

**STUDI PERENCANAAN TEROWONGAN PENGELAK
BENDUNGAN LUBUK AMBACANG KECAMATAN HULU
KUANTAN KABUPATEN KUANTAN SINGINGI PROVINSI RIAU**

SKRIPSI

**TEKNIK PENGAIRAN KONSENTRASI PERENCANAAN TEKNIK
BANGUNAN AIR**

**Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



CHANDRA YOGA WICAKSANA

NIM. 135060407111007

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2018

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, berkah serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul **“STUDI PERENCANAAN TEROWONGAN PENGELAK BENDUNGAN LUBUK AMBACANG KECAMATAN HULU KUANTAN KABUPATEN KUANTAN SINGINGI PROVINSI RIAU”** ini dengan lancar.

Skripsi ini disusun sebagai persyaratan kelulusan guna memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) yang harus ditempuh mahasiswa Jurusan Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Dengan tanggung jawab dan rasa rendah hati, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua Orang Tua Nurhadi Wibowo, SE. dan Lita Laksana T, SE. serta Nenek Elly Herawati atas doa dan segala bantuan untuk kelancaran dan yang terbaik untuk skripsi ini.
2. Bapak Ir. Heri Suprijanto, MS dan Ibu Dr.Eng. Evi Nur Cahya, ST.,MT selaku dosen pembimbing yang memberikan arahan dan masukan dalam penyempurnaan penyelesaian laporan skripsi ini.
3. Adik Reynaldi Yogi W, Kakek Dr. Marlin Wibowo,SH., MSi., dan Yossy Octa Dewanti, SE., yang selalu memberikan doa dan semangat untuk pengerjaan skripsi ini.
4. Fauziah R. Anggraini, ST. yang selalu menemani dan memberikan motivasi serta semangat dalam pengerjaan skripsi ini.
5. Hardiman, Rendi, Dewana, Nur , Azmi, Fatan, Fianda , Aceng, Mas Kukuh dan Teman-teman Teknik Pengairan angkatan 2013 dan semua pihak yang telah membantu atas terselesaikannya laporan ini.

Malang,

Penyusun



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

repository.ub.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI PERENCANAAN TEROWONGAN PENGELAK
BENDUNGAN LUBUK AMBACANG KECAMATAN HULU
KUANTAN KABUPATEN KUANTAN SINGINGI PROVINSI RIAU

SKRIPSI

TEKNIK PENGAIRAN KONSENTRASI PERENCANAAN TEKNIK
BANGUNAN AIR

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



CHANDRA YOGA WICAKSANA
NIM. 13506040117111007

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
Pada tanggal 6 Juli 2018

Dosen pembimbing I

Ir. Heri Suprijanto, MS
NIP. 19590625 198503 1 003

Dosen pembimbing II

Dr. Eng. Evi Nur Cahya, ST., MT
NIP. 201102 771203 2 001

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Pengairan



Dr. Ir. Ussy Andawayanti, MS.
NIP. 19610131 198609 2 001



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

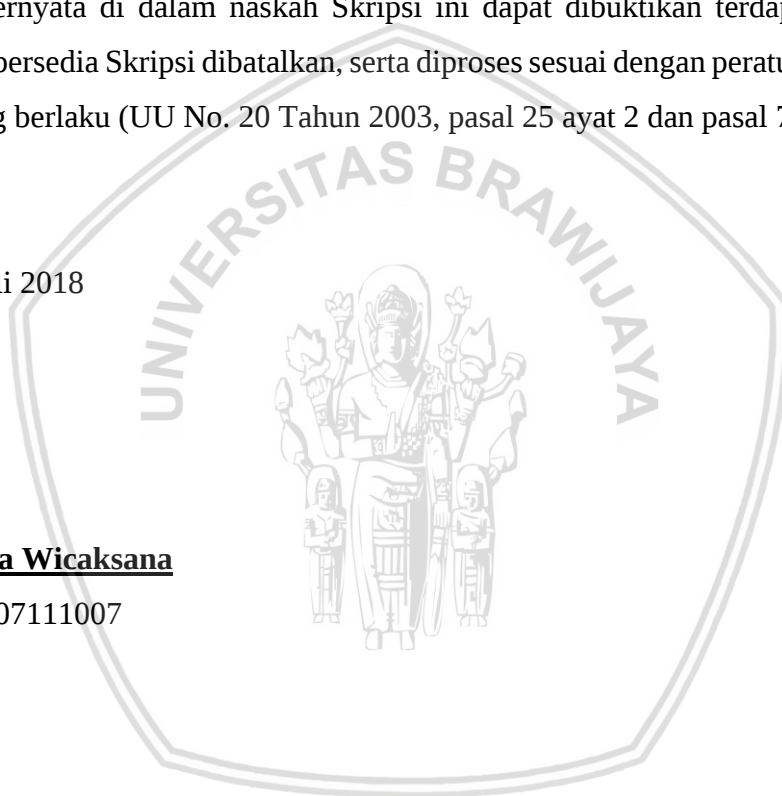
Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

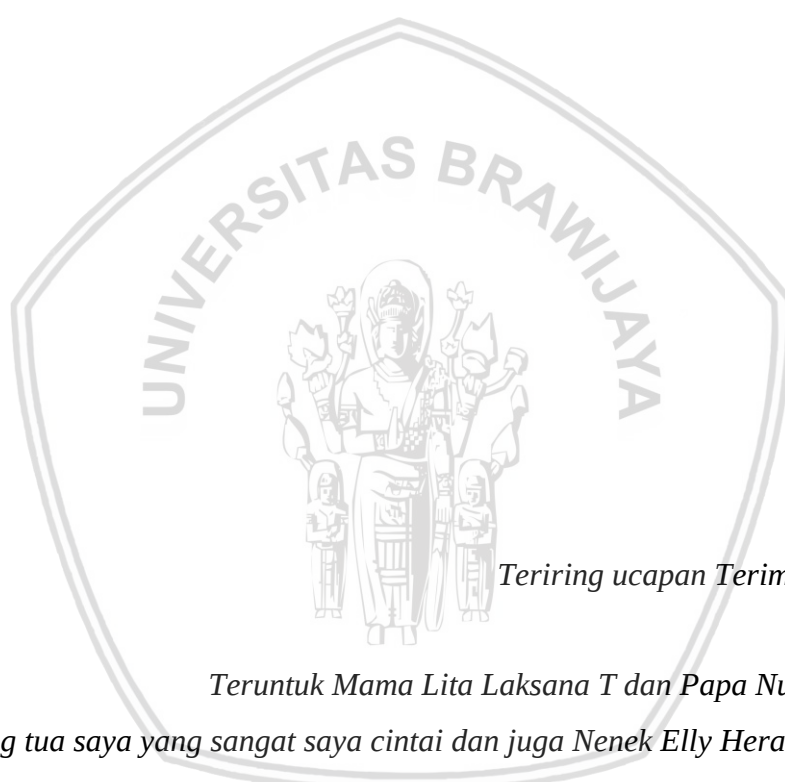
Malang, 27 Juli 2018

Mahasiswa,

Chandra Yoga Wicaksana

NIM.135060407111007





*Teriring ucapan Terimakasih kepada,
Allah SWT*

Teruntuk Mama Lita Laksana T dan Papa Nurhadi Wibowo.

*Kedua orang tua saya yang sangat saya cintai dan juga Nenek Elly Herawati yang tidak
henti memberikan doa serta semangat. Semoga Allah SWT membalas*

semua kebaikan mama,papa dan juga nenek.

Teruntuk adik saya Reynaldi Yogi W,

Terimakasih sudah menjadi bagian dalam hidup saya.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
RINGKASAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Identifikasi Masalah	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Rumusan Masalah.....	3
1.5. Tujuan dan Manfaat.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Umum	5
2.2. Terowongan Pengelak (<i>Diversiion Tunnel</i>).....	6
2.2.1.Karakteristik Aliran	6
2.2.1.1. Pemilihan Banjir Rancangan untuk Pengelak.....	7
2.2.1.2. Metode Pengelakan	8
2.3. Debit Banjir Rancangan.....	8
2.3.1. Kriteria Debit Banjir Rancangan untuk Perencanaan.....	8
2.4. Terowongan (<i>Tunnel</i>)	10
2.4.1. <i>Conduits</i>	10
2.5. Kondisi Topografi dan Geologi.....	11
2.5.1. Karakteristik Batuan	11
2.5.2. Penentuan Parameter Batuan	12
2.5.2.1. <i>Rock Quality Designation (RQD)</i>	12
2.6. Analisis Hidrolika Pada Saluran Pengelak	12
2.7. Teori Pembebanan Terzaghi.....	16
2.7.1. Analisis Daya Dukung.....	16
2.7.2. Klasifikasi batuan	17

2.7.3. Faktor Pembebanan	18
2.7.4. Pembebanan pada Terowongan.....	19
2.7.4.1. Arah Vertikal	19
2.7.4.2. Arah Horizontal	20
2.8. Bentuk-Bentuk Konstruksi pada Terowongan.....	21
2.8.1. Mekanika Terowongan pada Pembebanan Vertikal.....	23
2.8.2. Mekanika Terowongan pada Pembebanan Horizontal.....	25
2.9. Software STAAD Pro untuk analisis struktur	26
2.9.1. INPUT	27
2.9.2. OUTPUT	27
2.10. Penulangan pada konstruksi Dinding Terowongan	27
2.10.1. Mutu Beton.....	29
2.10.1.1. Mutu Beton f'_c	29
2.10.2. Mutu Baja dan Tulangan	30
2.11. Metode Pelaksanaan <i>Grouting</i>	31
2.11.1. <i>Grouting</i>	31
2.11.2. Jenis-Jenis <i>Grouting</i>	32
2.11.3. Aplikasi <i>Grouting</i> pada Bangunan Pelengkap.....	33
2.11.4. Prosedur Pelaksanaan	34
2.11.4.1. <i>Grouting</i> Pengisi	34
2.11.4.2. <i>Grouting</i> Konsolidasi.....	35
2.11.4.2.1. Pelaksanaan dalam Terowongan	35
2.11.4.3. <i>Grouting</i> Kontak	37
2.11.4.3.1. <i>Grouting</i> Kontak pada	37
Penyumbatan Terowongan Pengelak	
2.11.4.4. <i>Grouting</i> Radial	38
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Lokasi Daerah Studi	41
3.2. Data - data yang Diperlukan.....	42
3.3. Langkah Pengolahan Data.....	43
3.4. Data Waduk dan Hidrologi Bendungan Lubuk Ambacang.....	44
3.5. Data Mekanika Tanah	45
3.6. Diagram Alir Penyelesaian Studi	46

