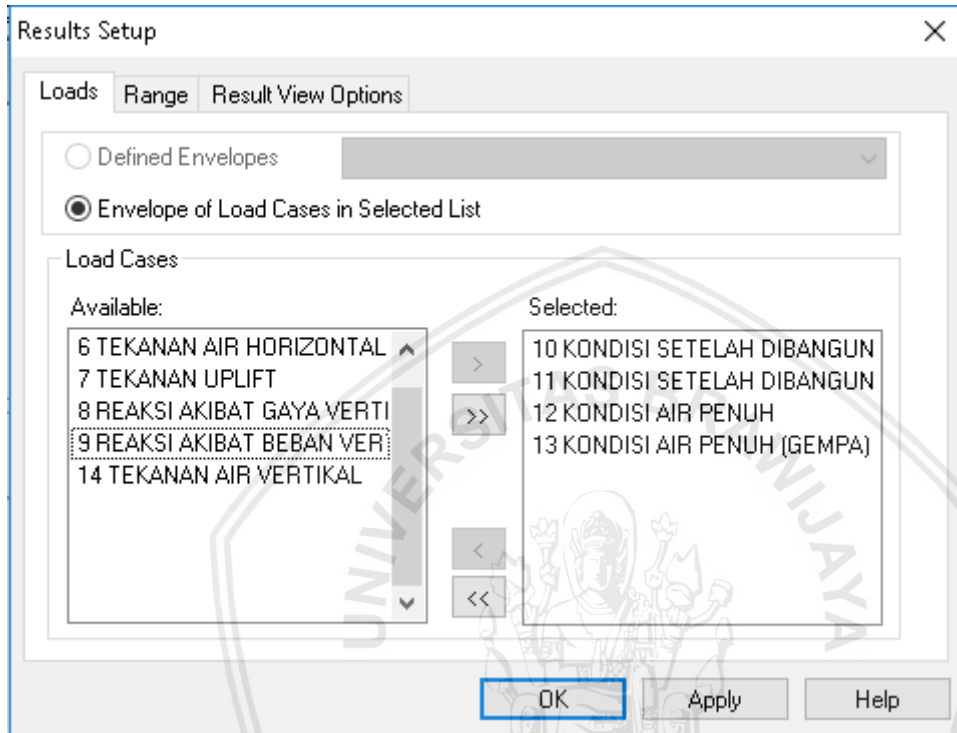
Kondisi 1 : Kasus pembebanan pada saat setelah selesai dibangun (*just after completion*)

1. Kondisi setelah dibangun (*Just After Completion*), beban yang bekerja antara lain :
 - Berat sendiri tunnel (*selfweight*)
 - Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)
 - Tekanan tanah aktif di samping terowongan
 - Reaksi akibat beban vertikal
2. Kondisi setelah dibangun (*Just After Completion*) – gempa, beban yang bekerja antara lain :
 - Berat sendiri tunnel (*selfweight*)
 - Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)
 - Tekanan tanah aktif di samping terowongan
 - Reaksi akibat beban vertikal

Kondisi 2 : Berfungsi atau beroperasi sebagai terowong pengelak, kondisi air penuh

1. Berfungsi atau beroperasi sebagai terowong pengelak dan kondisi air penuh, beban yang bekerja antara lain :
 - Berat sendiri terowong (*selfweight*)
 - Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)
 - Tekanan air tanah (*external water pressure*)
 - Tekanan tanah aktif di samping terowongan
 - Gaya angkat (*uplift pressure*)
 - Reaksi akibat beban vertikal
 - Tekanan air dari dalam terowongan (*internal water pressure*)
2. Berfungsi atau beroperasi sebagai terowong pengelak dan kondisi air penuh - gempa, beban yang bekerja antara lain :
 - Berat sendiri tunnel (*selfweight*)
 - Beban tanah di atas terowong (*external rock load*)
 - Tekanan air tanah (*external water pressure*)
 - Tekanan tanah aktif di samping terowongan
 - Gaya angkat (*uplift pressure*)
 - Reaksi akibat beban vertikal
 - Tekanan air dari dalam terowongan (*internal water pressure*)

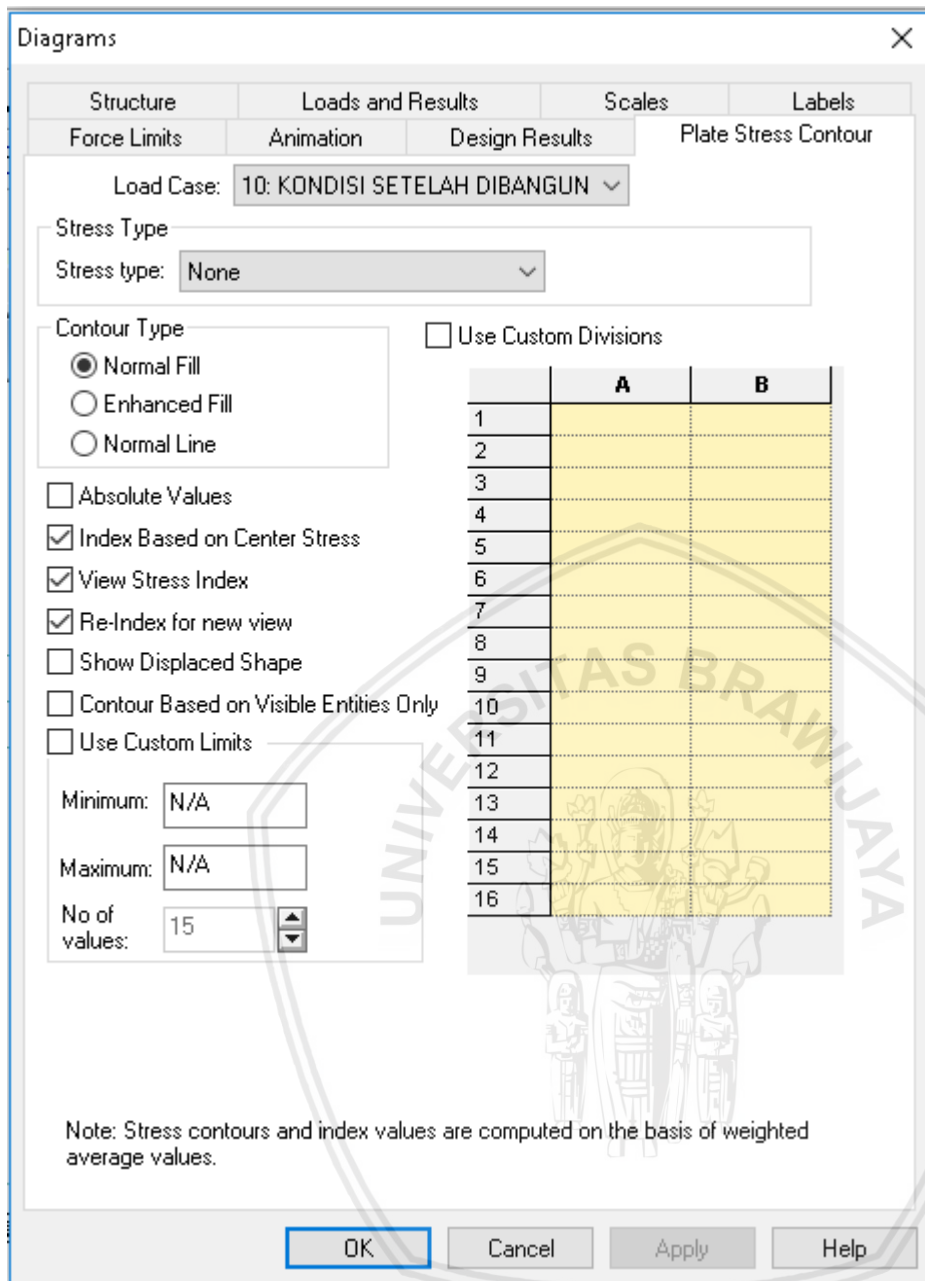
11. Setelah semua kombinasi pembebanan telah diinputkan, maka klik tab *analyze and print* > *no print* > *add*.
12. Kemudian klik menu bar *analyze* > *run analyze* > *go to processing mode* > *done*.
13. Untuk melihat hasil perhitungan momen, klik *post processing* > *resul setup*. Pilih pembebanan yang ingin dicari hasilnya.



Gambar 4.62 Result Setup

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

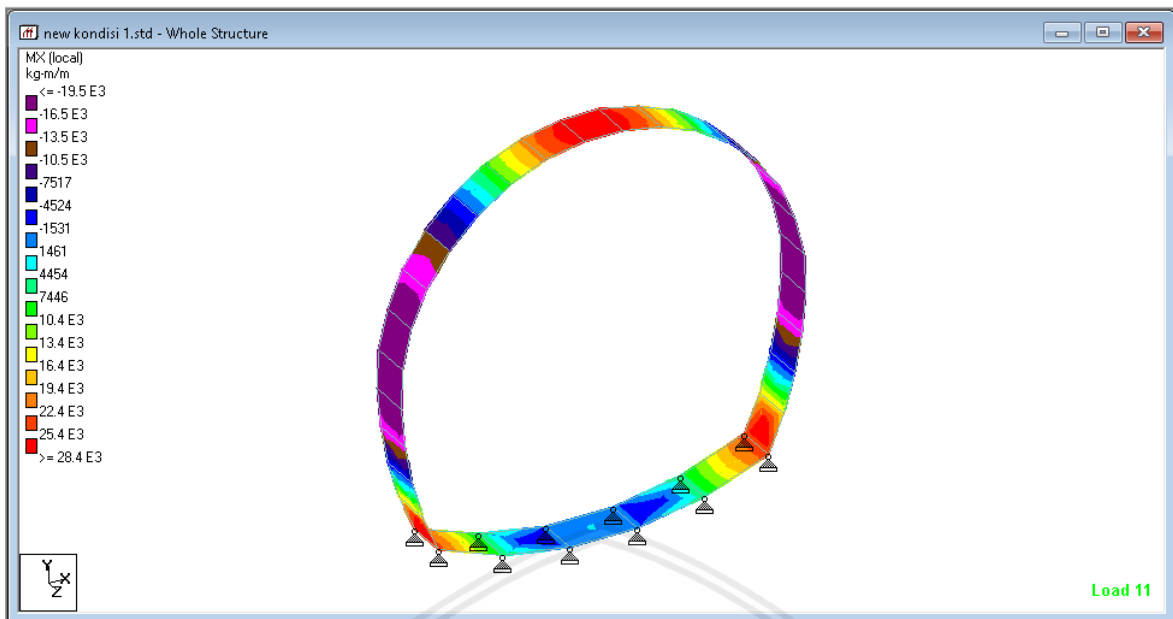
14. Kemudian klik *plate* > *stress type*



Gambar 4.63 Diagrams

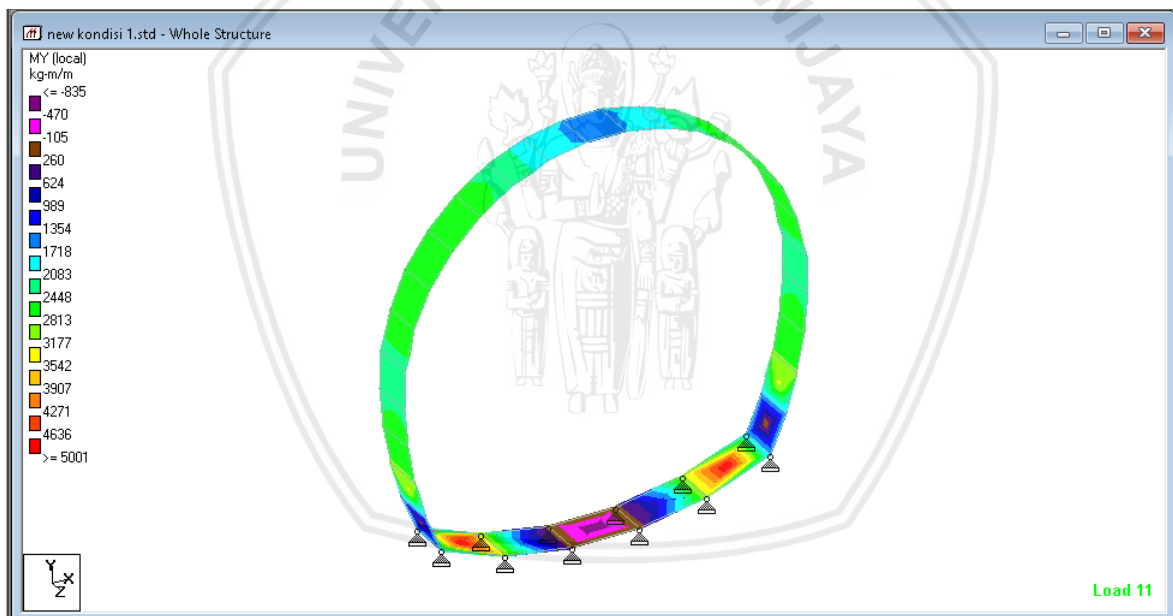
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

15. Berikut merupakan hasil perhitungan M_x dan M_y



Gambar 4.64 Hasil Perhitungan Mx untuk Plat Setebal 75 cm

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.65 Hasil Perhitungan My untuk Plat Setebal 75 cm

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

16. Perhitungan selesai.

- Analisis Perhitungan Staad Pro

Dari analisis momen maksimum ditinjau dari plat bagian bawah dan atas. Plat bagian bawah terdiri dari plat nomor 61 - 65. Sedangkan plat bagian atas terdiri dari plat nomor 66 – 90. Kemudian untuk perhitungan gaya lintang (F_y) pada software staad pro karena menggunakan konsep plat, maka lintang hanya ditemukan pada titik-titik tumpuan. Untuk hasil perhitungan momen dan lintang maksimum dapat dilihat pada tabel 4.39 dan 4.40.