BAB IV PENGOLAHAN DATA

4.1. Data Perencanaan	47
4.2. Penentuan Dimensi Terowongan.....	47
4.3. Perhitungan Penelusuran Banjir	47
4.3.1. Aliran Bebas	47
4.3.2. Aliran Transisi	50
4.3.3. Aliran Tertekan.....	51
4.4. Perhitungan Konstruksi	59
4.4.1. Macam Pembebanan.....	60
4.4.2. <i>Design Section</i>	62
4.4.3. Perhitungan Pembebanan	62
4.4.4. Kondisi Perencanaan	81
4.5. Stabilitas Terowongan	82
4.6. Perhitungan Momen,Normal,dan Lintang	82
4.6.1. Kondisi Normal	83
4.6.2. Kondisi Gempa	86
4.6.3. Kondisi <i>Grouting</i> Normal.....	89
4.6.4. Kondisi <i>Grouting</i> Gempa	92
4.6.5. Kondisi Pengisian Normal.....	95
4.6.6. Kondisi Pengisian Gempa	98
4.6.7. Kondisi Pengoperasian Normal	102
4.6.8. Kondisi Pengoperasian Gempa.....	106
4.6.9. Rekapitulasi Momen,Normal,dan Lintang	110
4.6.10. Perhitungan Menggunakan <i>software</i> STAAD PRO	110
4.7. Penulangan Terowongan	111
4.7.1. Perhitungan Utama	112
4.7.1.1. Penulangan Utama Atas	112
4.7.1.2. Penulangan Utama Bawah	113
4.7.1.3. Penulangan Utama Samping	115
4.7.2. Penulangan Bagi	117
4.7.3. Penulangan Geser	118
4.8. <i>Treatment</i> Terowongan.....	121
4.8.1. Pelaksanaan Pengerjaan Terowongan	121
4.8.1.1. Pekerjaan Persiapan	121

4.8.1.2. Pekerjaan Penggalian	121
4.8.1.3. Pekerjaan Pembetonan	122
4.8.2. Grouting	122
4.8.2.1. Grouting Pengisi	122
4.7.2.2. Grouting Konsolidasi	123
4.7.2.2.1. Pelaksanaan dalam Terowongan	123
4.7.2.3. Perencanaan Grouting	125
4.9. Perhitungan Panjang <i>Plugging</i>	126
4.10. Pemasangan Waterstop	127
BAB V PENUTUP	
5.1. Kesimpulan	129
5.2. Saran	130
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1.	Kriteria Pemilihan Kala Ulang Banjir Rancangan.....	9
Tabel 2.2.	Klasifikasi Kualitas inti Pemboran (RQD)	12
Tabel 2.3.	Klasifikasi Massa Batuan Menurut Terzaghi.....	18
Tabel 2.4.	Besaran Koefisien Momen Bentuk A	23
Tabel 2.5.	Konversi Mutu Beton $f'c$ ke K.....	30
Tabel 2.6.	Mutu Baja Tulangan	30
Tabel 3.1.	Hasil Pengujian Laboratorium Batuan Pondasi Rencana Tapak.....	45
	Bendungan Ambacang	
Tabel 4.1.	Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Bebas $h < 1,2$ Terowongan.....	49
	Pengelak 1	
Tabel 4.2.	Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Bebas $h < 1,2$ Terowongan.....	49
	Pengelak 2	
Tabel 4.3.	Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Transisi $h > 1,2$	50
	Terowongan Pengelak 1	
Tabel 4.4.	Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Transisi $h > 1,2$	51
	Terowongan Pengelak 2	
Tabel 4.5.	Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$	52
	Terowongan Pengelak 1	
Tabel 4.6.	Kapasitas Pengaliran saat Kondisi Aliran Tertekan $h > 1,5$	53
	Terowongan Pengelak 2	
Tabel 4.7.	Hubungan antara H,Q,Psi dan Phi Terowongan Pengelak.....	55
Tabel 4.8.	Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak	56
Tabel 4.9.	Perhitungan Tekanan Air dari Dalam Terowongan	68
Tabel 4.10.	Nilai Percepatan Gempa	70
Tabel 4.11.	Hasil Pengujian Laboratorium Batuan Jalur Terowongan Pengelak	82
	Bendungan Ambacang	
Tabel 4.12.	Kondisi Normal.....	85
Tabel 4.13.	Kondisi Gempa	88
Tabel 4.14.	Kondisi <i>Grouting</i> Normal	91
Tabel 4.15.	Kondisi <i>Grouting</i> Gempa.....	94

Tabel 4.16.	Kondisi Pengisian Normal	97
Tabel 4.17.	Kondisi Pengisian Gempa.....	101
Tabel 4.18.	Kondisi Pengoperasian Normal	105
Tabel 4.19.	Kondisi Pengoperasian Gempa	109
Tabel 4.20.	Ringkasan Maksimum Momen, Normal, dan Lintang.....	110
Tabel 4.21.	Ringkasan Maksimum dan Minimum Gara Geser, Gaya Normal, dan Momen Terowongan Pelimpah	110
Tabel 4.22.	Rekapitulasi Momen Maksimum menggunakan tabel..... <i>Beegs Deformation Analysis of Single Barrel Conduit</i>	111
Tabel 4.23.	Rekapitulasi Momen Maksimum menggunakan STAADPRO	111
Tabel 4.24.	Rekapitulasi Penulangan menggunakan tabel <i>Beegs Deformation.....</i> <i>Analysis of Single Barrel Conduit</i>	119
Tabel 4.25.	Rekapitulasi Momen Maksimum menggunakan STAADPRO	119



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Hidrolika Aliran dalam pengelak pada aliran bebas	13
Gambar 2.2.	Diagram kondisi Aliran Tekan.....	14
Gambar 2.3.	Diagram Pembebanan Terowongan	19
Gambar 2.4.	Bentuk Terowongan A,B,dan C	21
Gambar 2.5.	Bentuk Terowongan D,E,dan F.....	21
Gambar 2.6.	Bentuk Terowongan G,Persegi,dan Lingkaran	22
Gambar 2.7.	Koefisien Pembebanan Vertikal seragam dan.....	23
	reaksi pondasi seragam	
Gambar 2.8.	Koefisien Pembebanan Vertikal seragam dan	24
	reaksi pondasi seragam	
Gambar 2.9.	Koefisien Pembebanan Berat Sendiri.....	24
Gambar 2.10.	Koefisien Pembebanan Tekanan dari dalam	25
Gambar 2.11.	Koefisien Pembebanan Tekanan Berat Air Penuh	25
Gambar 2.12.	Koefisien Pembebanan Horizontal Seragam.....	26
Gambar 2.13.	Koefisien Pembebanan Horizontal Segitiga.....	26
Gambar 2.14.	Skematis Pelaksanaan <i>Backfill Grouting</i> didalam Terowongan	34
Gambar 2.15.	Skematik Pelaksanaan Pemboran untuk <i>Consolidation</i>	36
	<i>Grouting</i> dalam Terowongan	
Gambar 2.16.	Instalasi Pemipaan untuk <i>Contact Grouting</i>	37
Gambar 2.17.	<i>Grouting Radial</i> didalam Terowongan Bundar.....	38
Gambar 3.1.	Peta Lokasi Studi.....	42
Gambar 3.2.	Diagram Alir Penyelesaian Studi	46
Gambar 4.1.	Hubungan H dan Q Diameter Terowongan Pengelak	55
Gambar 4.2.	Grafik Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak Diameter 9 m	59
Gambar 4.3.	Potongan Melintang Alternatif Desain Lingkaran Terowongan	59
Gambar 4.4.	<i>Desain Section</i> Terowongan Pengelak.....	62
Gambar 4.5.	Tekanan Batuan Vertikal.....	63
Gambar 4.6.	Tekanan Air Vertikal.....	64
Gambar 4.7.	Tekanan <i>Grouting</i>	65

Gambar 4.8.	Tekanan Air Horizontal	66
Gambar 4.9.	Tekanan Air Dalam Terowongan.....	67
Gambar 4.10.	Tekanan Batuan Horizontal (Normal)	68
Gambar 4.11.	Peta Zona Gempa Indonesia	70
Gambar 4.12.	Tekanan Batuan Horizontal (Gempa)	71
Gambar 4.13.	Tekanan <i>Uplift</i>	72
Gambar 4.14.	Kondisi Pembebanan Perencanaan Normal	73
Gambar 4.15.	Kondisi Pembebanan Perencanaan Gempa.....	74
Gambar 4.16.	Kondisi Sementara saat Grouting Normal	75
Gambar 4.17.	Kondisi Sementara saat Grouting Gempa.....	76
Gambar 4.18.	Kondisi Pengisian Waduk Normal.....	77
Gambar 4.19.	Kondisi Pengisian Waduk Gempa	78
Gambar 4.20.	Kondisi Pengoperasian Normal	79
Gambar 4.21.	Kondisi Pengoperasian Gempa	80
Gambar 4.22.	Arah Momen,Normal,Lintang di tiap Potongan Terowongan.....	83
Gambar 4.23.	Beban Vertikal Merata.....	83
Gambar 4.24.	Beban Batuan	83
Gambar 4.25.	Berat Sendiri	84
Gambar 4.26.	Berat Merata Horizontal	84
Gambar 4.27.	Beban Vertikal Merata.....	85
Gambar 4.28.	Beban Batuan	85
Gambar 4.29.	Berat Sendiri	86
Gambar 4.30.	Berat Merata Horizontal	86
Gambar 4.31.	Beban Vertikal Merata.....	89
Gambar 4.32.	Beban Batuan	89
Gambar 4.33.	Berat Sendiri	90
Gambar 4.34.	Berat Merata Horizontal	90
Gambar 4.35.	Beban Vertikal Merata.....	92
Gambar 4.36.	Beban Batuan	92
Gambar 4.37.	Berat Sendiri	93
Gambar 4.38.	Berat Merata Horizontal	93
Gambar 4.39.	Beban Vertikal Merata.....	95
Gambar 4.40.	Beban Batuan	95
Gambar 4.41.	Berat Sendiri	96

Gambar 4.42.	Berat Merata Horizontal.....	96
Gambar 4.43.	Berat Segitiga Horizontal.....	96
Gambar 4.44.	Beban Vertikal Merata	98
Gambar 4.45.	Beban Batuan	98
Gambar 4.46.	Berat Sendiri.....	99
Gambar 4.47.	Berat Merata Horizontal.....	99
Gambar 4.48.	Berat Segitiga Horizontal.....	100
Gambar 4.49.	Beban Vertikal Merata	102
Gambar 4.50.	Beban Batuan	102
Gambar 4.51.	Berat Sendiri.....	103
Gambar 4.52.	Berat Merata Horizontal.....	103
Gambar 4.53.	Berat Segitiga Horizontal.....	104
Gambar 4.54.	Tekanan Air dari Dalam.....	104
Gambar 4.55.	Beban Vertikal Merata	106
Gambar 4.56.	Beban Batuan	106
Gambar 4.57.	Berat Sendiri.....	107
Gambar 4.58.	Berat Merata Horizontal.....	107
Gambar 4.59.	Berat Segitiga Horizontal.....	108
Gambar 4.60.	Tekanan Air dari Dalam.....	108
Gambar 4.61.	Gambar Tulangan Terowongan Pengelak.....	120
Gambar 4.62.	Gambar Detail Tulangan Terowongan Pengelak	120
Gambar 4.63.	Skematis Pelaksanaan <i>Backfill Grouting</i> didalam Terowongan	122
Gambar 4.64.	Skematis Pelaksanaan Pemboran untuk <i>Consolidation Grouting</i> dalam Terowongan	124
Gambar 4.65.	Pengeboran <i>Grouting</i> Konsolidasi	125
Gambar 4.66.	Pengeboran <i>Grouting</i> Konsolidasi Pada Perencanaan	126
Gambar 4.67.	Perencanaan <i>Plugging</i> dan <i>Airvent</i>	126
Gambar 4.68.	Jenis -Jenis Waterstop PVC	128
Gambar 4.69.	Pemasangan Waterstop pada Sambungan Beton	128



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Gambar Perencanaan Terowongan	131
Lampiran 2.	Hasil <i>Running Software</i> STAADPRO	132
Lampiran 3.	<i>Plate Center Stresses Software</i> STAADPRO	133
Lampiran 4.	Gambar Bidang Momen MX dan MY <i>Software</i> STAADPRO	134
Lampiran 5.	Gambar Potongan Memanjang Geologi dan Hasil Pemboran	135





Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



RINGKASAN

Chandra Yoga Wicaksana, Jurusan Teknik Pengairan, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, April 2018, *Studi Perencanaan Terowongan Pengelak Bendungan Lubuk Ambacang Kecamatan Hulu Kuantan Kabupaten Kuantan Singingi Provinsi Riau*. Dosen Pembimbing Ir. Heri Suprijanto, MS. dan Dr. Eng. Evi Nur Cahya, ST.,MT.

Bangunan pengelak dibangun pada awal konstruksi bendungan. Bangunan berfungsi untuk mengalihkan aliran sungai selama periode pelaksanaan konstruksi. Pada saat akhir konstruksi terowongan pengelak ini akan dijadikan sebagai pelimpah darurat. Dari perencanaan bangunan pengelak yang sudah ada di desain berbentuk tapal kuda, maka dicoba menganalisis perencanaan baru dengan alternatif berbentuk lingkaran sehingga dapat dibandingkan antara perencanaan sebelumnya dengan perencanaan yang baru.

Pada Studi ini, akan dilakukan perencanaan terowongan pengelak pada bendungan Lubuk Ambacang yang perlu dilakukan yaitu Penentuan Bentuk Terowongan, Diameter terowongan, Penelusuran Banjir 5 tahun dengan debit banjir sebesar $4742 \text{ m}^3/\text{detik}$, Perhitungan Pembebanan, Penulangan Terowongan dan *Treatment*.

Hasil dari studi perencanaan terowongan pengelak ini yaitu Terowongan berbentuk lingkaran dengan diameter 9 m. Dengan Momen Maksimum Atas : 2.16 KNm, Momen Maksimum Bawah : 3.56 KNm, Momen Maksimum Samping : 3.56 KNm. Serta menggunakan tulangan D25-100 untuk tulangan utama dan tulangan D19-100 untuk tulangan bagi.

Kata Kunci : Terowongan Pengelak, Penelusuran Banjir, Pembebanan, Momen Maksimum, Perhitungan Penulangan, Sementasi



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

SUMMARY

Chandra Yoga Wicaksana, Water Resources Engineering Department, Technology Faculty, Brawijaya University, April 2018, *Study of Lubuk Ambacang Dam Diversion Tunnel Plant In Hulu Kuantan District, Kuantan Singingi District, Riau* Lecturer Ir. Heri Suprijanto, MS. and Dr. Eng. Evi Nur Cahya, ST.,MT.

Diversion Tunnel built in the early construction of the dam. The building serves to divert the river flow during the period of construction. At the end of construction, this tunnels will serve as an emergency spillway. From existed horseshoe spillway in this study to be analyzed new design with circle shape thus can be compared the new design with the existed design

In this study will be designed diversion tunnels on Lubuk Ambacang Dam, First thing to do is designing the shape of diversion channel. Diameter of diversion tunnels with 5 years flow 4742 m³/second, Load calculation, Reinforced Tunnels, and Treatment.

From this diversion tunnel study resulted diversion tunnel with circle shape 9 m diameter. Maximum top moment : 2.16 KNm, Maximum bottom moment 3.56 KNm, Maximum side moment : 3.56 KNm. Main reinforced bar D25-100 and D19-100 for secondary reinforced bar

Keyword : Diversion Tunnel, Flood Routing, Load, Maximum Moment, Reinforcement, Grouting



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan bendungan adalah salah satu wujud dari usaha memenuhi kebutuhan air dengan membendung air. Konstruksi bendungan dibuat jika diperlukan pembuatan waduk. Bendungan merupakan bangunan yang dibangun melintang sungai untuk meninggikan muka air dan membuat tampungan air yang lazim disebut waduk. Waduk adalah salah satu wujud dari usaha memenuhi kebutuhan air. Persediaan yang ada di waduk antara lain direncanakan untuk berbagai keperluan, bisa berfungsi tunggal (*single purpose*) atau berfungsi lebih dari satu (*multipurpose*).

Dalam rangka pengembangan sumber daya air untuk kesejahteraan masyarakat maka pemerintah melalui Balai Wilayah Sungai Sumatera III Direktorat Jenderal Sumber Daya Air Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat berencana melakukan pekerjaan Detail Desain Pembangunan bendungan Lubuk Ambacang ini Dengan tujuan untuk mengendalikan banjir, PLTA, serta untuk suplai kebutuhan air irigasi.

Pelaksanaan konstruksi bangunan air misalnya bendungan yang perlu selalu diperhatikan adalah teknik pelaksanaan konstruksi bendungan yang di dalamnya terkait teknik pembebasan area konstruksi bendungan dari gangguan air. Dalam pembangunan bendungan salah satunya harus mengelakkan air sungai agar mempermudah pada saat membangun tubuh bendungan. Maka dari itu dalam studi ini saya akan membahas mengenai perencanaan bangunan pengelak Bendungan Lubuk Ambacang.

Perencanaan terowongan pengelak ini dimaksudkan untuk memanfaatkan potensi yang ada di daerah itu. Bangunan pengelak dibangun pada awal konstruksi bendungan. Bangunan berfungsi untuk mengalihkan aliran sungai selama periode pelaksanaan konstruksi. Pada saat akhir konstruksi terowongan pengelak ini akan dijadikan sebagai pelimpah darurat.

1.2 Identifikasi Masalah

Bangunan pengelak pada suatu tampungan merupakan bangunan utama dibangun

biasanya terletak di bawah bendungan ataupun dapat terletak di sebelah tubuh bendungan. Bangunan ini diperlukan untuk memungkinkan dibelokkannya air sungai ke jaringan irigasi, dengan jalan menaikkan muka air di sungai atau dengan memperlebar pengambilan didasar sungai.

Rencana pengelakan aliran biasanya dipilih pada lokasi yang menggambarkan suatu keseimbangan antara biaya konstruksi fasilitas pengelak dan nilai resiko yang terjadi. Rencana pengelakan aliran yang baik akan meminimalisasikan kemungkinan dari kerusakan akibat banjir pada hasil konstruksi yang sedang dilakukan pada jumlah yang minimum pula.

Pengelak yang direncanakan pada lokasi Bendungan Lubuk Ambacang diharapkan dapat berfungsi dengan baik dalam membelokkan air agar Bendungan dapat dilaksanakan pembangunannya dan segera dapat difungsikan untuk mengendalikan banjir, memenuhi kebutuhan Air baku serta untuk PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air).

1.3 Batasan Masalah

Dilihat dari latar belakang dan identifikasi masalah di atas, maka dalam studi ini akan dilakukan pembatasan masalah, antara lain:

1. Membahas bentuk terowongan pengelak
2. Membahas hidrolika terowongan pengelak
3. Membahas konstruksi dan stabilitas terowongan pengelak
4. Membahas penulangan konstruksi dinding terowongan
5. Tidak membahas analisa pembangunan bendungan
6. Tidak membahas hidrologi
7. Tidak membahas *cofferdam*
8. Tidak membahas analisa kelayakan ekonomi

1.4 Rumusan Masalah

Dengan meninjau latar belakang dan identifikasi masalah di atas, maka rumusan masalah pada studi ini adalah :

1. Berapakah dimensi terowongan pengelak yang aman?
2. Bagaimana hasil perhitungan yang dilakukan pada terowongan yang dianalisa dengan program STAADPRO yang berupa gaya-gaya dalam pada struktur terowongan?
3. Bagaimana penulangan yang direncanakan dari hasil perhitungan?

1.5 Tujuan dan Manfaat

Tujuan dari studi perencanaan terowongan pengelak Bendungan Lubuk Ambacang adalah untuk:

1. Mengetahui cara-cara perencanaan terowongan hingga dihasilkan dimensi yang aman
2. Mengetahui gaya-gaya dalam yang dapat mempengaruhi keamanan terowongan
3. Mengetahui hasil perencanaan beton khususnya penulangan beton terowongan

Manfaat yang akan didapatkan dari studi ini adalah sebagai masukan atau referensi bagi penulis dan rekan-rekan mahasiswa Jurusan Teknik Pengairan khususnya dalam masalah teknis sebuah terowongan pengelak bendungan dengan debit yang sangat besar yang minim materi dalam perkuliahan.





Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1.Umum

Pemanfaatan Sumber Daya air tidak hanya sebatas untuk pemenuhan sektor pertanian. Tetapi untuk berbagi kebutuhan hidup dan kehidupan, baik dalam pemanfaatan sektor industri, dan perdagangan. Maka dari itu Sumber Daya air sangat diperlukan agar dapat memenuhi seluruh kebutuhan masyarakat, sehingga dalam hal ini perlu adanya pengelolaan yang baik. Pengelolaan sumber daya air sendiri adalah upaya untuk merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi penyelenggaraan konservasi sumber daya air, pendayagunaan sumberdaya air, dan pengendalian daya rusak air.

Dasar hukum sebagai pedoman dalam melakukan pengelolaan SDA adalah Undang-Undang No.11 Tahun 1974 tentang Pengairan, Undang-Undang No.5 Tahun 1990 tentang Konservasi Sumber Daya Hayati dan Ekosistemnya, Undang-Undang No. 24 Tahun 2007 tentang Pengangguatan Bencana, Peraturan Pemerintah No. 121 Tahun 2015 tentang perusahaan Sumber Daya Air, Peraturan Menteri PUPR No. 9/PRT/M/2015 tentang penggunaan Sumber Daya Air dan sejumlah peraturan pemerintah lainnya yang mendukung.