Tabel 4.57

Momen Maksimum Searah Sumbu x (M_x) untuk Tebal Plat 75 cm

No	Keterangan	No Plat	Kondisi	Momen Max (ton.m)
1	Plat bagian bawah	64	Setelah Beroperasi (gempa)	51,973
2	Plat bagian atas	66	Setelah Beroperasi (gempa)	44,477

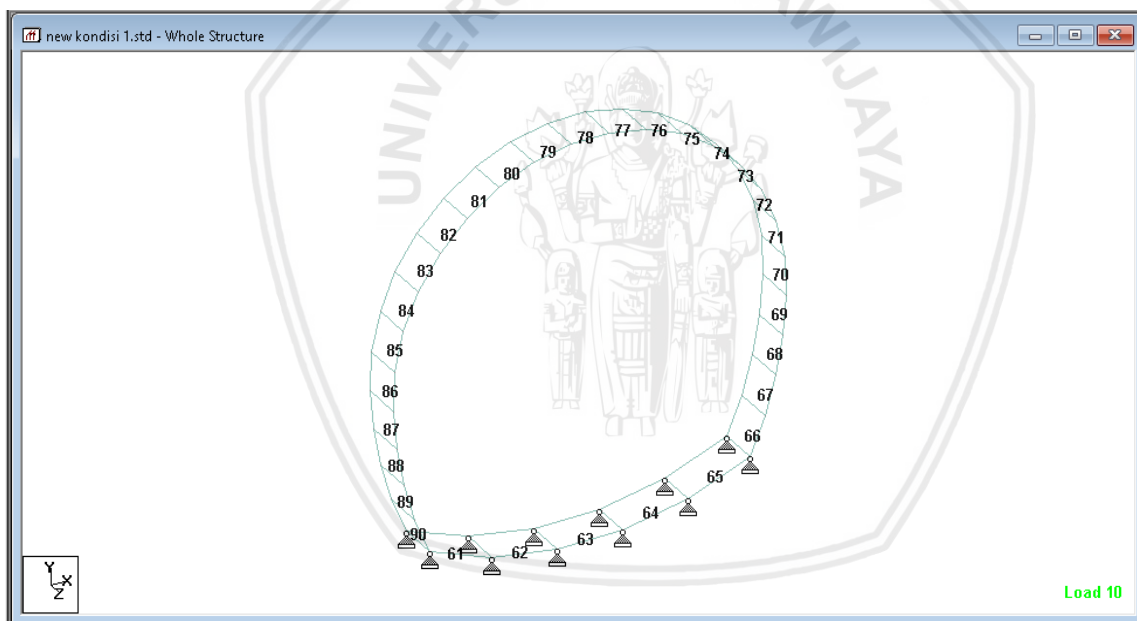
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.58

Momen Maksimum Searah Sumbu y (M_y) untuk Tebal Plat 75 cm

No	Keterangan	No Plat	Kondisi	Momen Max (ton.m)
1	Plat bagian bawah	64	Setelah dibangun (gempa)	28,265
2	Plat bagian atas	89	Setelah dibangun (gempa)	25,135

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.66 Penomoran pada Plat untuk plat setebal 75 cm

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Dari hasil analisa, diputuskan penggunaan hasil perhitungan momen menggunakan software staad pro yang pertimbangannya adalah sebagai berikut:

- Staad Pro melakukan analisa 3d yang berarti perhitungan pembebanan yang terjadi pada terowongan lebih mendetail, karena pembebanan searah sumbu z (memanjang terowongan) juga diperhitungkan.

- Diagram gaya yang ada pada staad pro lebih mewakili hasil dari perhitungan, karena pada staad pro input jenis pembebanan dibedakan sesuai dengan jenis dari beban tersebut, seperti beban hidup, beban mati, beban hidrostatik, dan beban tanah.
- Jenis struktur yang di inputkan pada software staad pro lebih detail seperti struktur tersebut terbuat dari plat, balok, kolom, dan lain sebagainya.
- Staad Pro dapat melakukan perhitungan momen dengan ketebalan plat yang lebih ekonomis, sedangkan pada tabel beggs dibatasi dengan desain paling ekonomis adalah $t = r/6$, hal ini penting karena untuk perhitungan alternatif desain terowongan pengelak akan dicari penampang dengan ketebalan plat paling minimum yang dapat digunakan.

Perhitungan Penulangan Menggunakan Hasil Metode Staad Pro

Beton bertulang adalah beton yang terdiri dari beton dan baja. Karena beton kuat terhadap tegangan tekan dan lemah terhadap tegangan tarik, maka diperlukan baja untuk menahan tegangan tarik.

$$M_u \text{ max (pada plat nomor 90)} = 51,973 \text{ tm} = 519,73 \text{ kNm}$$

$$M_y \text{ max (pada plat nomor 64)} = 28,265 \text{ tm} = 282,65 \text{ kNm}$$

Terowongan pengelak Bendungan Kualu direncanakan dengan plat setebal 0,75 m = 75 cm. Pemilihan ketebalan plat ini berdasarkan tabel *Beggs Deformation Analysis of Single Barrel Conduit*, Dimana untuk ketebalan dari plat beton yang direncanakan diberikan 3 pilihan yaitu $t = r/2$, $t = r/3$, $t = r/6$. Dalam perhitungannya desain plat beton pada bendungan kualu direncanakan dengan ketebalan plat yang paling tipis yaitu $t = r/6$, dengan pertimbangan pada perhitungan as perhitungan $\geq A_s$ perlu.

Penulangan Utama Hasil dari Metode Staad Pro

Plat / cangkang yang menerima gaya aksial dan lentur didesain menggunakan analogi balok. Data yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$M_x \text{ max} = 519,73 \text{ kNm}$$

$$f'_c = 30 \text{ Mpa}$$

$$f_y = 400 \text{ Mpa}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$h = 750 \text{ mm}$$

$$d' = 100 \text{ mm}$$

$$d = 650 \text{ mm}$$

Direncana dengan tulangan D – 25

Batas rasio tulangan maksimum balok adalah

$$\begin{aligned}\rho_{\min} &= \frac{1,4}{f_y} \\ &= \frac{1,4}{400} \\ &= 0,0035\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{\max} &= 0,75 \cdot \frac{\beta \cdot f'c}{f_y} \cdot \beta \cdot \frac{600}{600+f_y} \\ &= 0,75 \cdot \frac{0,85 \cdot 30}{400} \cdot 0,85 \cdot \frac{600}{600+400} \\ &= 0,0207\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}R_n &= M_x \max \cdot 10^6 / \Phi \cdot b \cdot d^2 \\ &= 519,73 \cdot 10^6 / 0,85 \cdot 1000 \cdot 650^2 \\ &= 1,447\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\omega &= 0,85 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot R_n}{f'c}} \right) \\ &= 0,85 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot 1,447}{30}} \right) \\ &= 0,0497\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho &= \omega \cdot \frac{f'c}{f_y} \\ &= 0,0497 \cdot \frac{30}{400} \\ &= 0,003727 \text{ (lebih besar dari } \rho_{\min} \text{, maka yang digunakan } \rho)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A_s &= \rho \cdot b \cdot d \\ &= 0,003727 \cdot 1000 \cdot 650 \\ &= 2422 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

Coba-coba tulangan D25, D22, dan D19

Luas penampang:

$$\text{Penampang D25} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 25^2 = 490,625 \text{ mm}^2$$

$$\text{Penampang D22} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 22^2 = 379,940 \text{ mm}^2$$

$$\text{Penampang D19} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 19^2 = 283,385 \text{ mm}^2$$

jadi :

$$\begin{aligned}1. \text{ Memakai D25 membutuhkan jumlah} &= A_s / 490,625 \\ &= 4,93 \sim 5 \text{ buah}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Jarak bersih antar tulangan (S}_n\text{)} &= b / (a_s/490,625) \\ &= 202,52 \text{ mm} = 200 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A_s &= 490,625 \cdot b / S_n \\ &= 2453 \text{ mm}^2 \geq A_s \text{ perlu (memenuhi)}\end{aligned}$$

2. Memakai D22 membutuhkan jumlah = $A_s / 379,940$
 = 6,376 ~ 9 buah
- Jarak bersih antar tulangan (Sn) = $b / (a_s/379,940)$
 = 156,83 mm = 150 mm
- A_s = $379,940 \cdot b / S_n$
 = $2532 \text{ mm}^2 \geq A_s$ perlu (memenuhi)
3. Memakai D19 membutuhkan jumlah = $A_s / 283,385$
 = 8,54 ~ 9 buah
- Jarak bersih antar tulangan (Sn) = $b / (a_s/283,385)$
 = 116,97 mm = 110 mm
- A_s = $283,385 \cdot b / S_n$
 = $2576 \text{ mm}^2 \geq A_s$ perlu (memenuhi)

Dari hasil perhitungan dipilih menggunakan D22 – 150

Penulangan Bagi Hasil dari Metode Staad Pro

Plat / cangkang yang menerima gaya aksial dan lentur didesain menggunakan analogi balok. Data yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} M_y \text{ max} &= 282,65 \text{ kNm} \\ f'_c &= 30 \text{ Mpa} \\ f_y &= 400 \text{ Mpa} \\ b &= 1000 \text{ mm} \\ h &= 750 \text{ mm} \\ d' &= 100 \text{ mm} \\ d &= 650 \text{ mm} \end{aligned}$$

Batas rasio tulangan maksimum balok adalah

$$\begin{aligned} \rho_{\min} &= \frac{1,4}{f_y} \\ &= \frac{1,4}{400} \\ &= 0,0035 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{\max} &= 0,75 \cdot \frac{\beta \cdot f'_c}{f_y} \cdot \beta \cdot \frac{600}{600+f_y} \\ &= 0,75 \cdot \frac{0,85 \cdot 30}{400} \cdot 0,85 \cdot \frac{600}{600+400} \\ &= 0,0207 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_n &= M_y \cdot 10^6 / \Phi \cdot b \cdot d^2 \\ &= 282,65 \cdot 10^6 / 0,85 \cdot 1000 \cdot 650^2 \\ &= 0,787 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\omega &= 0,85 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot Rn}{f'c}} \right) \\ &= 0,85 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot 0,787}{30}} \right) \\ &= 0,0267\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho &= \omega \cdot \frac{f'c}{f_y} \\ &= 0,0267 \cdot \frac{30}{400} \\ &= 0,001999 \text{ (lebih kecil dari } \rho_{\min} \text{, maka yang digunakan } \rho_{\min}\text{)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}As &= \rho \cdot b \cdot d \\ &= 0,0035 \cdot 1000 \cdot 650 \\ &= 2275 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

Coba-coba tulangan D22, D19, dan D16

Luas penampang:

$$\text{Penampang D22} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 22^2 = 379,940 \text{ mm}^2$$

$$\text{Penampang D19} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 19^2 = 283,385 \text{ mm}^2$$

$$\text{Penampang D16} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 16^2 = 200,96 \text{ mm}^2$$

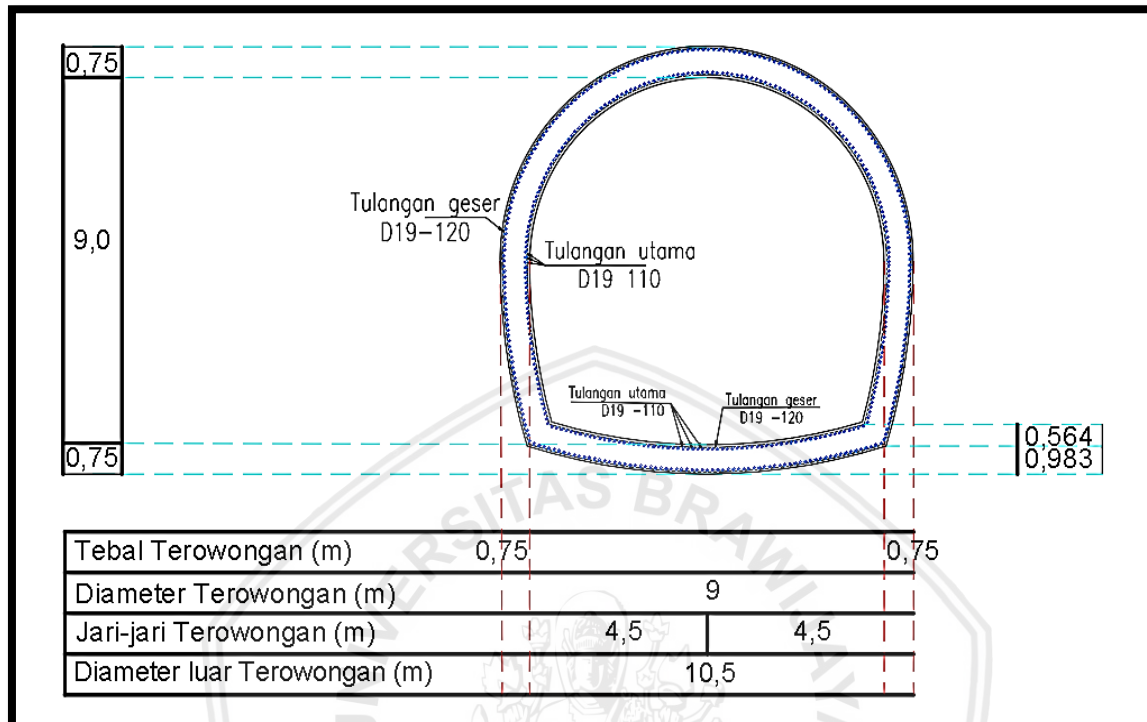
jadi :

1. Memakai D22 membutuhkan jumlah $= As / 379,940$
 $= 5,988 \sim 6$ buah
 Jarak bersih antar tulangan (Sn) $= b / (as/379,940)$
 $= 167 \text{ mm} \sim 160 \text{ mm}$
 As $= 379,940 \cdot b / Sn$
 $= 2374 \text{ mm}^2 \geq As$ perlu (memenuhi)
2. Memakai D19 membutuhkan jumlah $= As / 283,385$
 $= 8$ buah
 Jarak bersih antar tulangan (Sn) $= b / (as/283,385)$
 $= 124,56 \text{ mm} \sim 120 \text{ mm}$
 As $= 283,385 \cdot b / Sn$
 $= 2361 \text{ mm}^2 \geq As$ perlu (memenuhi)
3. Memakai D16 membutuhkan jumlah $= As / 200,96$
 $= 11,32 \sim 12$ buah
 Jarak bersih antar tulangan (Sn) $= b / (as/490,625)$
 $= 88,028 \text{ mm} \sim 80 \text{ mm}$

$$As = 490,625 \cdot b / S_n$$

$$= 2512 \text{ mm}^2 \geq As \text{ perlu (memenuhi)}$$

Digunakan D19 -120



Gambar 4.67 Sketsa Penulangan pada Terowongan Pengelak
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

4.11 Rekapitulasi Momen, Normal, dan Lintang Maksimum Metode Beggs

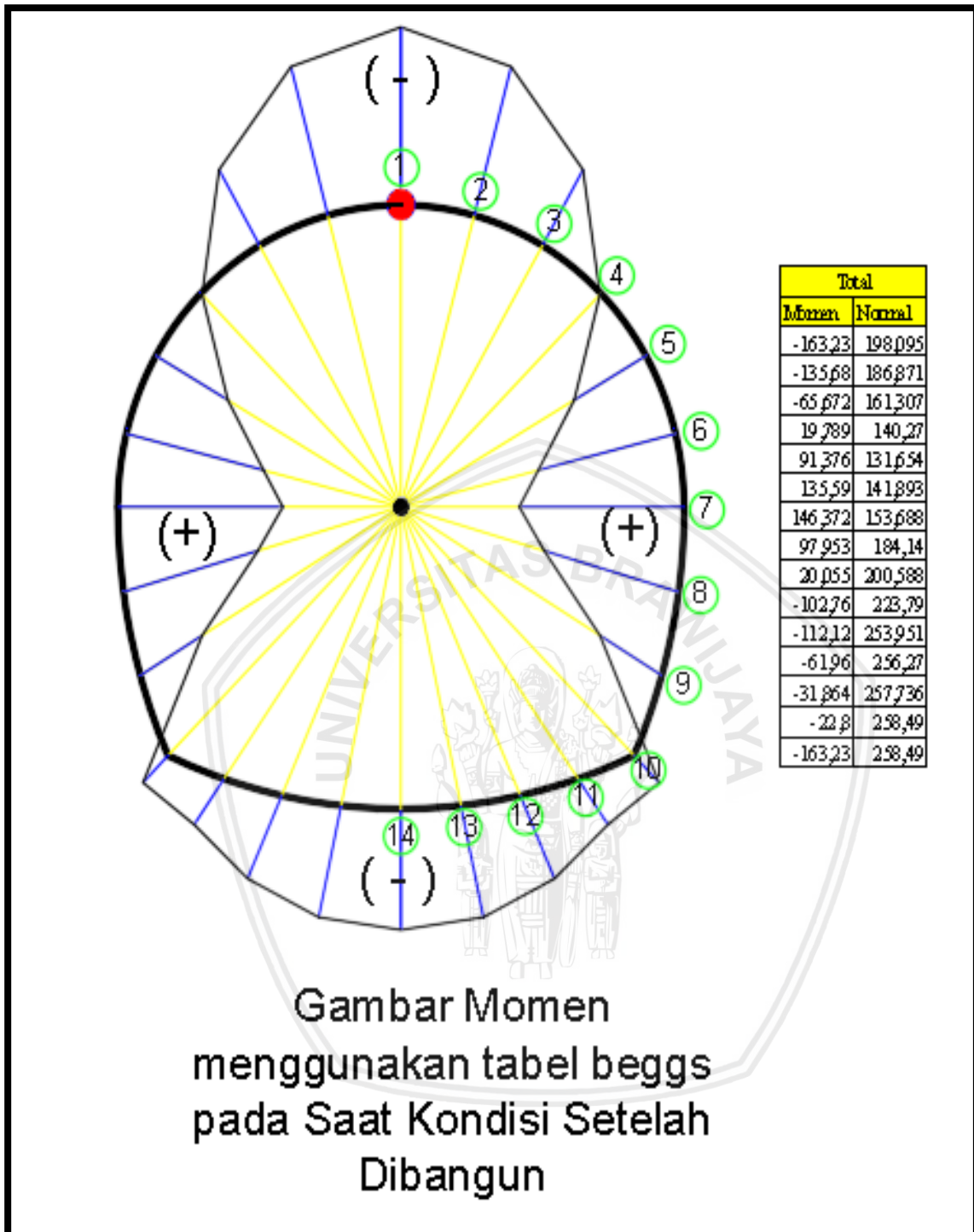
Dari hasil perhitungan momen, normal, dan lintang secara manual berdasarkan tabel *Beggs Deformation Analysis of Single Barrel Conduit*, maka rekapitulasi nilai maksimum dari momen, normal, dan lintangnya adalah sebagai berikut:

Tabel 4.59

Rekapitulasi Momen, Normal, dan Lintang Maksimum Menggunakan Metode Beggs

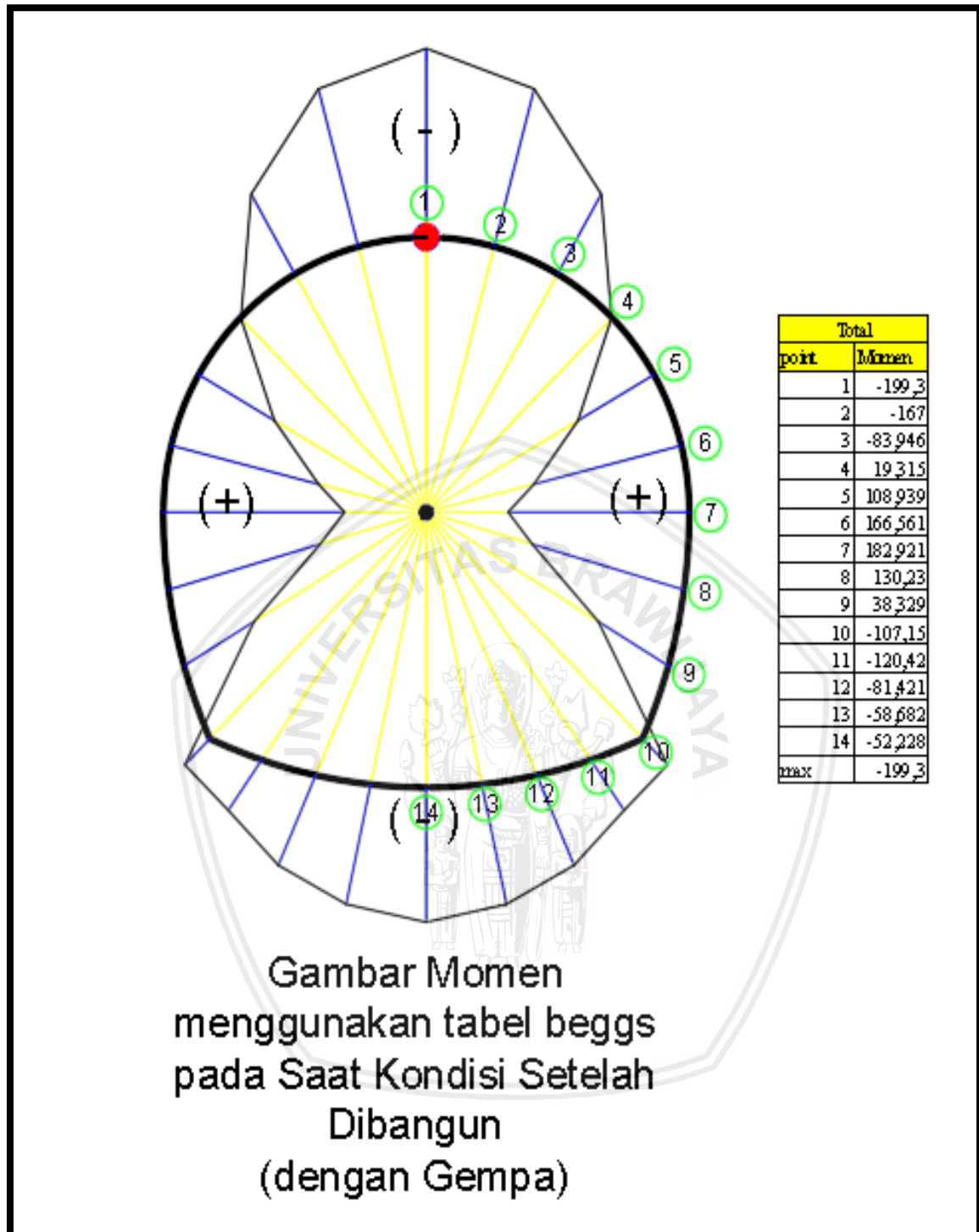
No	Kondisi	Momen (ton . m)	Normal (ton . m)	Lintang (ton . m)
1	Setelah Dibangun	-163,226	258,4903	112,4012
2	Setelah Dibangun (gempa)	-199,300	288,5785	133,2071
3	Terowongan Beroperasi	241,512	298,6594	32,50982
4	Terowongan Beroperasi (gempa)	212,083	299,6878	24,15053
	maks	241,512	299,6878	133,2071

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)



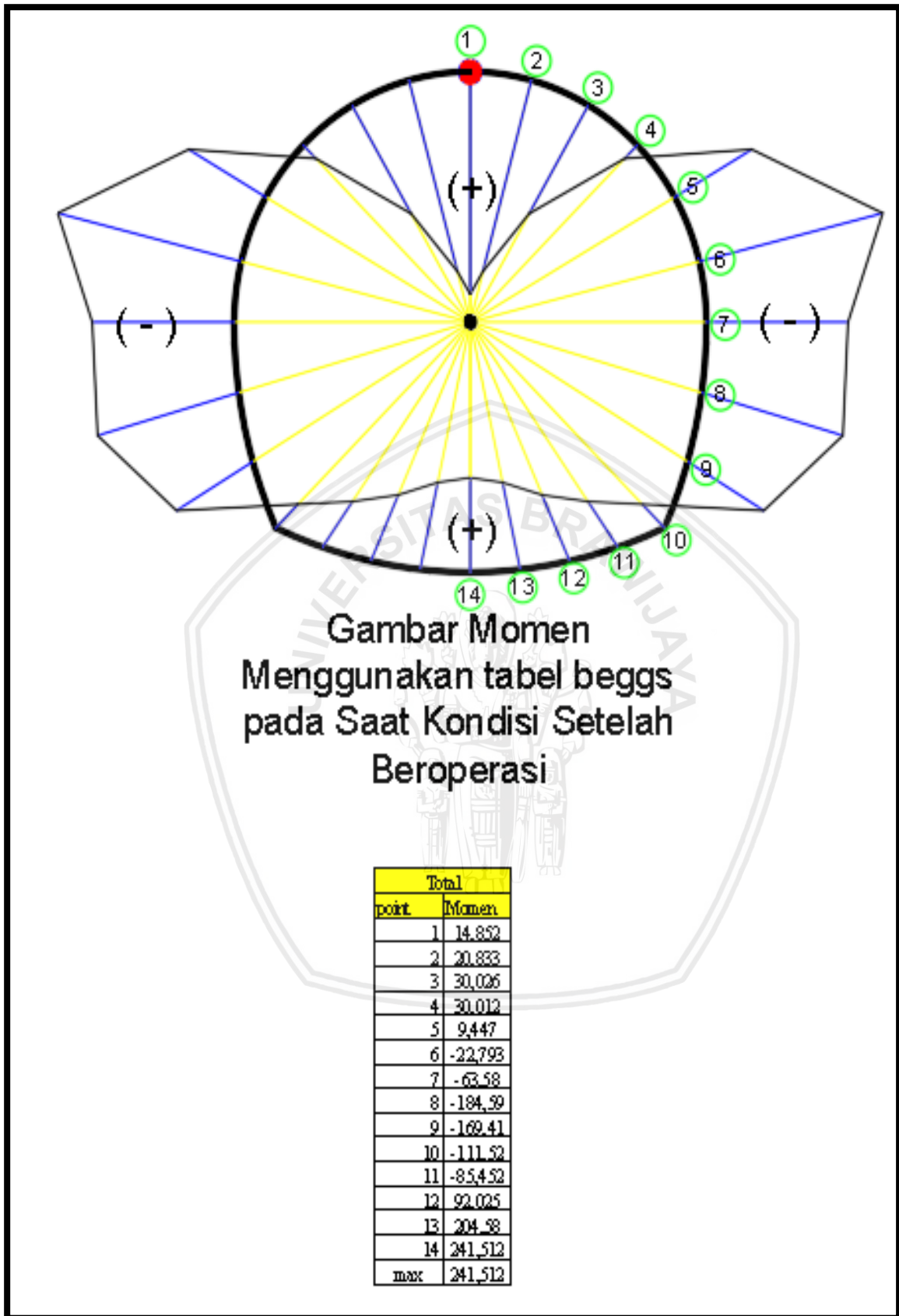
Gambar 4.68 Momen Menggunakan Tabel Beggs pada Kondisi Setelah Dibangun