Dalam kajian kehidupan sosial, ekonomi masyarakat, pembangunan Bendungan Lubuk Ambacang juga melibatkan semua pihak. Baik sebagai pengguna, pemanfaat maupun pengelola, maka tidak dapat dihindari perlunya upaya Bersama yang terintegrasi dan berada pada kesatuan sistem. Adapun beberapa aspek mengenai kajian kehidupan sosial ekonomi masyarakat, di antaranya:

- a. Kondisi geografis pengaruhnya terhadap kehidupan sosial ekonomi masyarakat
- b. Analisis ekonomi dengan proyeksi sampai dengan 20 tahun
- c. Analisis kelembagaan sosial yang terkait dengan SDA
- d. Kondisi kependudukan dan proyeksi penduduk sampai dengan 20 tahun
- e. Permasalahan sosial yang terkait dengan SDA
- f. Tatanan kelembagaan masyarakat dalam kaitannya dengan SDA

Disamping aspek diatas, dalam pekerjaan studi kelayakan pembangunan Bendungan Lubuk Ambacang juga dilakukan identifikasi penduduk yang terkena dampak. Dan tidak lupa sebagai salah satu alternative penaganan pengelolaan sumber daya air dan pemenuhan kebutuhan air baku untuk air bersih, perikanan, pariwisata, PLTA, jaringan irigasi dan sebagainya, survei sosial ekonomi masyarakat juga mendukung kelancaran rencana pembangunan Bendungan Lubuk Ambacang ini.

2.2. Terowongan Pengelak (*Diversion Tunnel*)

Pada sebuah bendungan yang konstruksinya dilakukan melintang sungai, perlu dipertimbangkan pengalihan/pengelakan dari aliran sungai di sekitar atau melalui *site* bendungan selama masa konstruksi. Tingkat variasi dari masalah pengelakan aliran tersebut tergantung dari besar dan potensi banjir dari aliran sungai. Pada beberapa *site* bendungan, pengelakan aliran bisa jadi menjadi mahal dan memakan waktu yang berakibat pada pengaturan jadwal aktivitas konstruksi. Meskipun demikian, masalah pengelakan aliran pasti terjadi pada semua *site* bendungan di manapun, kecuali yang dibangun di luar aliran sungai (*off stream*), dan pemilihan rencana pengelakan aliran yang paling tepat itu penting bagi nilai ekonomis dari suatu bendungan.

Rencana pengelakan aliran biasanya dipilih pada lokasi yang menggambarkan suatu keseimbangan antara biaya konstruksi fasilitas pengelak dan nilai risiko yang terjadi. Rencana pengelakan aliran yang baik akan meminimalisir kemungkinan dari kerusakan akibat banjir pada hasil konstruksi yang sedang dilakukan pada jumlah yang minimum pula. Faktor-faktor yang harus dipertimbangkan dalam penentuan rencana pengelakan terbaik adalah:

- Karakteristik aliran
- Besar dan frekuensi banjir yang terjadi
- Metode pengelakan aliran
- Spesifikasi yang diinginkan.

Faktor-faktor tersebut akan dibahas pada pembahasan di bawah ini.

2.2.1. Karakteristik Aliran

Rekaman data aliran sungai memberikan informasi yang paling reliabel mengenai karakteristik aliran dan bisa didapatkan kapanpun tergantung pada ukuran area aliran dan lokasi geografisnya, dan hujan musiman yang terjadi. Karena masing-masing tipe dari limpasan memiliki aliran puncak (*peak flows*) tersendiri dan memiliki periode aliran dasar yang berbeda setiap tahun, kondisi alamiah dari limpasan berpengaruh pada pemilihan

rencana pengelak. Sebuah *site* di mana terjadi hujan musiman membutuhkan ketersediaan pengelak sepanjang tahun. Kondisi di mana hujan lebat bisa terjadi sewaktu-waktu membutuhkan rencana pengelak yang terperinci karena kontraktor harus siap mengatasi kedua macam aliran dasar maupun aliran banjir selama waktu konstruksi.

2.2.1.1. Pemilihan Banjir Rancangan untuk Pengelak

Biasanya, secara ekonomis tidak bisa diterima untuk merencanakan pengelak berdasar pada banjir terbesar yang pernah terjadi atau yang diperkirakan terjadi pada *site*. Konsekuensinya adalah diputuskan menggunakan beberapa kebutuhan yang lebih sedikit. Hal ini membawa pada pertanyaan bagaimana atau seberapa besar risiko yang terjadi pada rencana pengelakan di bawah pertimbangan yang diambil. Pada kasus bendungan urugan tanah, dimana area-area rawan seperti fondasi dan struktur galian bisa terekspos atau dimana timbunan yang masih dalam masa konstruksi mengalami *overtopping* bisa mengakibatkan kerusakan serius atau kehilangan beberapa bagian konstruksi yang telah rampung, pentingnya mengeliminasi risiko dari banjir relatif besar. Pertimbangan di atas bisa juga tidak sepenting itu, bagaimanapun untuk kasus pada bendungan beton karena ada tampungan air banjirnya, jika lokasi dari struktur pelengkap hanya ada sedikit atau bahkan tidak ada efek merugikan dari *overtopping* pada bendungan beton.

Di dalam pemilihan banjir yang digunakan untuk desain pengelak, harus didasarkan pada ketentuan yang diberikan sebagai berikut:

- a. Keamanan pekerja dan penduduk di hilir sungai akibat dari kegagalan bangunan pengelak bisa berakibat pada penggenangan yang tidak wajar.
- b. Panjangnya waktu pekerjaan yang akan dilakukan selama masa konstruksi, untuk menentukan jumlah dari banjir musiman yang akan ditemui.
- c. Biaya dari kemungkinan kerusakan hingga bangunan selesai atau selama masa konstruksi jika bangunan tersebut terbanjiri.
- d. Biaya dari penghentian pekerjaan sampai pada penyelesaian, termasuk biaya penghentian peralatan kontraktor selama kerusakan karena banjir untuk diperbaiki.

Setelah analisis dari faktor-faktor di atas dibuat, biaya dari peningkatan bangunan pelindung yang mampu mengatasi banjir yang lebih besar harus diperbandingkan dengan biaya kerusakan yang dihasilkan jika banjir seperti di atas terjadi tanpa peningkatan bangunan pelindung. Pertimbangan tersebut nantinya harus digunakan dalam menentukan nilai risiko yang dijamin.

Banjir dengan rancangan 5, 10, atau 25 tahun pada umumnya dipilih berdasarkan pada analisis di atas atau berdasar pada pengalaman sebelumnya dalam mendesain bangunan

pengelak. Dalam penentuan banjir rancangan juga harus dipertimbangkan banjir yang kemungkinan terjadi berulang-ulang. Oleh karena itu, jika rencana pengelak termasuk desain tampungan sementara untuk limpasan hujan badai, maka harus disediakan fasilitas yang mampu mengosongkan tampungan seperti itu dalam periode yang memungkinkan, biasanya dalam beberapa hari.

2.2.1.2. Metode Pengelakan

Metode atau rencana dari pengelakan aliran selama konstruksi tergantung pada besarnya banjir yang akan dielakkan, karakter fisik dari *site* bendungan, tipe bendungan yang akan dibuat di mana bentuk dari bangunan pelengkapanya seperti *spillway*, *penstock*, atau *outlet work*; dan urutan kegiatan konstruksi yang memungkinkan. Tujuannya adalah untuk memilih rencana pengelak yang berdasarkan kemudahan / kepraktisan, biaya, dan risiko yang terjadi. Bangunan pengelak harus mampu untuk menjadi satu kesatuan dari semua konstruksi dengan akibat / pengaruh minimum.

Cara-cara yang umum digunakan dalam mengalihkan aliran selama konstruksi yaitu satu atau lebih dari cara-cara berikut ini, terowongan diarahkan melalui pangkal (*abutment*) bendungan, pipa (*conduit*) melalui atau di bawah bendungan, saluran sementara melalui bendungan, atau *multiple-stage diversion* pada bendungan beton. Bangunan *outlet* seperti *conduit* atau *tunnel* sering dipakai pada konstruksi yang memungkinkan untuk mengelakkan aliran sungai yang cukup besar. Pada aliran yang kecil alirannya bisa dialihkan dengan pemasangan saluran air (*flume*) sementara atau dengan saluran pipa, atau alirannya ditahan di belakang bendungan selama masa konstruksi, penggunaan pompa juga digunakan apabila diperlukan untuk mengontrol muka air.

2.3. Debit Banjir Rancangan

Debit banjir rancangan adalah debit banjir yang dipergunakan sebagai dasar untuk merencanakan kemampuan dan ketahanan suatu bangunan pengairan dengan suatu kemungkinan terjadi kala ulang tertentu, atau debit dengan suatu kemungkinan periode ulang tertentu. Untuk menganalisa debit banjir rancangan dapat dilakukan dengan menggunakan metode hidrograf yang dilakukan dengan menggunakan bantuan model hidrograf satuan sintetis dan metode non hidrograf yang dilakukan dengan bantuan teknik analisa frekuensi.

2.3.1 Kriteria Debit Banjir Rancangan untuk Perencanaan

Berbagai macam bangunan-bangunan air memerlukan perhitungan hidrologi yang merupakan bagian dari perencanaan bangunan-bangunan tersebut. Pemilihan kala ulang (*return period*) banjir rancangan untuk bangunan air adalah suatu masalah yang sangat

bergantung pada analisa statistik dari urutan kejadian banjir baik berupa debit air di sungai maupun curah hujan badai. Selain itu bergantung pula pada segi ekonomi dan dampak yang diakibatkan oleh pemilihan kala ulang banjir rancangan tersebut.