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



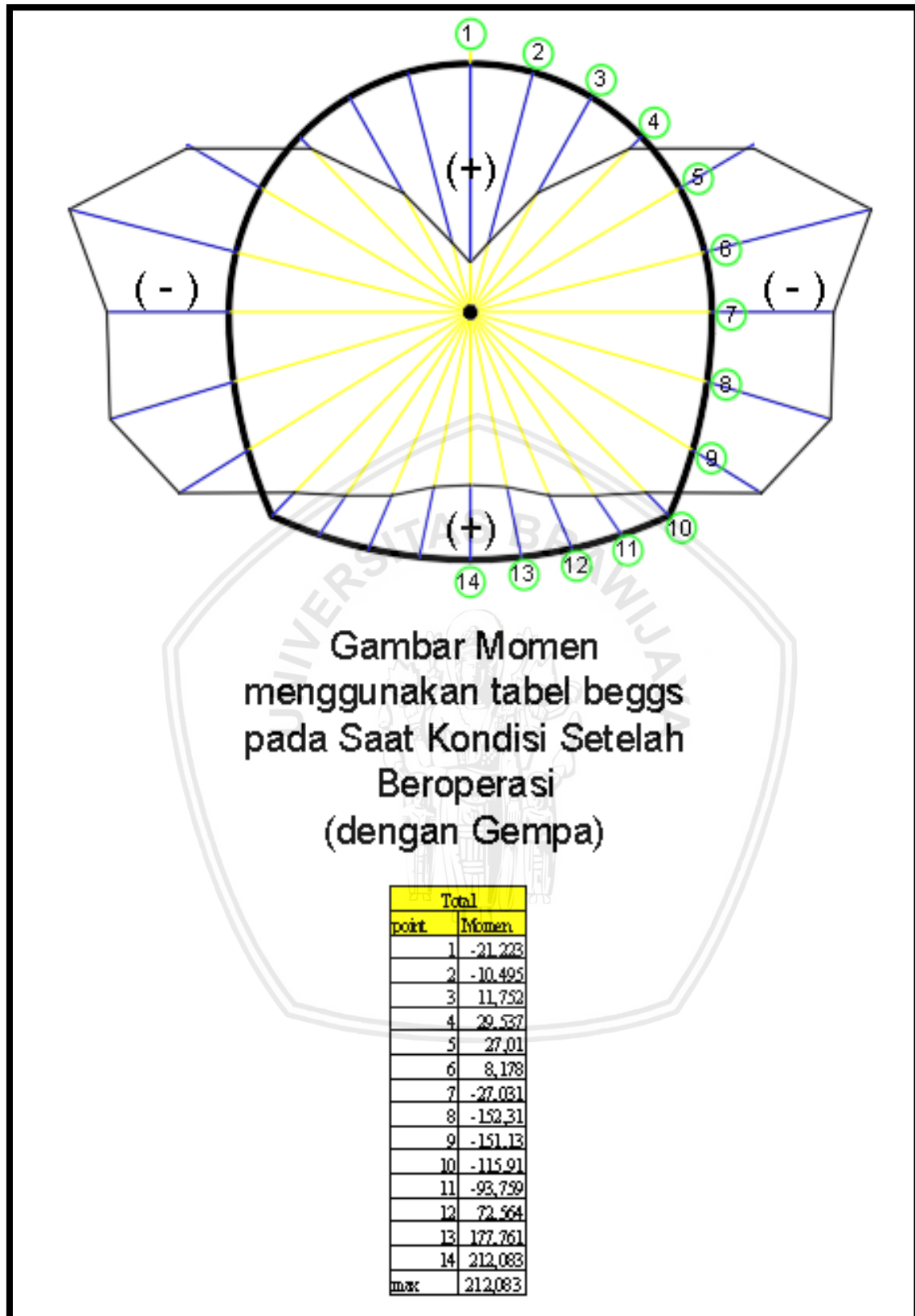
Gambar 4.69 Momen Menggunakan Tabel Beggs pada Kondisi Setelah Dibangun (dengan Gempa)

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.70 Momen Menggunakan Tabel Beggs pada Kondisi Setelah Beroperasi

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.71 Momen Menggunakan Tabel Beggs pada Kondisi Setelah Beroperasi (dengan Gempa)

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Dari analisa perhitungan momen yang dilakukan oleh tabel beggs menggunakan konsep 2 dimensi maka hasil dari momen maksimum didapatkan jauh lebih tinggi dari hasil perhitungan menggunakan software staad pro. Hal ini dikarenakan tinjauan secara dua dimensi kurang dapat mewakili beban yang ada, sehingga untuk membuat konstruksi aman, maka tinjauan secara 2 dimensi akan menghasilkan nilai yang besar. Kemudian sebuah kelemahan dari metode beggs jika dibandingkan dengan staad pro yaitu pada metode beggs tumpuan tidak diperhitungkan, tumpuan diasumsikan sebagai gaya vertikal atau menjadi sebuah beban.

Momen maksimum = 241,512 ton.m

Normal maksimum = 299,687 ton

Lintang maksimum = 133,207 ton

4.12 Penulangan pada Terowongan

Beton bertulang adalah beton yang terdiri dari beton dan baja. Karena beton kuat terhadap tegangan tekan dan lemah terhadap tegangan tarik, maka diperlukan baja untuk menahan tegangan tarik.

$M_u \text{ max} = 241,512 \text{ tm} = 2368,424 \text{ kNm}$

$D \text{ max} = 133,207 \text{ t} = 1306,31 \text{ kN}$

Terowongan pengelak Bendungan Kualu direncanakan dengan plat setebal 0,75 m = 75 cm. Pemilihan ketebalan plat ini berdasarkan tabel *Beggs Deformation Analysis of Single Barrel Conduit*, Dimana untuk ketebalan dari plat beton yang direncanakan diberikan 3 pilihan yaitu $t = r/2$, $t = r/3$, $t = r/6$. Dalam perhitungannya desain plat beton pada bendungan kualu direncanakan dengan ketebalan plat yang paling tipis yaitu $t = r/6$, dengan pertimbangan pada perhitungan as perhitungan $\geq A_s$ perlu.

4.12.1 Penulangan Utama Hasil Metode Beggs

Plat / cangkang yang menerima gaya aksial dan lentur didesain menggunakan analogi balok. Data yang digunakan adalah sebagai berikut:

$f'_c = 30 \text{ Mpa}$

$f_y = 400 \text{ Mpa}$

$b = 1000 \text{ mm}$

$h = 750 \text{ mm}$

$d' = 100 \text{ mm}$

$d = 650 \text{ mm}$

Batas rasio tulangan maksimum balok adalah

$$\begin{aligned}\rho_{\min} &= \frac{1,4}{f_y} \\ &= \frac{1,4}{400} \\ &= 0,0035\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{\max} &= 0,75 \cdot \frac{\beta \cdot f_c'}{f_y} \cdot \beta \cdot \frac{600}{600 + f_y} \\ &= 0,75 \cdot \frac{0,85 \cdot 30}{400} \cdot 0,85 \cdot \frac{600}{600 + 400} \\ &= 0,0207\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}R_n &= M_x \max \cdot 10^6 / \Phi \cdot b \cdot d^2 \\ &= 3,36\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\omega &= 0,85 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot R_n}{f_c'}} \right) \\ &= 0,85 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot 3,36}{30}} \right) \\ &= 0,12\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho &= \omega \cdot \frac{f_c'}{f_y} \\ &= 0,265 \cdot \frac{30}{400} \\ &= 0,009 \text{ (lebih besar dari } \rho_{\min} \text{, maka yang digunakan } \rho)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A_s &= \rho \cdot b \cdot d \\ &= 0,0199 \cdot 1000 \cdot 650 \\ &= 5881 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

Coba-coba tulangan D25, D22, dan D19

Luas penampang:

$$\text{Penampang D25} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 25^2 = 490,625 \text{ mm}^2$$

$$\text{Penampang D22} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 22^2 = 379,940 \text{ mm}^2$$

$$\text{Penampang D29} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 19^2 = 660,185 \text{ mm}^2$$

jadi :

$$4. \text{ Memakai D25 membutuhkan jumlah} = A_s / 490,625$$

$$= 11,98 \sim 12 \text{ buah}$$

$$\text{Jarak bersih antar tulangan (S}_n\text{)} = b / (a_s/490,625)$$

$$= 83,42 \text{ mm} = 80 \text{ mm}$$

$$A_s = 490,625 \cdot b / S_n$$

$$= 6132 \text{ mm}^2 \geq A_s \text{ perlu (memenuhi)}$$

5. Memakai D22 membutuhkan jumlah = $A_s / 379,940$
 = 15,47 ~ 16 buah
- Jarak bersih antar tulangan (S_n) = $b / (a_s/379,940)$
 = 64,6 mm = 60 mm
- A_s = $379,940 \cdot b / S_n$
 = $6332 \text{ mm}^2 \geq A_s$ perlu (memenuhi)
6. Memakai D29 membutuhkan jumlah = $A_s / 660,185$
 = 8,9 ~ 9 buah
- Jarak bersih antar tulangan (S_n) = $b / (a_s/660,185)$
 = 112,25 mm = 110 mm
- A_s = $660,185 \cdot b / S_n$
 = $6001 \text{ mm}^2 \geq A_s$ perlu (memenuhi)

Dari hasil perhitungan dipilih menggunakan D29 – 110

4.12.2 Penulangan Bagi Hasil Metode Beggs

Plat / cangkang yang menerima gaya aksial dan lentur didesain menggunakan analogi balok. Data yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} f'_c &= 30 \text{ Mpa} \\ f_y &= 240 \text{ Mpa} \\ b &= 1000 \text{ mm} \\ h &= 750 \text{ mm} \\ d' &= 100 \text{ mm} \\ d &= 650 \text{ mm} \end{aligned}$$

Perhitungan:

$$\begin{aligned} A_s \text{ perlu} &= (0,18 \cdot b \cdot h) / 100 \\ &= 1350 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Luas penampang:

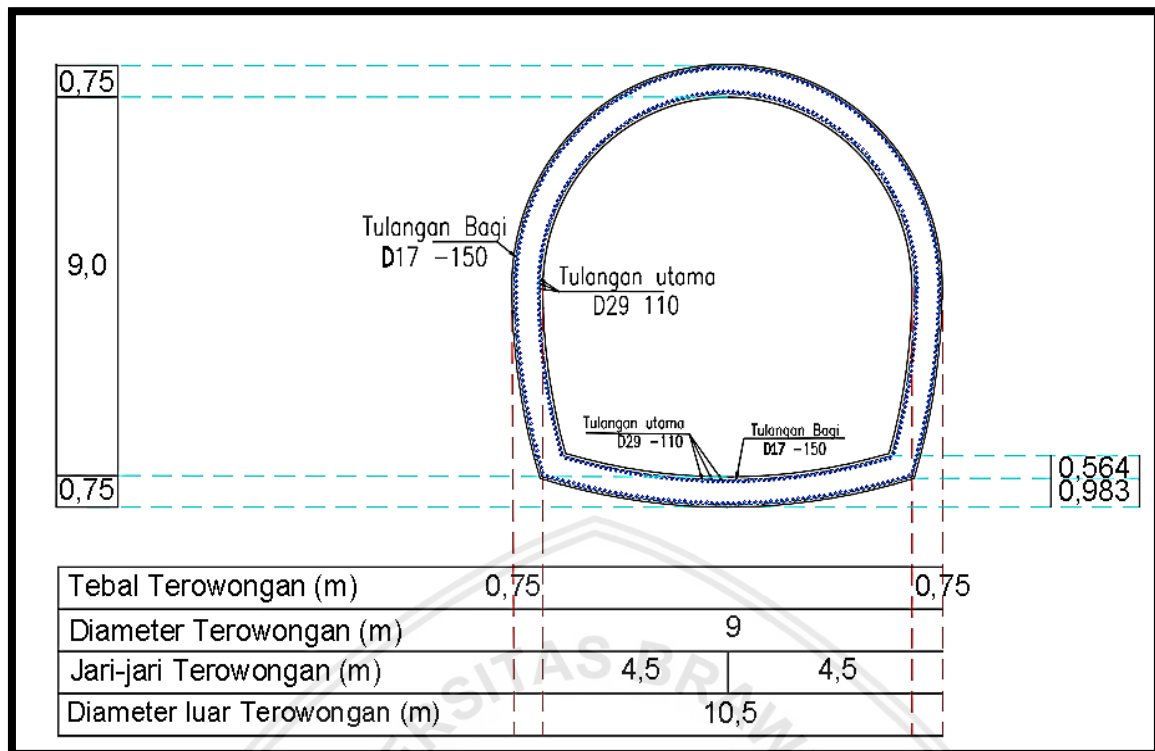
$$\text{Penampang D 17} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 22^2 = 226,865 \text{ mm}^2$$

jadi memakai D 17 membutuhkan $s = 168,0481 \text{ mm} \sim$ digunakan $s = 150 \text{ mm}$

Kontrol

$$\begin{aligned} A_s &= 226,865 \cdot b / S_n \\ &= 1512,433 \text{ mm}^2 \geq A_s \text{ perlu (memenuhi)} \end{aligned}$$

Digunakan D17 - 150



Gambar 4.72 Sketsa Penulangan pada Terowongan Pengelak
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

- Analisa Perbandingan Perhitungan Metode Beggs dan Software Staad Pro

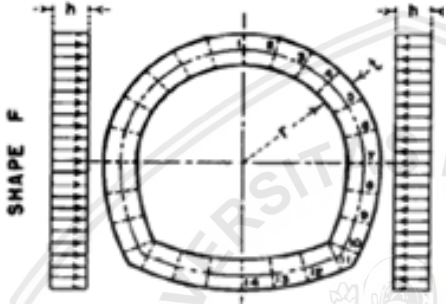
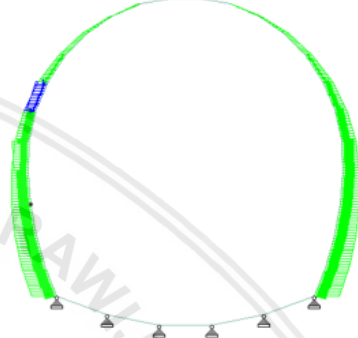
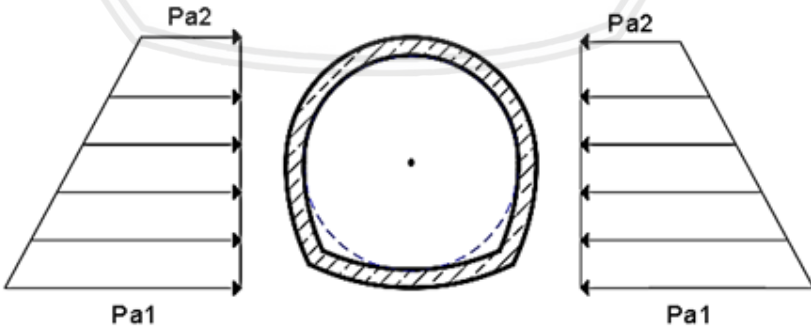
Analisa ini dilakukan dengan tujuan untuk menentukan hasil perhitungan momen yang akan digunakan dalam perhitungan penulangan pada terowongan pengelak. Perbandingan hasil perhitungan keduanya dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 4.60

Perbandingan Perhitungan Antara Metode Beggs dan Software Staad Pro

	Metode Beggs	Staad Pro
1. Tinjauan	Perhitungan menggunakan metode Beggs ditinjau secara 2D	Perhitungan menggunakan Staad Pro ditinjau secara 3D
	Hasil perhitungan secara 2D menunjukkan hasil momen maksimum yang jauh lebih besar apabila dibandingkan dengan perhitungan secara 3D. Hal ini dapat diakibatkan oleh tinjauan secara 3D perhitungan lebih detail dari segi input pembebanan. Input pembebanan pada perhitungan secara 3D dilakukan mulai dari bentuk dari diagram tekanan dan jenis pembebanannya.	

Lanjutan Tabel 4.60
Perbandingan Perhitungan Antara Metode Beggs dan Software Staad Pro

	Metode Beggs	Staad Pro
<p>2. Tekanan Batuan Horizontal</p>	<p>Pada metode Beggs perhitungan tekanan batuan horizontal digunakan tekanan paling maksimum yang terjadi. Gaya dianggap seragam di samping terowongan.</p> 	<p>Diagram gaya pada Software Staad Pro berbentuk trapezium yang dapat dikatakan lebih mewakili hasil dari perhitungan pembebanan tekanan batuan horizontal yang diagramnya berbentuk trapezium</p> 
	<p>Diagram tekanan batuan horizontal yang terjadi pada terowongan yang sesuai pada perhitungan pembebanan ialah berbentuk trapesium disamping teowongan. Diagram pembebanannya dapat dilihat seperti gambar di bawah ini:</p> <p style="text-align: center;">Tekanan Batuan Horizontal</p> 	

Lanjutan Tabel 4.60

Perbandingan Perhitungan Antara Metode Beggs dan Software Staad Pro

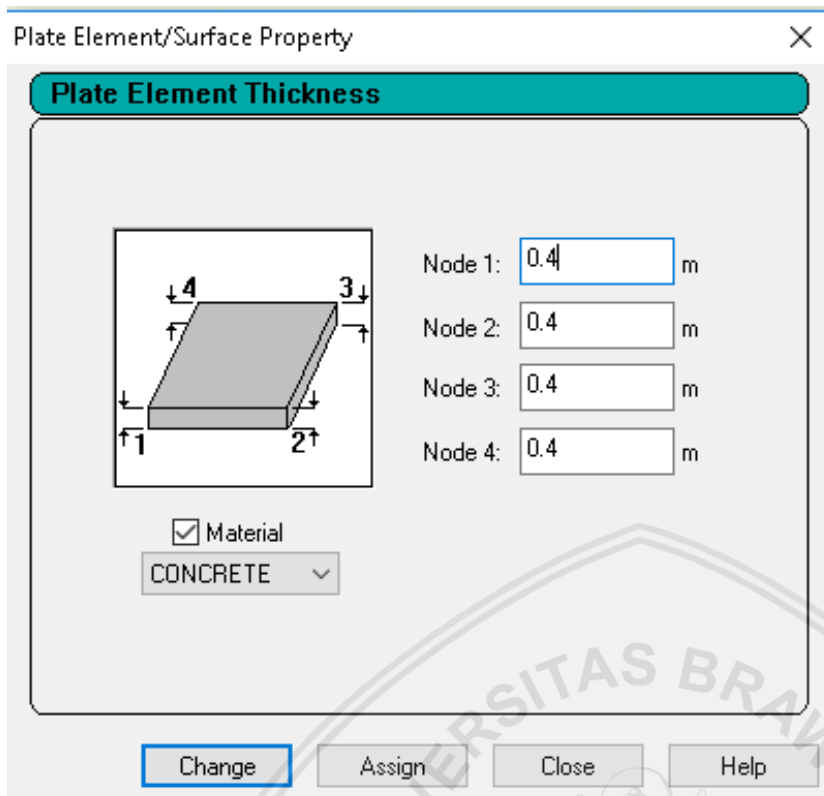
	Metode Beggs	Staad Pro
3. Tumpuan	Pada Metode Beggs tumpuan tidak diperhitungkan, gaya vertikal diasumsikan sudah dapat mewakili kondisi tumpuan.	Pada Staad Pro tumpuan diasumsikan sebagai sendi hal ini dikarenakan untuk tumpuan roll tidak mungkin digunakan pada terowongan pengelak dan tumpuan jepit biasanya digunakan pada struktur yang langsung terhubung dengan tanah (seperti perhitungan pondasi dll)
	Perbedaan pada tumpuan ini dimungkinkan merupakan penyebab terjadinya perbedaan letak dari momen maksimum pada terowongan. Pada metode Beggs momen maksimum terletak di atas terowongan (pada point 1). Sedangkan pada metode Staad Pro titik maksimum berada di dekat kedua tumpuan. Hasil Perhitungan dari momen metode Beggs merupakan momen searah dengan sumbu x pada software Staad Pro.	

Sumber: Hasil Perhitungan (2019)

4.13 Alternatif Desain Terowongan Pengelak

Perhitungan alternative desain terowongan pengelak berisi desain tambahan pada terowongan pengelak yang akan dihitung menggunakan penampang yang lebih ekonomis. Karena pada perhitungan sebelumnya desain ketebalan plat beton diperhitungkan dengan desain paling ekonomis yang tersedia pada tabel *beegs* yaitu $t = r/6 = 0,75$ m. Kemudian pada tabel *beggs* tidak tersedia untuk perhitungan momen, lintang, dan normal untuk ketebalan plat beton kurang dari $r/6$, maka pada analisa ini hanya akan dihitung menggunakan software Staad Pro.

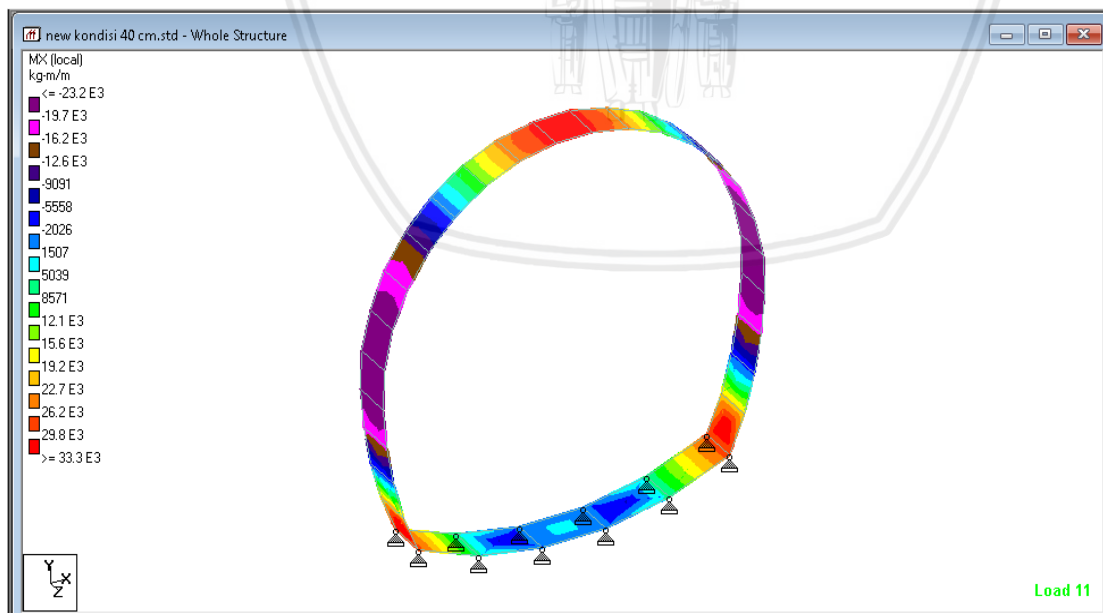
Percobaan pertama akan dihitung menggunakan plat setebal 40 cm.



Gambar 4.73 Input Tebal Plat (40 cm)

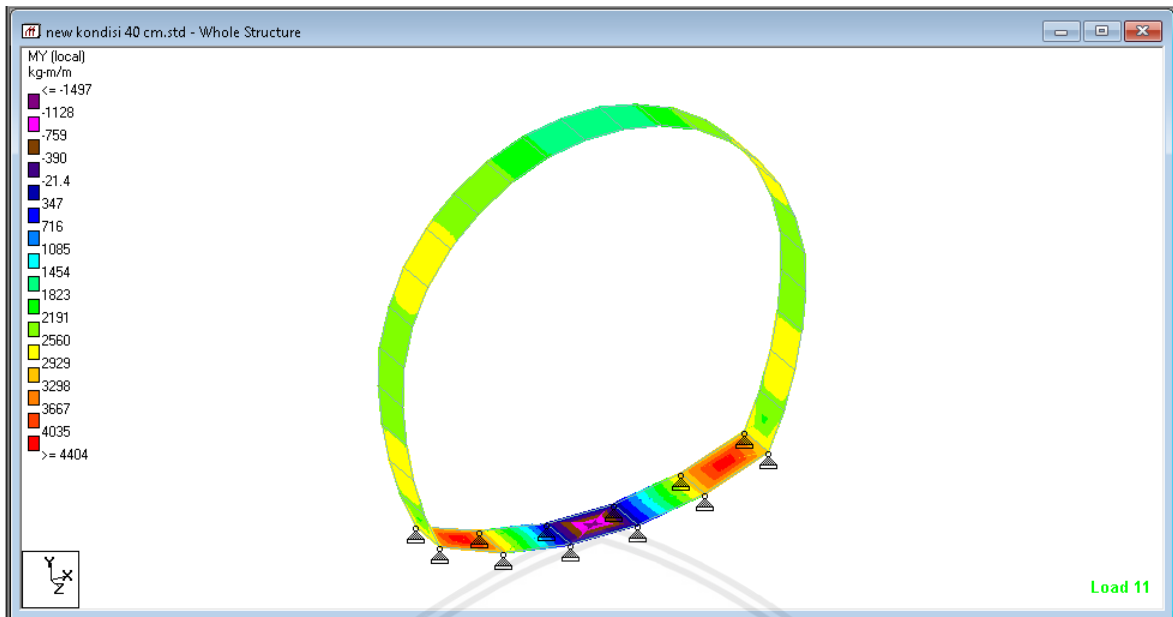
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Dengan Kondisi pembebanan serupa dengan perhitungan sebelumnya maka didapatkan:



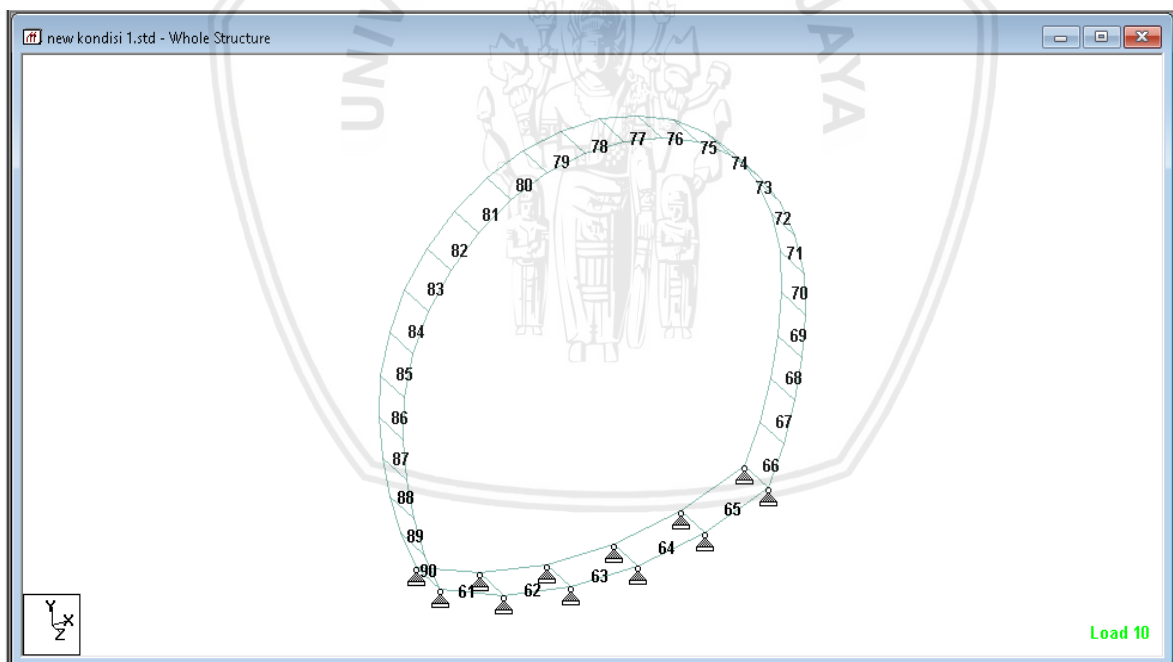
Gambar 4.74 Momen pada Sumbu x untuk Plat Setebal 40 cm

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.75 Momen pada Sumbu y untuk Plat Setebal 40 cm

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.76 Penomoran Plat untuk Plat Setebal 40 cm

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Kemudian dilakukan analisa pada plat. Momen maksimum pada plat dianalisa menjadi plat bagian bawah (plat nomor 61-65) dan plat bagian atas (plat nomor 66 – 90). Hasil perhitungan momen maksimum adalah sebagai berikut:

Tabel 4.61

Momen Maksimum Searah Sumbu x (Mx) untuk Tebal Plat 40 cm

No	Keterangan	No Plat	Kondisi	Momen Max (ton.m)
1	Plat bagian bawah	64	Setelah Beroperasi	66,890
2	Plat bagian atas	66	Setelah Beroperasi	45,371

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.62

Momen Maksimum Searah Sumbu y (My) untuk Tebal Plat 40 cm

No	Keterangan	No Plat	Kondisi	Momen Max (ton.m)
1	Plat bagian bawah	64	Setelah Beroperasi	25,000
2	Plat bagian atas	66	Setelah Beroperasi	10,919

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Kemudian dilakukan perhitungan penulangan. Perhitungan tulangan utama bawah:

$$M_x \text{ max bawah} = 668,9 \text{ kNm}$$

$$f'_c = 30 \text{ Mpa}$$

$$f_y = 400 \text{ Mpa}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$h = 400 \text{ mm}$$

$$d' = 100 \text{ mm}$$

$$d = 300 \text{ mm}$$

Batas rasio tulangan maksimum adalah

$$\begin{aligned} \rho_{\min} &= \frac{1,4}{f_y} \\ &= \frac{1,4}{400} \\ &= 0,0035 \end{aligned}$$

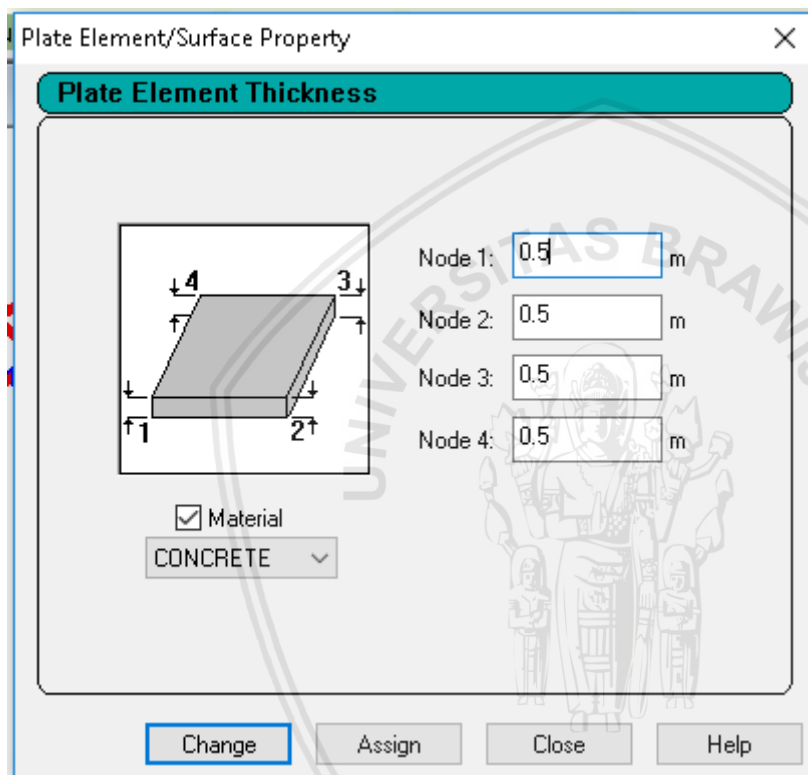
$$\begin{aligned} \rho_{\max} &= 0,75 \cdot \frac{\beta \cdot f'_c}{f_y} \cdot \beta \cdot \frac{600}{600+f_y} \\ &= 0,75 \cdot \frac{0,85 \cdot 30}{400} \cdot 0,85 \cdot \frac{600}{600+400} \\ &= 0,0207 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_n &= M_x \cdot 10^6 / \Phi \cdot b \cdot d^2 \\ &= 668,9 \cdot 10^6 / 0,85 \cdot 1000 \cdot 300^2 \\ &= 0,743 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega &= 0,85 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot R_n}{f'_c}} \right) \\ &= 0,85 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot 0,743}{30}} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,374 \\
 \rho &= \omega \cdot \frac{f'c}{f_y} \\
 &= 0,374 \cdot \frac{30}{400} \\
 &= 0,028
 \end{aligned}$$

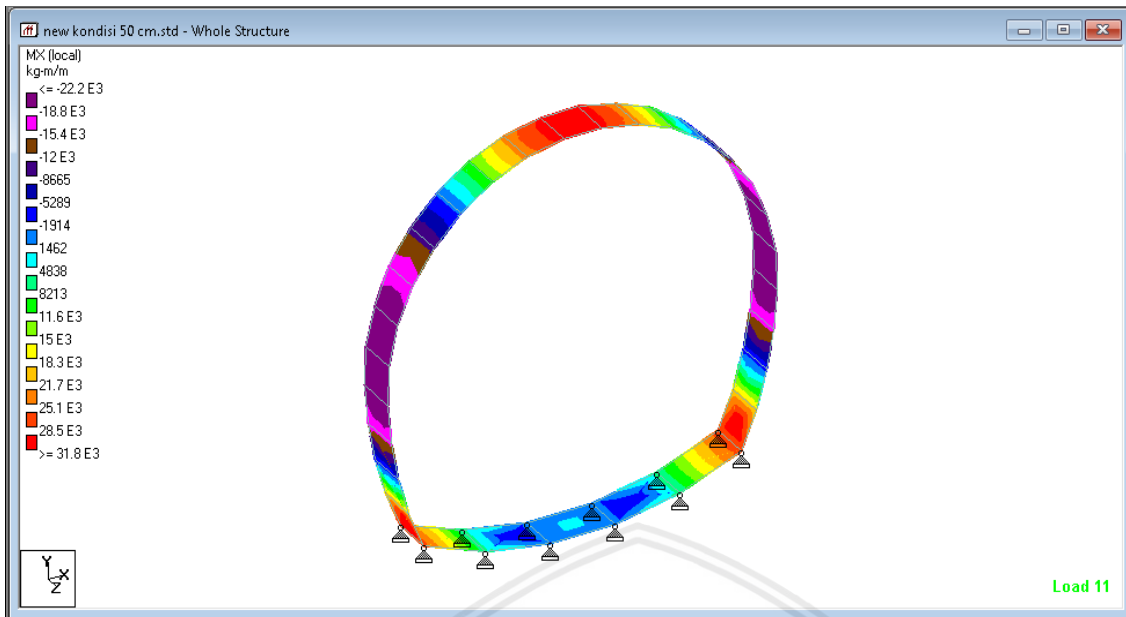
Karena nilai ρ lebih besar dari pada ρ_{\max} , maka dapat disimpulkan bahwa dimensi terlalu kecil untuk dapat diisi oleh tulangan yang diperlukan. Sehingga dilakukan percobaan yang kedua yaitu menggunakan plat dengan tebal 50 cm.



Gambar 4.77 Input Tebal Plat (50 cm)

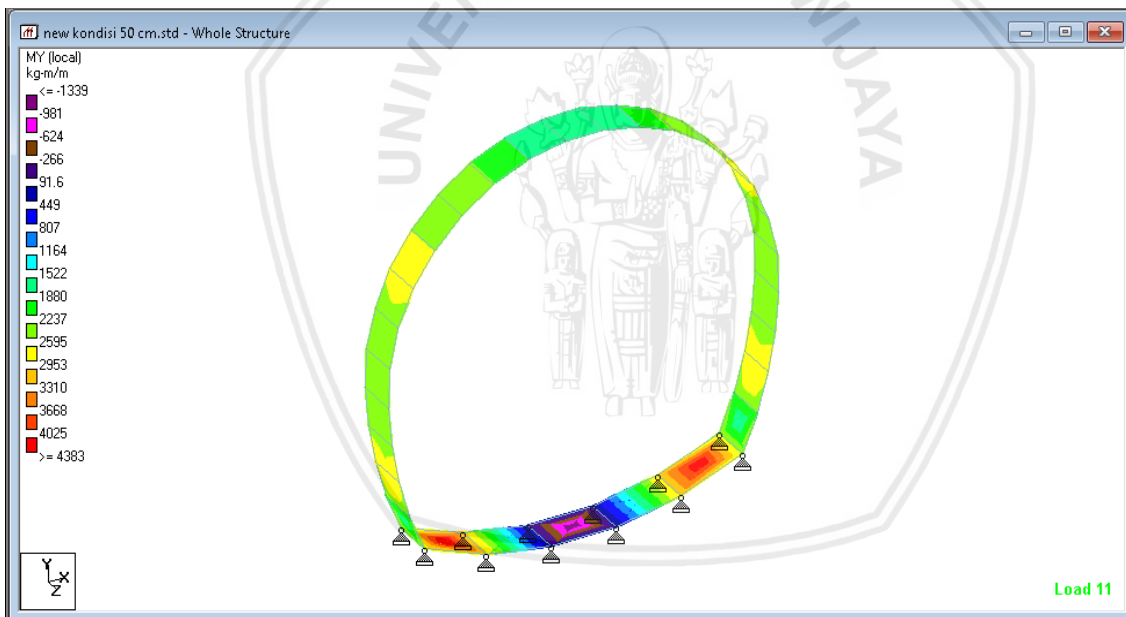
Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Dengan Kondisi pembebanan serupa dengan perhitungannya sebelumnya didapatkan:



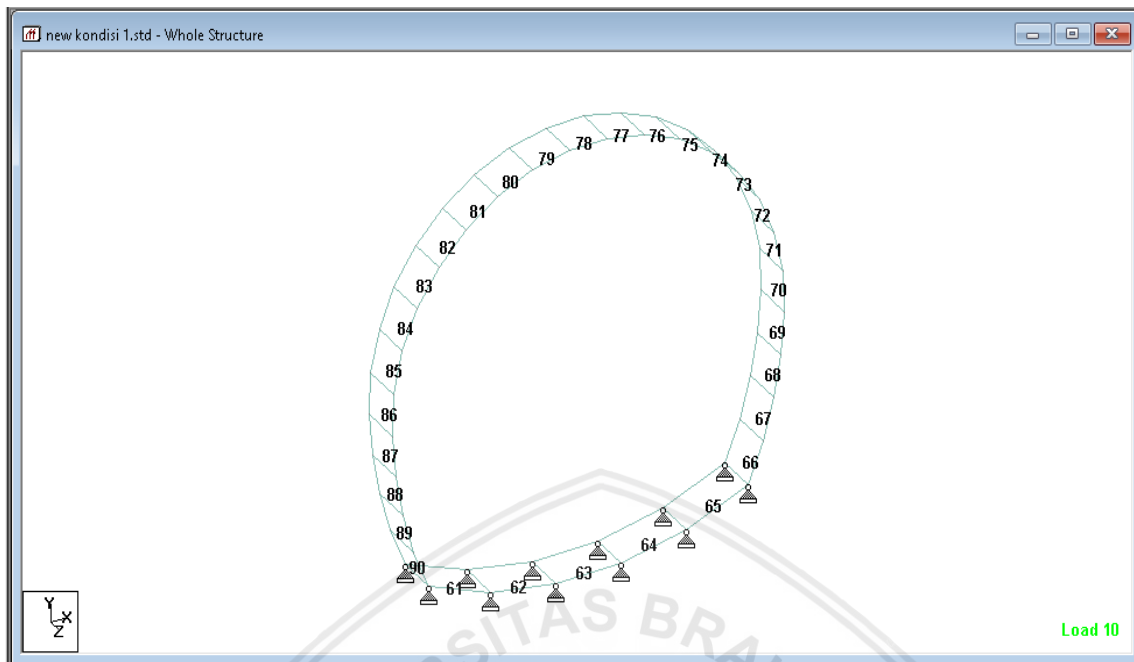
Gambar 4.78 Momen pada sumbu x untuk Tebal Plat 50 cm

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.79 Momen pada Sumbu y Untuk Tebal Plat 50 cm

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.80 Penomoran Plat untuk Tebal Plat 50 cm

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Kemudian dilakukan analisa pada plat. Momen maksimum pada plat dianalisa menjadi plat bagian bawah (plat nomor 61-65) dan plat bagian atas (plat nomor 66 – 90). Hasil perhitungan momen maksimum adalah sebagai berikut:

Tabel 4.63

Momen maksimum searah sumbu x (M_x) untuk Tebal Plat 50 cm

No	Keterangan	No Plat	Kondisi	Momen Max (ton.m)
1	Plat bagian bawah	64	Setelah Beroperasi	63,097
2	Plat bagian atas	66	Setelah Beroperasi	45,114

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Tabel 4.64

Momen maksimum searah sumbu y (M_y) untuk Tebal Plat 50 cm

No	Keterangan	No Plat	Kondisi	Momen Max (ton.m)
1	Plat bagian bawah	64	Setelah Beroperasi	26,743
2	Plat bagian atas	66	Setelah Beroperasi	17,518

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Kemudian dilakukan perhitungan penulangan. Perhitungan tulangan utama bawah:

$$M_x \text{ max bawah} = 630,97 \text{ kNm}$$

$$f'_c = 30 \text{ Mpa}$$

$$f_y = 400 \text{ Mpa}$$

$$\begin{aligned} b &= 1000 \text{ mm} \\ h &= 500 \text{ mm} \\ d' &= 100 \text{ mm} \\ d &= 400 \text{ mm} \end{aligned}$$

Batas rasio tulangan maksimum adalah

$$\begin{aligned} \rho_{\min} &= \frac{1,4}{f_y} \\ &= \frac{1,4}{400} \\ &= 0,0035 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{\max} &= 0,75 \cdot \frac{\beta \cdot f_{c'}'}{f_y} \cdot \beta \cdot \frac{600}{600+f_y} \\ &= 0,75 \cdot \frac{0,85 \cdot 30}{400} \cdot 0,85 \cdot \frac{600}{600+400} \\ &= 0,0207 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_n &= M_x \cdot 10^6 / \Phi \cdot b \cdot d^2 \\ &= 630,97 \cdot 10^6 / 0,85 \cdot 1000 \cdot 350^2 \\ &= 4,639 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega &= 0,85 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot R_n}{f_{r c}}} \right) \\ &= 0,85 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot 4,639}{30}} \right) \\ &= 0,172 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho &= \omega \cdot \frac{f_{r c}}{f_y} \\ &= 0,172 \cdot \frac{30}{400} \\ &= 0,0129 \text{ (karena } \rho \text{ lebih besar dari } \rho_{\min}, \text{ maka digunakan } \rho) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s &= \rho \cdot b \cdot d \\ &= 0,0129 \cdot 1000 \cdot 350 \\ &= 5162 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Coba-coba tulangan D29, D25, dan D22

Luas penampang:

$$\text{Penampang D29} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 19^2 = 660,185 \text{ mm}^2$$

$$\text{Penampang D25} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 25^2 = 490,625 \text{ mm}^2$$

$$\text{Penampang D22} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 22^2 = 379,940 \text{ mm}^2$$

jadi :

$$1. \text{ Memakai D29 membutuhkan jumlah} = A_s / 660,185$$

$$= 7,819 \sim 8 \text{ buah}$$

Jarak bersih antar tulangan (S_n)

$$= b / (as/660,185)$$

$$= 127,89\text{mm} = 120 \text{ mm}$$

As

$$= 660,185 \cdot b / S_n$$

$$= 5501 \text{ mm}^2 \geq \text{As perlu (memenuhi)}$$

2. Memakai D25 membutuhkan jumlah

$$= \text{As} / 490,625$$

$$= 10,52 \sim 11 \text{ buah}$$

Jarak bersih antar tulangan (S_n)

$$= b / (as/490,625)$$

$$= 95,043 \text{ mm} = 90 \text{ mm}$$

As

$$= 490,625 \cdot b / S_n$$

$$= 5451 \text{ mm}^2 \geq \text{As perlu (memenuhi)}$$

3. Memakai D22 membutuhkan jumlah

$$= \text{As} / 379,940$$

$$= 13,58 \sim 14 \text{ buah}$$

Jarak bersih antar tulangan (S_n)

$$= b / (as/379,940)$$

$$= 73,60 \text{ mm} = 70 \text{ mm}$$

As

$$= 379,940 \cdot b / S_n$$

$$= 5427 \text{ mm}^2 \geq \text{As perlu (memenuhi)}$$

Digunakan D25 – 90

Perhitungan tulangan utama atas:

$$M_x \text{ max atas} = 451,14 \text{ kNm}$$

$$f'_c = 30 \text{ Mpa}$$

$$f_y = 400 \text{ Mpa}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$h = 500 \text{ mm}$$

$$d' = 100 \text{ mm}$$

$$d = 400 \text{ mm}$$

Batas rasio tulangan maksimum balok adalah

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y}$$

$$= \frac{1,4}{400}$$

$$= 0,0035$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \frac{\beta \cdot f'_c}{f_y} \cdot \beta \cdot \frac{600}{600 + f_y}$$

$$= 0,75 \cdot \frac{0,85 \cdot 30}{400} \cdot 0,85 \cdot \frac{600}{600 + 400}$$

$$= 0,0207$$

$$\begin{aligned} R_n &= M_x \cdot 10^6 / \Phi \cdot b \cdot d^2 \\ &= 451,14 \cdot 10^6 / 0,85 \cdot 1000 \cdot 350^2 \\ &= 3,317 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega &= 0,85 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot R_n}{f'rc}} \right) \\ &= 0,85 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot 3,317}{30}} \right) \\ &= 0,119 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho &= \omega \cdot \frac{f'rc}{f_y} \\ &= 0,119 \cdot \frac{30}{400} \\ &= 0,008917 \quad (\text{karena } \rho \text{ lebih besar dari } \rho_{\min}, \text{ maka digunakan } \rho) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s &= \rho \cdot b \cdot d \\ &= 0,0089 \cdot 1000 \cdot 375 \\ &= 3566 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Coba-coba tulangan D25, D22, dan D19

Luas penampang:

$$\text{Penampang D25} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 25^2 = 490,625 \text{ mm}^2$$

$$\text{Penampang D22} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 22^2 = 379,940 \text{ mm}^2$$

$$\text{Penampang D19} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 19^2 = 283,385 \text{ mm}^2$$

jadi :

$$\begin{aligned} 1. \text{ Memakai D25 membutuhkan jumlah} &= A_s / 490,625 \\ &= 7,269 \sim 8 \text{ buah} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jarak bersih antar tulangan (S}_n) &= b / (A_s/490,625) \\ &= 137,556 \text{ mm} = 130 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s &= 490,625 \cdot b / S_n \\ &= 3774 \text{ mm}^2 \geq A_s \text{ perlu (memenuhi)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2. \text{ Memakai D22 membutuhkan jumlah} &= A_s / 379,940 \\ &= 9,387 \sim 10 \text{ buah} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jarak bersih antar tulangan (S}_n) &= b / (A_s/379,940) \\ &= 106,52 \text{ mm} = 100 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s &= 379,940 \cdot b / S_n \\ &= 3799 \text{ mm}^2 \geq A_s \text{ perlu (memenuhi)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3. \text{ Memakai D19 membutuhkan jumlah} &= A_s / 283,385 \\
 &= 12,58 \text{ buah} \sim 13 \text{ buah} \\
 \text{Jarak bersih antar tulangan (S}_n\text{)} &= b / (a_s/283,385) \\
 &= 79,45 \text{ mm} = 75 \text{ mm} \\
 A_s &= 283,385 \cdot b / S_n \\
 &= 3778 \text{ mm}^2 \geq A_s \text{ perlu (memenuhi)}
 \end{aligned}$$

Digunakan D25 - 130

Perhitungan tulangan bagi:

$$M_y \text{ max} = 267,43 \text{ kNm}$$

$$f'_c = 30 \text{ Mpa}$$

$$f_y = 400 \text{ Mpa}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$h = 500 \text{ mm}$$

$$d' = 100 \text{ mm}$$

$$d = 400 \text{ mm}$$

Batas rasio tulangan maksimum balok adalah

$$\begin{aligned}
 \rho_{\min} &= \frac{1,4}{f_y} \\
 &= \frac{1,4}{400} \\
 &= 0,0035
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_{\max} &= 0,75 \cdot \frac{\beta \cdot f'_c}{f_y} \cdot \beta \cdot \frac{600}{600+f_y} \\
 &= 0,75 \cdot \frac{0,85 \cdot 30}{400} \cdot 0,85 \cdot \frac{600}{600+400} \\
 &= 0,0207
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_n &= M_x \cdot 10^6 / \Phi \cdot b \cdot d^2 \\
 &= 267,43 \cdot 10^6 / 0,85 \cdot 1000 \cdot 350^2 \\
 &= 1,966
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega &= 0,85 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot R_n}{f'_c}} \right) \\
 &= 0,85 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot 1,966}{30}} \right) \\
 &= 0,068
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho &= \omega \cdot \frac{f'_c}{f_y} \\
 &= 0,068 \cdot \frac{30}{400}
 \end{aligned}$$

$$= 0,005 \quad (\text{karena } \rho \text{ lebih dari } \rho_{\min}, \text{ maka digunakan } \rho)$$