Untuk mempermudah pemecahan masalah, pertimbangan ekonomi diabaikan sehingga hanya berdasarkan teori kemungkinan yang sering disebut juga dengan Resiko Kegagalan (*Risk of Failure*), atau kemungkinan terjadinya banjir rancangan sekali atau lebih selama umur bangunan (*Life Time*) suatu bangunan air. Resiko Kegagalan tersebut digambarkan dengan rumus (Loebis, 1984: 1)

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{L}{T}\right) \quad (2-1)$$

Dengan:

P = adalah resiko kegagalan

L = adalah umur rencana (*design life*)

T = adalah tahun berulangannya

Pemilihan suatu teknik analisa penentuan banjir rancangan tergantung dari data-data yang tersedia dan macam dari bangunan air tersebut. Kriteria pemilihan banjir dengan hanya meninjau kemungkinan terjadinya banjir yang lebih besar atau sama dengan banjir rencana, sekali atau lebih selama bangunan air tersebut berdiri. Kriteria lain yang dapat menjadi bahan pertimbangan dalam pemilihan banjir rancangan adalah seperti pada Tabel 2.1 dibawah ini

Tabel 2.1.
Kriteria Pemilihan Kala Ulang Banjir Rancangan

No.	Jenis Bangunan Air	Kala Ulang Banjir T (tahun)
1	Bendungan urugan tanah / batu (<i>earth/rockfill dam</i>)	1000
2	Bendungan beton / batu kali (<i>concrete dam / masonry</i>)	500 – 1000
3	Bendung (<i>weir</i>)	50 – 100
4	Saluran pengelak banjir (<i>flood diversion canal</i>)	20 – 50
5	Tanggul sungai	10 – 20
6	Drainasi saluran di sawah / permukiman	5 – 10

Sumber: Loebis, 1984: 196

2.4. Terowongan (*Tunnel*)

Biasanya tidak cocok untuk melakukan pekerjaan pondasi yang cukup besar pada ngarai yang menyempit (*narrow canyon*) sebelum aliran telah terelakkan. Dalam kondisi ini penggunaan terowongan terbuka paling cocok untuk mengelakkan aliran, baik untuk bendungan tipe urugan maupun beton. Aliran sungai dilewatkan/ diteruskan mengelilingi area konstruksi melalui terowongan di satu atau kedua pangkal bendungan (*abutment*). Jika terowongan pelimpah atau terowongan *outlet* akan dibuat pada desain bendungan, penggunaan terowongan pelimpah/ *outlet* sudah terbukti nilai ekonomis dari penggunaannya dalam perencanaan bangunan pengelak. Jika bagian hulu dari terowongan permanen berada di atas elevasi dasar sungai, sebuah saluran pengelak sementara (*temporary adit*) di hilir bisa dibuat untuk menghasilkan sebuah terusan muka air (*stream-level bypass*).

Jika ada bangunan terowongan *outlet* pada sungai, terutama pada bendungan tipe urugan, pada umumnya digunakan untuk pengelak. Normalnya, bangunan terowongan pengelak diletakkan pada elevasi di dekat level elevasi sungai. Jika *tower* atau *drop inlet* digunakan, maka saluran sementara (*temporary adit*) di hulu sebagai dasar dari struktur intake perlu dibuat. Setelah fungsi pengelakan selesai, saluran (*adit*) ini ditutup dengan pintu atau sekat, dan penyumbat dari beton yang dipasang di struktur *intake* sebagai penutup permanen.

Terowongan pengelak sementara yang bukan merupakan pelimpah atau bangunan *outlet* dapat diberi *lining* atau tidak diberi *lining*. Kelayakan pemberian *lining* pada terowongan pengelak tergantung pada; (1) biaya dari terowongan yang dilining dibandingkan dengan terowongan tanpa lining dengan kapasitas yang sama (2) kondisi asli dari batuan di dalam terowongan, terutama jika terowongan tersebut dapat tetap berdiri dengan tanpa topangan dan tanpa perlindungan selama dialiri oleh aliran elakan (3) permeabilitas dari material sepanjang terowongan, hal ini bisa mengakibatkan beberapa kebocoran melalui atau sekitar pangkal bendungan (*abutment*).

2.4.1. *Conduits*

Bangunan *outlet* pada bendungan tipe urugan seringkali memerlukan sebuah *conduit* yang bisa digunakan sebagai pengelak selama konstruksi. Metode ini dipakai untuk mengatasi aliran elakan dengan nilai ekonomis cukup baik, terutama jika *conduit* yang digunakan untuk bangunan *outlet* cukup besar untuk membawa aliran elakan. Dimana kebutuhan aliran elakan melampaui kapasitas dari bangunan outlet yang telah selesai, kapasitas ini dapat ditingkatkan dengan menunda pemasangan pintu air, katup, pipa, dan *trashrack* (meskipun *trashrack* sebaiknya dipasang jika ada masalah dengan sampah/

kotoran layang) sampai kebutuhan untuk pengelakan selesai. Dasar dari pendekatannya sama dengan yang diuraikan pada terowongan pengelak. Peningkatan kapasitas juga dapat dicapai dengan menambah tinggi *cofferdam*, yang dengan demikian juga menambah *head*. Pengelak dengan *conduit* juga dapat ditemukan pada bendungan beton.

2.5. Kondisi Topografi dan Geologi

Pada lokasi kedudukan calon bendungan, Area Genangan Bendungan Ambacang pada elevasi +80 dari dasar sungai di As Dam hampir mencapai 12.000 Ha dengan area genangan memanjang di sungai utama sepanjang lebih dari 30 Km dan di banyak sungai-sungai cabang yang salah satunya hingga mencapai lebih dari 30 Km dari muara sungai cabang dengan kondisi topografinya sangat terjal dan minim akses.

Morfologi daerah Bendungan berupa perbukitan terjal, baik pada bagian kanan maupun kiri sungai. Banyak terdapat sungai intermitan di sekitar lokasi Bendungan dan hanya ada dua sungai kecil dengan pola aliran paralel, bentuk lembah “V”, tidak ada sedimentasi maupun dataran banjir. Lereng pada lokasi Bendungan umumnya curam dengan kemiringan antara 40° - 60° .

Daerah yang akan dibendung berlokasi di satuan Kuarsit, sehingga pada daerah ini hanya terdapat satu formasi yaitu Kuarsit Sisipan Serpih. Karakteristik Kuarsit dan Serpih sama dengan yang telah di jelaskan sebelumnya. Pada lokasi ini terdapat beberapa sisipan Serpih yang memiliki ketebalan antara 20 cm - 2 m dengan kondisi batuan permukaan lapuk sebagian.

2.5.1. Karakteristik Batuan

Setiap batuan memiliki karakteristik tersendiri dengan besaran gaya aksial yang dihasilkan pada kedalaman tertentu, Berdasarkan cara terbentuknya batuan dibedakan menjadi 3 jenis yaitu:

- a. Batuan Beku (*igneorus Rock*)
- b. Batuan Sedimen (*Sedimentary Rock*)
- c. Batuan Metamorf (*Metamorphie Rock*)

Jenis tersebut masih memiliki tipe batuan yang bermuara pada 3 jenis batuan berdasarkan diatas, 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 factor*), Pada buku *Tunneling In Weak Rock* menjelaskan besaran gaya-gaya aksial berdasarkan tipe batuan.

2.5.2. Penentuan Parameter Batuan

2.5.2.1. Rock Quality Designation (RQD)

Deere (1964) Metode RQD sendiri didasarkan pada perhitungan presentase inti terambil yang mempunyai Panjang 0.1 m atau lebih. Dalam hal ini, inti terambil hanya yang keras saja walaupun inti yang tidak keras atau lunak memiliki panjang lebih dari 0.1 m. Diameter inti optimal yaitu sebesar 4.75 cm. Pada terowongan nilai RQD ini dapat dipakai untuk memperkirakan penyanggan terowongan. Saat ini RQD sebagai parameter standar untuk pemboran dan salah satu parameter dalam penentuan klasifikasi massa batuan RMR dan Q-system. Klasifikasi kualitas inti pemboran dapat dilihat pada Tabel 2.2. Berikut:

Tabel 2.2.

Klasifikasi Kualitas Inti Pemboran (RQD)

RQD	Kualitas massa batuan
< 25%	Sangat jelek
25 – 50%	Jelek
50 – 75%	Sedang
75 – 90%	Baik
90 – 100%	Sangat baik

Sumber: Anonim, 2012

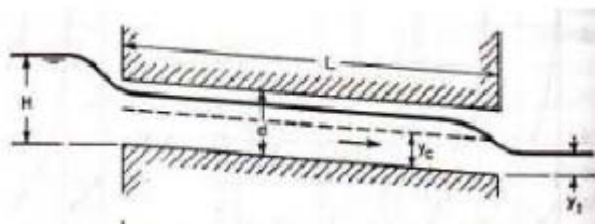
2.6. Analisis Hidrolika Pada Saluran Pengelak

Untuk analisis hidrolika pada saluran pengelak ini dibahas mengenai kapasitas pengaliran melalui saluran pengelak, baik melalui terowongan pengelak maupun conduit karena prinsip dasar dari kedua pengelak tersebut adalah sama. Kapasitas pengaliran saluran ini dibedakan menjadi tiga kondisi yaitu, pada saat aliran bebas (*free flow*) yaitu pada saat sifat hidrolik yang terjadi berupa hidrolika saluran terbuka, aliran transisi dan kondisi pada saat aliran tertekan yaitu pada saat sifat hidrolik yang terjadi berupa hidrolika saluran tertutup.

Tipe aliran pada saluran pengelak dibagi menjadi 2 kondisi :

a. Kondisi Aliran Bebas

Aliran bebas terjadi ketika perbandingan tinggi muka air dan tinggi saluran kurang dari 1,2. 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 pada aliran bebas

Sumber : Chow, 1992

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

Dengan:

n = koefisien kekasaran Manning

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

S = Kemiringan Terowongan

$Q = A.V$

(2-3)

Dengan:

Q = debit yang mengalir lewat terowongan (m^3/dt)

V = kecepatan aliran dalam terowongan (m/dt)

A = luas penampang basah (m^2)

n = koefisien kekasaran Manning = 0,0125

R = jari-jari hidrolika = $\frac{A}{P}$ (m)

P = perimeter (m)

S = kemiringan dasar terowongan = 0,0127

Untuk mengontrol pada kedalaman berapa terjadi keadaan pengaliran kritis digunakan rumus :

$$Q_c = \left[\frac{g \cdot A_c^3}{T_c} \right]^{1/2} \quad (2-4)$$

Dengan:

Q_c = debit yang lewat terowongan dalam keadaan kritis (m^3/dt)

g = percepatan gravitasi = 9,81 (m/dt^2)

T_c = lebar permukaan air (m)

A_c = luas penampang basah (m^2)

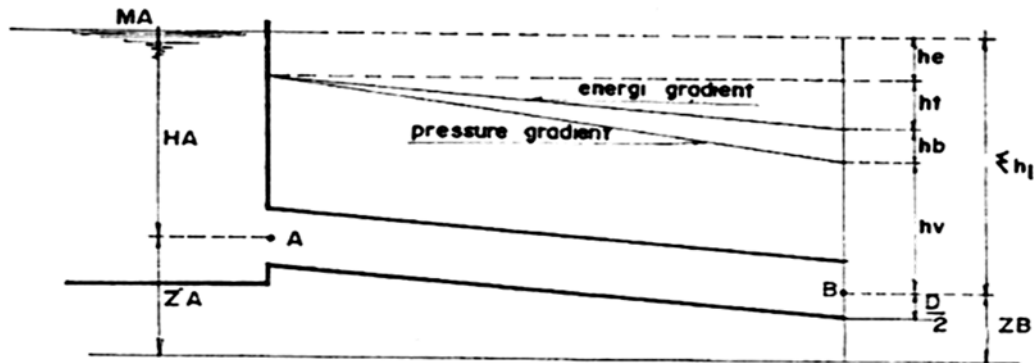
Bila debit yang terjadi lebih besar dari debit kritis, maka aliran dalam terowongan bersifat super kritis. Bila terjadi sebaliknya, maka aliran bersifat subkritis.

b. Kondisi Aliran Tekan

Aliran ini terjadi apabila terowongan terisi penuh atau ujung hulu terowongan

tenggelam ($H/D > 1,2$)

Pada keadaan ini digunakan rumus Bernoulli yang dinyatakan sebagai berikut:



Gambar 2.2 Diagram kondisi aliran Tekan

Sumber: Chow, 1992

Syarat yang harus dipenuhi untuk aliran tekan (*pressure condition*) adalah : $d/D > 1,2$ (Suryono Sosrodarsono dan Kensaku Takeda, 1989).