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d$$

$$= 0,005 \cdot 1000 \cdot 375$$

$$= 1400 \text{ mm}^2$$

Coba-coba tulangan D19 , D16, dan D13

Luas penampang:

$$\text{Penampang D19} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 19^2 = 283,385 \text{ mm}^2$$

$$\text{Penampang D17} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 17^2 = 226,98 \text{ mm}^2$$

jadi :

$$1. \text{ Memakai D19 membutuhkan jumlah} = A_s / 283,385$$

$$= 4,94 \sim 5 \text{ buah}$$

$$\text{Jarak bersih antar tulangan (Sn)} = b / (A_s / 283,385)$$

$$= 202,41 \text{ mm} = 200 \text{ mm}$$

$$A_s = 283,385 \cdot b / S_n$$

$$= 1435 \text{ mm}^2 \geq A_s \text{ perlu (memenuhi)}$$

$$2. \text{ Memakai D17 membutuhkan jumlah} = A_s / 226,98$$

$$= 6,16 \sim 7 \text{ buah}$$

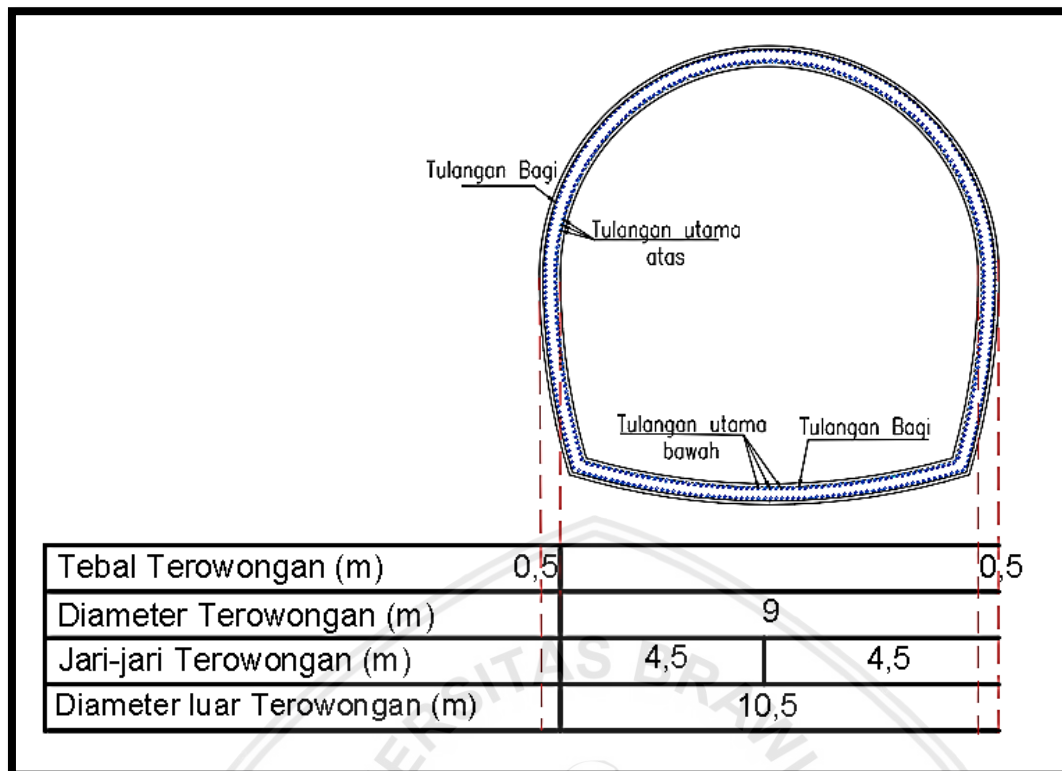
$$\text{Jarak bersih antar tulangan (Sn)} = b / (A_s / 226,98)$$

$$= 142,85 \text{ mm} = 140 \text{ mm}$$

$$A_s = 226,98 \cdot b / S_n$$

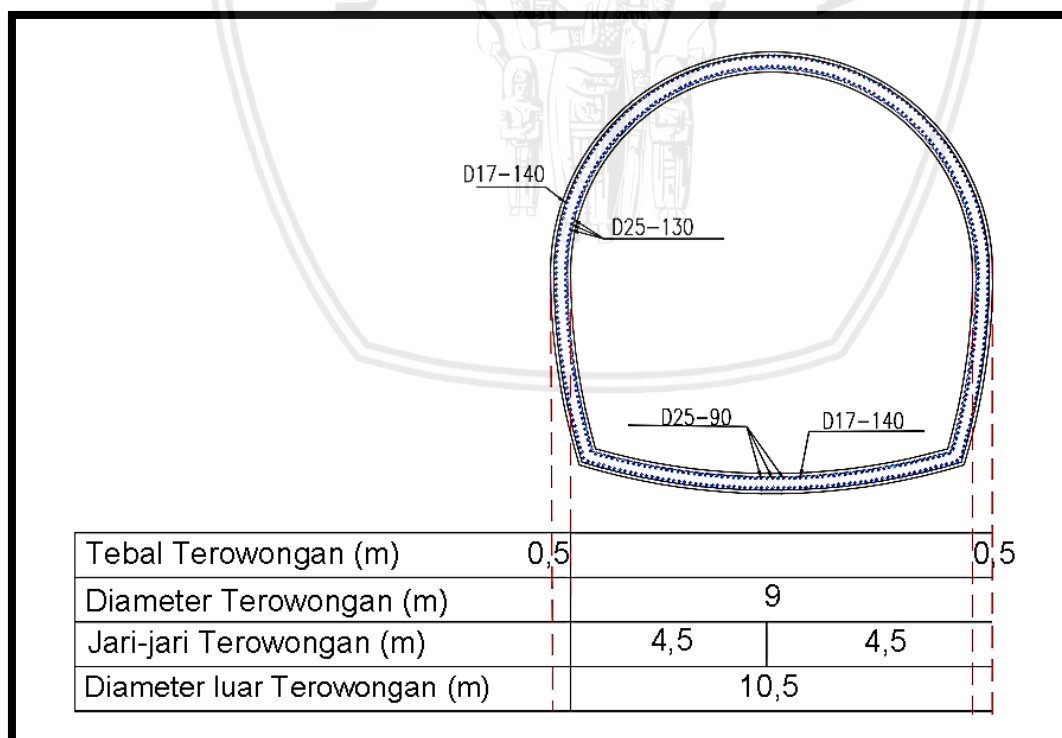
$$= 1435 \text{ mm}^2 \geq A_s \text{ perlu (memenuhi)}$$

Digunakan D17 - 140



Gambar 4.81 Letak Tulangan Utama dan Tulangan Bagi

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)



Gambar 4.82 Desain Penulangan Terowongan Plat 50cm

Sumber : Hasil Perhitungan (2019)

Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan perencanaan yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Terowongan pengelak Bendungan Kualu direncanakan berbentuk tapal kuda *shape F*, dengan debit rancangan kala ulang 25 tahun sebesar 709,331 m³/dt. Sehingga didapatkan diameter terowongan pengelak sebesar 9 m dan dari analisa penelusuran banjir didapatkan tinggi air maksimum pada elevasi +710,383 (tinggi air maksimum = 10,883 m).
2. Berdasarkan hasil perhitungan, maka didapatkan hasil dari pembebanan yang bekerja pada terowongan yaitu sebagai berikut:
 - Tekanan Batuan Vertikal = 22,425 ton/m
 - Tekanan Batuan Horizontal (kondisi Normal)
Pa1 = 33,83 t/m
Pa2 = 17,543 t/m
 - Tekanan Batuan Horizontal (kondisi gempa)
Pa1 = 39,69 t/m
Pa2 = 19,394 t/m
 - Tekanan Air Horizontal = 10,95 ton/m
 - Beban Air Vertikal = 41,625 ton/m
 - Beban Akibat Berat Sendiri = 1,8 ton/m
 - Tekanan Air dalam Terowongan = 88,29 t/m²
 - Tekanan *uplift* = 10,5 ton/m
3. Berdasarkan kondisi pembebanan yang bekerja pada terowongan, maka dihitung momen maksimum menggunakan 2 cara yaitu metode *Beggs Deformation Analysis of Single Barel Conduit* dan software Staad Pro. Dari hasil analisa didapatkan kesimpulan
 - Hasil Perhitungan Metode Staad Pro:
Dari hasil analisa, diputuskan penggunaan hasil perhitungan momen menggunakan software staad pro yang pertimbangannya adalah sebagai berikut:
 - Staad Pro melakukan analisa 3d yang berarti perhitungan pembebanan yang terjadi pada

- terowongan lebih mendetail, karena pembebanan searah sumbu z (memanjang terowongan) juga diperhitungkan.
- Diagram gaya yang ada pada staad pro lebih mewakili hasil dari perhitungan, karena pada staad pro input jenis pembebanan dibedakan sesuai dengan jenis dari beban tersebut, seperti beban hidup, beban mati, beban hidrostatik, dan beban tanah.
- Jenis struktur yang di inputkan pada software staad pro lebih detail seperti struktur tersebut terbuat dari plat, balok, kolom, dan lain sebagainya.
- Staad Pro dapat melakukan perhitungan momen dengan ketebalan plat yang lebih ekonomis, sedangkan pada tabel beggs dibatasi dengan desain paling ekonomis adalah $t = r/6$, hal ini penting karena untuk perhitungan alternatif desain terowongan pengelak akan dicari penampang dengan ketebalan plat paling minimum yang dapat digunakan.

- Hasil Perhitungan Metode Beggs

Dari analisa perhitungan momen yang dilakukan oleh tabel beggs menggunakan konsep 2 dimensi maka hasil dari momen maksimum didapatkan jauh lebih tinggi dari hasil perhitungan menggunakan software staad pro. Hal ini dikarenakan tinjauan secara dua dimensi tidak mendetail seperti perhitungan secara 3D, sehingga untuk membuat konstruksi aman, maka tinjauan secara 2 dimensi akan menghasilkan nilai yang besar. Kemudian sebuah kelemahan dari metode beggs jika dibandingkan dengan staad pro yaitu pada metode beggs tumpuan tidak diperhitungkan, tumpuan diasumsikan sebagai gaya vertikal atau menjadi sebuah beban. Karena alasan ini sehingga diputuskan penggunaan momen metode Staad Pro karena Staad Pro lebih mewakili dengan kondisi yang ada.

4. Perhitungan penulangan pada terowongan pengelak Bendungan Kualu diperoleh hasil sebagai berikut:

Menggunakan software Staad Pro:

- Diameter tulangan utama = D22 – 150
- Diameter tulangan bagi = D19 – 120

Selanjutnya dilakukan alternatif desain pada terowongan pengelak yang tujuannya untuk mencari desain yang paling ekonomis, dilakukan analisa tambahan menggunakan staad pro dengan desain plat yang lebih kecil dari desain rencana awal yang berpedoman pada tabel beggs (desain paling ekonomis yang dianjurkan oleh tabel beggs adalah $t = r/6 = 0,75$ m), kemudian dilakukan desain plat yang lebih ekonomis, dan didapatkan tebal plat = 0,5m. Dari hasil perhitungan penulangan, didapatkan:

- Diameter tulangan utama atas = D25 – 130

- Diameter tulangan utama bawah = D25 – 90
- Diameter tulangan bagi = D16 -140

5.2 Saran

Dalam perencanaan terowongan pengelak Bendungan Kualu pada skripsi ini, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga perlu dilakukan penambahan referensi oleh pembaca dalam kaitannya dengan perencanaan terowongan pengelak atau perlu dibandingkan dengan referensi – referensi lain, sehingga pembaca bisa mendapatkan sebuah hasil dan pengetahuan yang lebih maksimal.



Halaman ini sengaja dikosongkan



DAFTAR PUSTAKA

- Alkaff, M Firdaus. (2005). *STAAD 2004 Untuk Orang Awam*. Palembang: Maxicom
- Badan Standardisasi Nasional. (2013). SNI 2847:2013 *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: BSN
- Badan Standardisasi Nasional (2012). *SNI 1726-2012 tentang Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung*. Jakarta: BSN
- Bureau of Reclamation. (1987). *Design of small Dams*. Water Resources Technical Publication. Washington
- Chow, Ven Te., (1992). *Hidrolika Saluran Terbuka*. Jakarta: Erlangga.
- Doyle Drive Replacement Project. (2009). *Structural Design Criteria for Cut and Cover tunnels & Non Standard Retaining Walls*. Brisbane
- Kodoatie, Robert J. (2002). *Rekayasa Manajemen Banjir Kota*. Yogyakarta: Andi
- Loebis, Joerson. (1984). *Banjir Rencana untuk Bangunan Air*. Jakarta: Badan Penerbit Pekerjaan Umum.
- Philips, H. B., & I.E. Allen. (1986). *Beegs Deformeter Stress Analysis of Single Barrel Conduits*. Colorado: United States Bureau of Reclamation.
- Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi. (2017). *Modul Desain Bangunan Pelengkap Pelatihan Perencanaan Bendungan Tingkat Dasar*.
- Setiawan, Agus. (2016). *Perencanaan Struktur Beton Bertulang*. Jakarta: Erlangga.
- Singh, Bhawani., & Rajnish. K. Goel. (2006). *Tunneling in Weak Rock*. Bungalore: Elsevier.
- Soedibyo. (1993). *Teknik Bendungan*. Jakarta : Pradnya Paramita
- Tim Pemutakhiran Gempa Indonesia, BNPB. (2017). *Pemutakhiran Sumber dan Peta Gempa 2017*.
- Vis, W.C., & Gideon Kusuma. (1993). *Dasar-Dasar Perencanaan Beton Bertulang*. Jakarta: Erlangga.
- Wungo, Willy (2011). *Pengenalan Software Analisa & Design Struktur Staadpro*. Academia. [https://www.academia.edu/14451653/ PENGENALAN_SOFTWARE_ANALISA_and_DESIGN_STRUKTUR_STAADPRO](https://www.academia.edu/14451653/PENGENALAN_SOFTWARE_ANALISA_and_DESIGN_STRUKTUR_STAADPRO). (Diakses 1 Januari 2019)

RIWAYAT HIDUP



Afan Allail Rofikha, Lahir di Malang pada tanggal 24 Februari 1997, anak ketiga dari lima bersaudara. Anak dari ayah **Sucipto** dan ibu **Alkhuliah**, kedua orang tua berprofesi sebagai guru. Pendidikan Sekolah Dasar hingga Menengah Atas ditempuh di Kota Wisata Batu. Memulai Pendidikan Sarjana (S1) pada tahun 2015, di Jurusan Teknik Pengairan – Fakultas Teknik – Universitas Brawijaya, Malang. Pendidikan S1 diselesaikan pada tahun 2019. Pengalaman magang di konsultan milik UUK BPP Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang. Selain pengalaman magang, penulis juga pernah mengemban tugas sebagai asisten transportasi sedimen, bangunan irigasi, menggambar konstruksi bangunan air, konstruksi bendungan I dan konstruksi bendungan II. Selain kegiatan perkuliahan, penulis aktif berorganisasi dan memiliki hobi membaca buku-buku ilmiah maupun cerita fiksi.

Malang, 12 Juni 2019

Penulis