D = diameter saluran ($D=10,0$ m)

d = tinggi air di atas inlet pengelak

Q = A.V

Berlaku persamaan

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h}{\Sigma f}} \quad (2-5)$$

$$Q = A \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h}{\Sigma f}} \quad (2-6)$$

$$\Sigma f = f_e + f_g + f_c + f_b + f_o \quad (2-7)$$

f_e = koefisien kehilangan energi yang besarnya tergantung pada bentuk inlet

f_g = koefisien kehilangan energi akibat gesekan

$$f_g = \frac{f \cdot L}{D} \quad (2-8)$$

Dengan:

F = Koefisien Gesekan

$$= \frac{124,5 \cdot n^2}{D^{\frac{1}{3}}} \quad (2-9)$$

n = Koefisien kekasaran Manning

L = Panjang Terowongan

D = Diameter Terowongan

f_c = koefisien kehilangan energi akibat perubahan penampang

f_p = kehilangan energi karena adanya “eddy current” pada bagian sumbatan terowongan

$$= 0,1$$

f_b = kehilangan energi karena belokan

$= 0$ (Karena lokasi terowongan direncanakan tanpa belokan).

f_r = kehilangan tinggi energi karena gesekan

f_o = kehilangan energi pengeluaran (outlet)

$$f_o = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad (2-10)$$

Dengan:

A_1 = Luas Terowongan (m^2)

A_2 = Luas Outlet (m^2)

Jika $Q = A_1 V_1 = A_x V_x$, $A_1^2 V_1^2 = A_x^2 V_x^2$ dan $\frac{A_1^2 V_1^2}{2g} = \frac{A_x^2 V_x^2}{2g}$ maka : $\frac{V_x^2}{2g} = \left(\frac{A_1}{A_x}\right)^2 \frac{V_1^2}{2g}$

Dengan menggunakan persamaan diatas didapatkan hubungan kedalaman air di inlet (h) dan besarnya debit yang mengalir lewat terowongan untuk bermacam-macam diameter terowongan.

c. Kondisi Aliran Transisi

Untuk kondisi $2000 < Re < 4000$ aliran ini diklarifikasi sebagai Aliran Transisi. Untuk saluran tertutup Bilangan Reynolds telah dinyatakan sebagai:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (2-11)$$

Sedangkan :

$$R = \frac{A}{P} = \frac{0.25 \cdot TL \cdot D}{TL \cdot D} = \frac{D}{4} \quad (2-12)$$

Bilangan Reynold dapat juga ditulis sebagai :

$$Re = \frac{4 \cdot R \cdot V}{\nu} \quad (2-13)$$

D = Diameter Pipa (m)

A = Luas penampang pipa (m^2)

P = Keliling basah (m)

R = Jari-Jari hidrolis (m)

Pada Saluran Terbuka :

- Aliran Laminer terjadi jika $Re < 500$
- Aliran Turbulen terjadi jika $Re > 1000$

Untuk kondisi $500 < Re < 1000$ disebut Aliran Transisi

$$Re = \frac{V.R}{\nu} \text{ (berbeda 4 kali)} \quad (2-14)$$

2.7. Teori Pembebanan Terzaghi

2.7.1. Analisis Daya Dukung

Analisis daya dukung bertujuan mempelajari kemampuan tanah dalam mendukung beban pondasi struktur yang terletak diatasnya. Daya dukung menyatakan tahanan geser tanah untuk melawan penurunan akibat pembebanan, yaitu tahanan geser yang dapat dikerahkan oleh tanah disepanjang bidang-bidang gesernya. (Anonim, 2013)

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

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \mu \quad (2-15)$$

Dengan :

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

$$Pa = Df \cdot \gamma \quad (2-16)$$

Dengan:

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.

Kapasitas dukung ultimit (q_u) didefinisikan sebagai beban maksimum per satuan luas dimana tanah masih dapat mendukung beban tanpa mengalami keruntuhan.

$$q_u = P_u / A \quad (2-17)$$

Dengan:

q_u = daya dukung ultimate

P_u = Beban ultimate

A = Luas Telapak Pondasi

Menurut Terzaghi suatu pondasi dangkal ditentukan dari :

$$D \leq B$$

Dengan:

D_f = Kedalaman pondasi dangkal dari permukaan tanah

B = Lebar pondasi

2.7.2. Klasifikasi Batuan

Kebanyakan terowongan sekarang dibangun berdasarkan beberapa sistem klasifikasi. Seperti yang banyak digunakan dan yang paling baik diketahui adalah klasifikasi beban batuan Terzaghi, yang sudah diperkenalkan lebih dari 40 tahun yang lalu (Terzaghi, 1946). Sejak itu, klasifikasi dimodifikasi (Deere dan kawan-kawan, 1970) dan sistem klasifikasi baru diusulkan.

Sistem ini memperkenalkan teknologi penyangga batuan yang baru, yang diberi nama rock bolt dan shotcrete, yang digunakan diberbagai proyek seperti terowongan, ruang bawah tanah, tambang, lereng dan pondasi.

Terzaghi (1946) menjelaskan metode klasifikasi rasional yang pertama dengan mengevaluasi beban batuan yang tepat untuk merancang steel sets. Ini merupakan pengembangan yang penting karena penyangga dengan steel sets telah digunakan secara luas untuk terowongan selama 50 tahun yang lalu. Gambaran utama dari klasifikasi Terzaghi dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut:

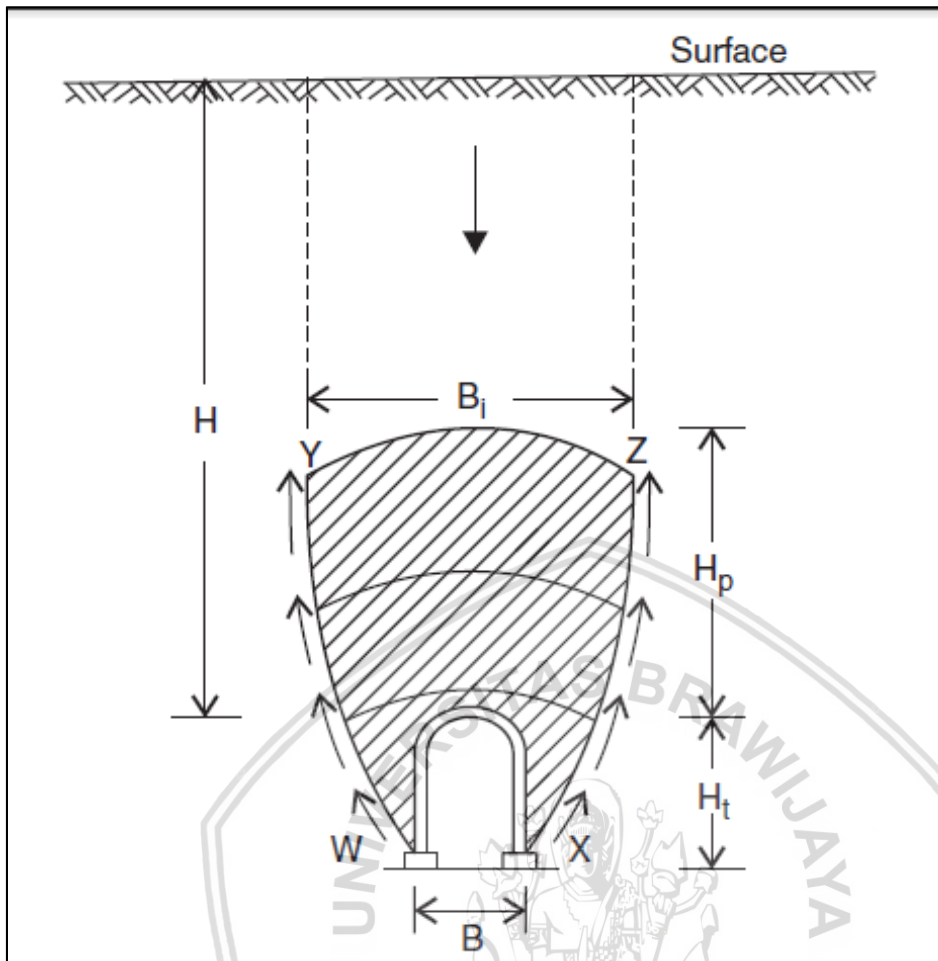
Tabel 2.3
Klasifikasi Massa Batuan menurut Terzaghi

Rock condition	Rock Load H_p (ft)	Remarks
1. Hard and intact	Zero	Light lining required only if spaling or popping occurs
2. Hard stratified or schistose	0-0.5 B	Light support, mainly for protection against spalls. Load may change erratically from point to point.
3. Massive, moderately jointed	0-0.25 B	
4. Moderately blocky and seamy	$0.25-0.35(B+H_t)$	No side pressure
5. Very Blocky and seamy	$(0.35-1.10) (B+ H_t)$	Little or no side pressure
6. Completely crushed	$1.10 (B+ H_t)$	Considerable side pressure softening effects of seepage toward bottom of tunnel require either continuous support for lower ends of ribs or circular ribs
7. Squeezing rock, moderate depth	$(1.10-2.10) (B+ H_t)$	Heavy side pressure, invert struts required, circular ribs are recommended
8. Squeezing rock, great depth	$(2.10-4.50) (B+ H_t)$	
9. Swelling rock	Up to 250 ft, irrespective of the value of $(B+ H_t)$	Circular ribs are required, In extreme cases, use yielding Support

Sumber: Singh, Bhawani., & Rajnish, K.Goel. 2006;26

2.7.3. Faktor Pembebanan Batuan

Terzaghi (1946) mengkombinasi hasil pembebanan batuan dari terowongan untuk menghitung faktor pembebanan batuan *Head Pressure* dengan istilah lebar terowongan B dan tinggi terowongan H_t dari kelenturan batuan diatas terowongan. Untuk diagram pembebanan dapat dilihat pada Gambar 2.3. Berikut:



Gambar 2.3. Diagram Pembebanan Terowongan
Sumber : Singh, Bhawani., & Rajnish, K.Goel. 2006;26

2.7.4. Pembebanan pada Terowongan

2.7.4.1. Arah Vertikal

a. Tekanan Batuan Atas

$$P_v = P_v = \gamma \cdot H_p \quad (2-18)$$

$$H_p = 2.1 (B + H_t) \quad (2-19)$$

Dengan:

γ = Unit Weight of Rock (t/m^3)

B = Lebar Terowongan (m)

H_t = Tinggi Terowongan (m)

H_p = Head Pressure

b. Tekanan uplift

$$\text{Uplift} = Y_w \cdot (H_w + H_r) \quad (2-20)$$

c. Berat Sendiri

$$P = \frac{A_{\text{luar}} - A_{\text{dalam}}}{B} \times \gamma_{\text{beton}} \quad (2-21)$$

Dengan:

A_{luar} : Luas Terowongan luar

A_{dalam} : Luas Terowongan dalam

d. Berat air konsolidasi penuh

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (2-22)$$

2.7.4.2. Arah Horizontal**a. Tekanan Batuan Aktif**

$$P_h = (K_a \cdot \gamma_b \cdot h^2) \quad (2-23)$$

b. Tekanan air dari luar

$$P_{wh} = \rho \cdot g \cdot h \quad (2-24)$$

c. Kondisi Gempa

Untuk mencegah terdinya kerutuhan akibat gempa, maka perlu diperhitungkan masalah pembebanan ketika kondisi gempa.

$$a_d = Z \cdot a_c \cdot v \quad (2-25)$$

$$K = \frac{a_d}{g} \quad (2-26)$$

Dengan:

a_d = Percepatan Gempa

Z = Zona Gempa

A_c = Periode Ulang

V = Faktor Koreksi

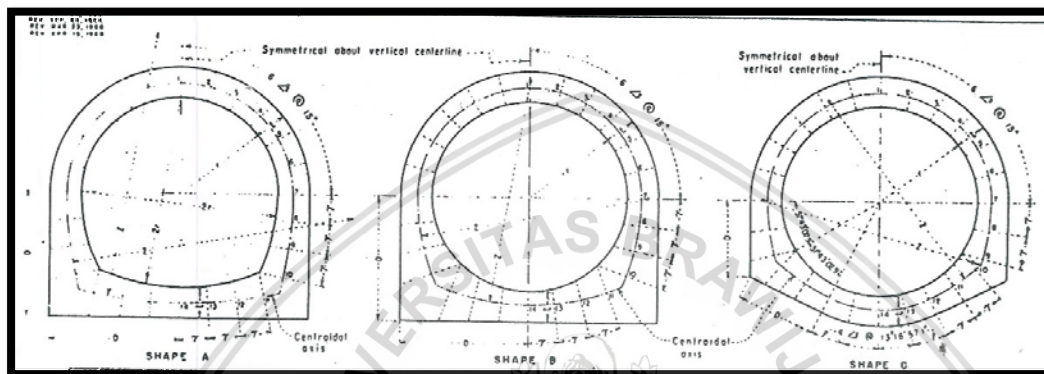
2.8. Bentuk-Bentuk Konstruksi pada Terowongan

Pada buku *Beggs Deformation Analysis of Single Barrel Conduit* menjelaskan pembebanan terhadap bentuk terowongan serta menjelaskan koefisien-koefisien yang mempunyai hubungan dengan beban-beban yang bekerja pada penampang terowongan. Dijelaskan pada beberapa bentuk dari terowongan yang secara umum digunakan, berikut macam-macam bentuk terowongan:

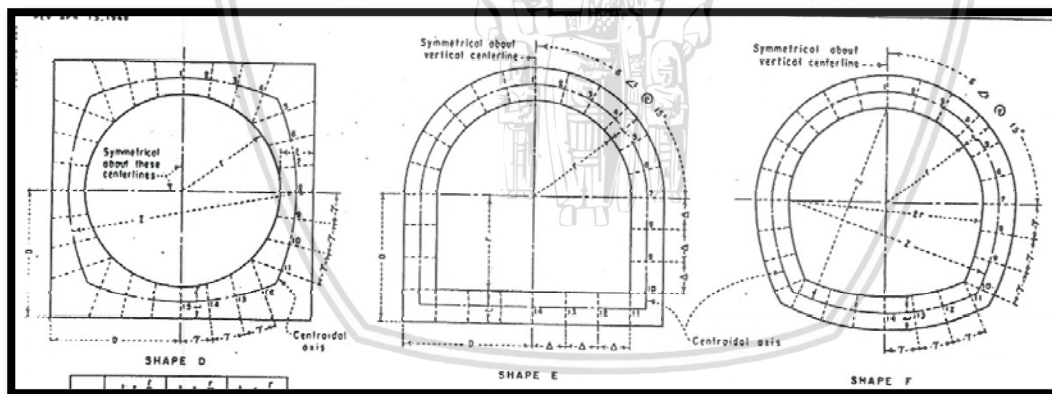
Bentuk A : Bentuk Tapal Kuda (*Horseshoe*) dengan bagian dalam bawah horizontal

Bentuk B : Bentuk Lingkaran (*Circular*) dengan bagian luar bawah horizontal (*curved horizontal base*)

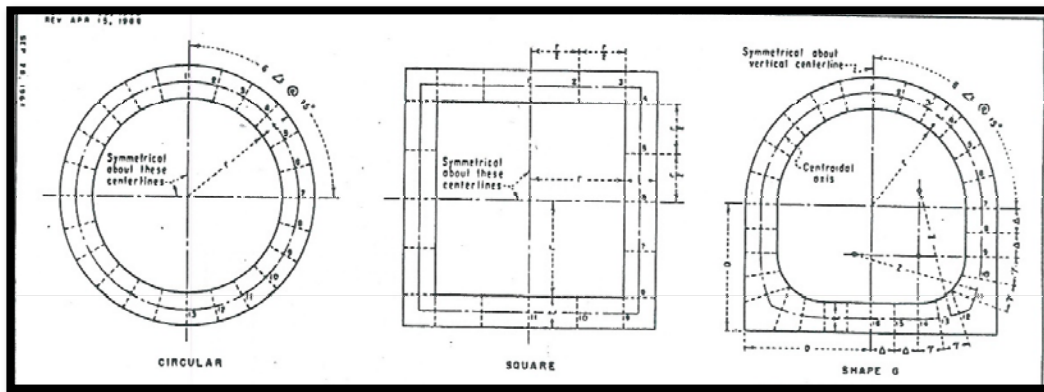
- Bentuk C : Bentuk Lingkaran (*Circular*) dengan bagian luar bawah melengkung (*curved exterior base*)
- Bentuk D : Bentuk Lingkaran (*Circular*) dengan bagian luar kotak (*Square exterior*)
- Bentuk E : Ketebalan Seragam (*Uniform Thickness*) dengan bagian dasar horizontal
- Bentuk F : Ketebalan seragam dengan bentuk tapal kuda (*Horseshoe*)
- Bentuk G : Gabungan antara bentuk B dengan bentuk E
- Bentuk H : Lingkaran Ketebalan Seragam
- Bentuk I : Kotak Ketebalan Seragam



Gambar 2.4. Bentuk Terowongan A,B,dan C
Sumber: Philips, H.B, & Allen, I.E. 1986:7



Gambar 2.5. Bentuk Terowongan D,E,dan F
Sumber: Philips, H.B, & Allen, I.E. 1986:



Gambar 2.6. Bentuk Terowongan G, Persegi, dan Lingkaran

Sumber: Philips, H.B, & Allen, I.E. 1986:7

Pada Tabel *Beggs Deformation Analysis of Single Barrel Conduit* untuk menentukan besaran momen, lintang, dan normal dengan tebal pembetonan disediakan dengan menggunakan persamaan :

$$M = k_m \cdot W \cdot r^2 \quad (2-27)$$

Dengan:

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

K_m = Koefisien Momen

W = Beban yang bekerja (ton,m²)

R = Jari-jari Terowongan (m)

Untuk menentukan besarnya gaya lintang menggunakan persamaan:

$$D = k \cdot W \cdot r \quad (2-28)$$

Dengan:

N = Gaya Normal pada segmen dinding terowongan (ton)

K = Koefisien Gaya Normal

Besaran koefisien dapat dilihat dari tabel yang disajikan *Beggs Deformation Analysis of Single Barrel Conduit* hasil disetiap bentuk terowongan menghasilkan koefisien yang berbeda, contoh koefisien pada terowongan bentuk A:

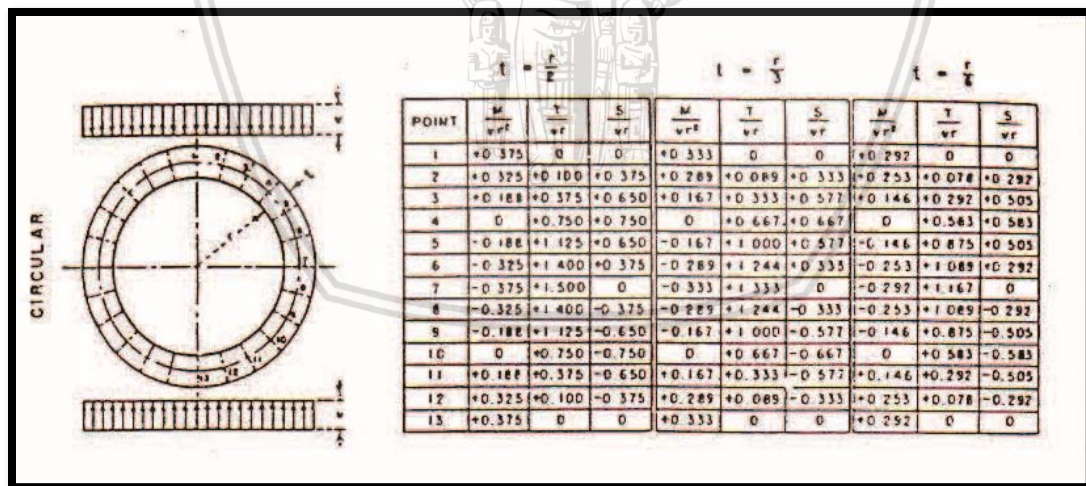
Tabel 2.4.
Besaran Koefisien Momen Bentuk A

Thick	t=r/2			t=r/3			t=r/6		
Point	M/vr ²	T/vr	S/vr	M/vr ²	T/vr	S/vr	M/vr ²	T/vr	S/vr
1	0.357	0.033	0.000	0.317	0.030	0.000	0.274	0.031	0.000
2	0.308	0.132	0.366	0.274	0.119	0.325	0.236	0.108	0.284
3	0.175	0.403	0.633	0.155	0.360	0.562	0.132	0.316	0.49
4	-0.006	0.773	0.727	-0.006	0.688	0.645	-0.008	0.605	0.562
5	-0.185	1.141	0.621	-0.165	1.015	0.551	-0.147	0.890	0.479
6	-0.312	1.408	0.343	-0.279	1.252	0.304	-0.246	1.096	0.262
7	-0.352	1.500	-0.033	-0.314	1.330	-0.030	-0.276	1.167	-0.031
8	-0.327	1.495	-0.132	-0.292	1.328	-0.120	-0.256	1.162	-0.110
9	-0.273	1.483	-0.230	-0.244	1.317	-0.209	-0.213	1.152	-0.190
10	-0.190	1.464	-0.328	-0.169	1.300	-0.297	-0.147	1.136	-0.268
11	0.042	0.157	-0.947	0.004	0.156	-0.915	-0.031	0.153	-0.882
12	0.261	0.051	-0.633	0.216	0.052	-0.612	0.174	0.050	-0.590
13	0.394	-0.012	-0.317	0.345	-0.010	-0.307	0.298	-0.010	-0.296
14	0.439	-0.033	0.0000	0.388	-0.030	0.000	0.340	-0.031	0.000

Sumber: Philips, H.B., & Allen, LE. 1986, 1986: 10

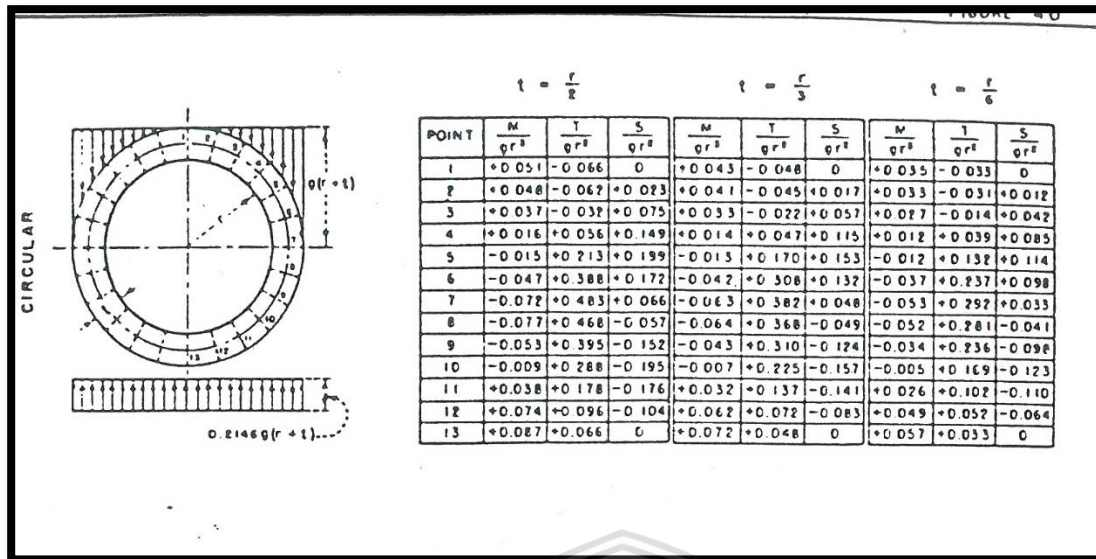
2.8.1 Mekanika Terowongan Pada Pembebanan Vertikal

Tabel *Beggs Deformation Analysis of Barrel Conduit* menyediakan koefisien momen yang disediakan pada pembebanan vertikal berikut nilai koefisien beserta gambar:

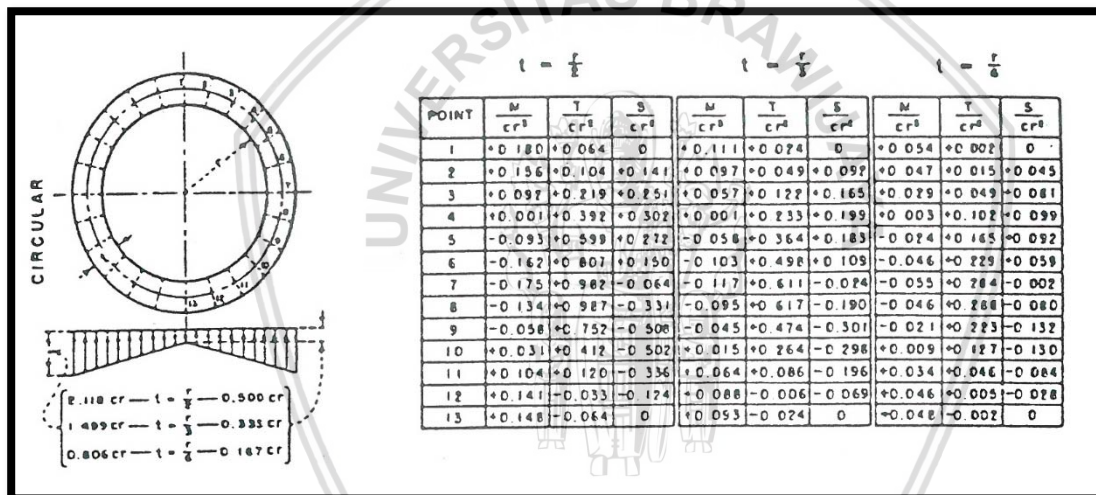


Gambar 2.7. Koefisien pembebanan vertikal seragam dan reaksi pondasi seragam

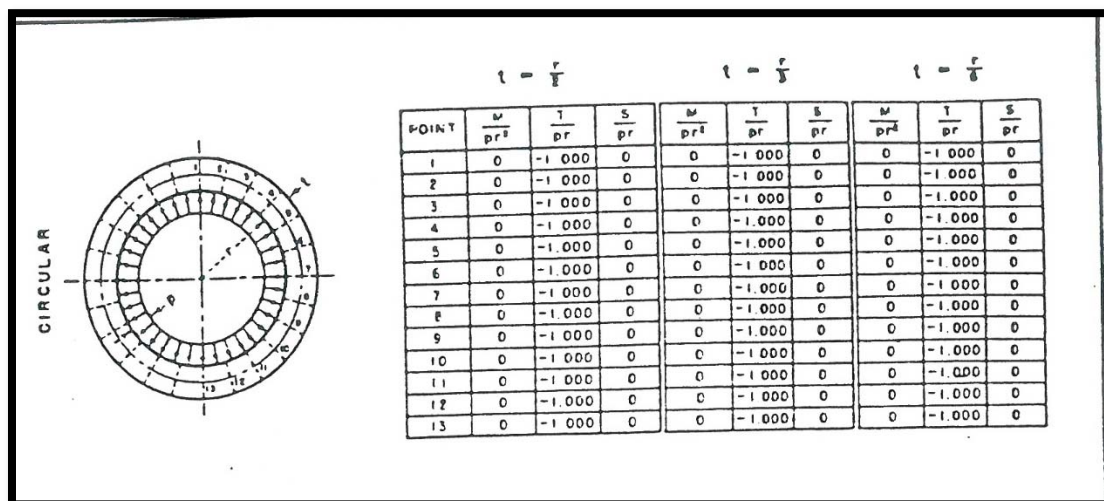
Sumber: Philips, H.B., & Allen, LE. 1986.



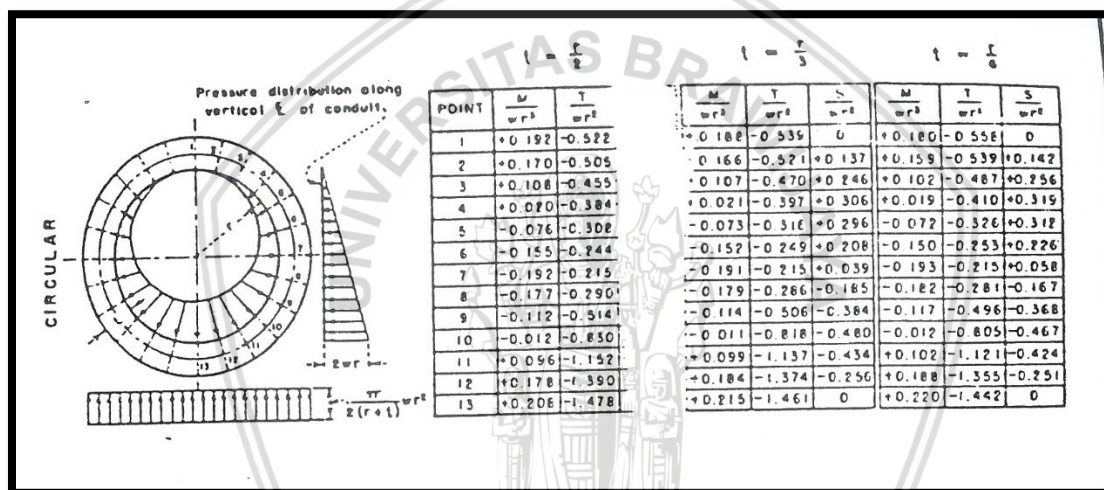
Gambar 2.8. Koefisien pembebanan vertikal membujur dan reaksi pondasi seragam
Sumber: Philips, H.B., & Allen, LE. 1986.



Gambar 2.9. Koefisien Pembebanan Berat Sendiri
Sumber: Philips, H.B., & Allen, LE. 1986.



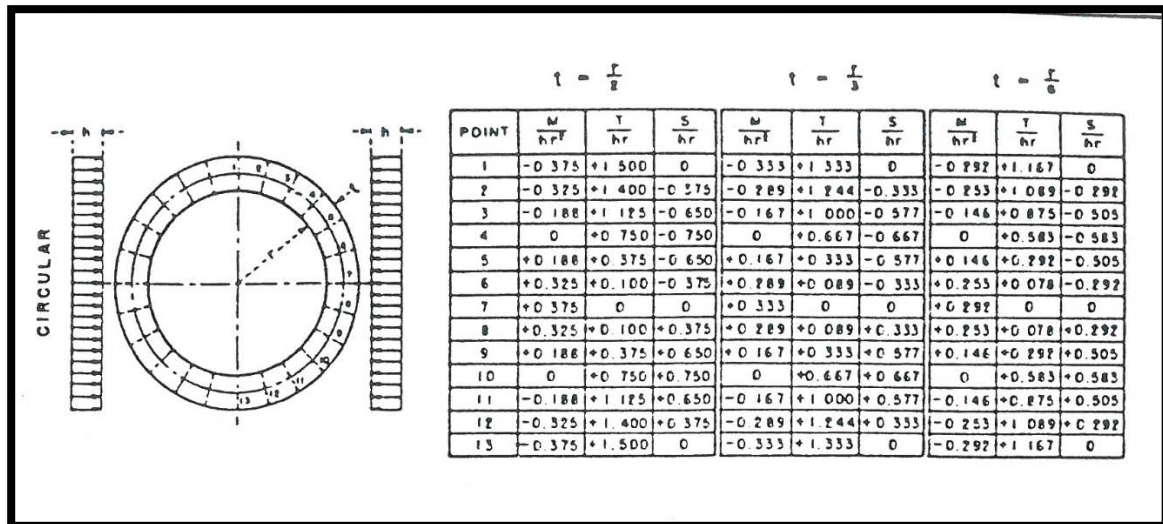
Gambar 2.10. Koefisien Pembebanan Tekanan dari Dalam
Sumber: Philips, H.B., & Allen, LE. 1986.



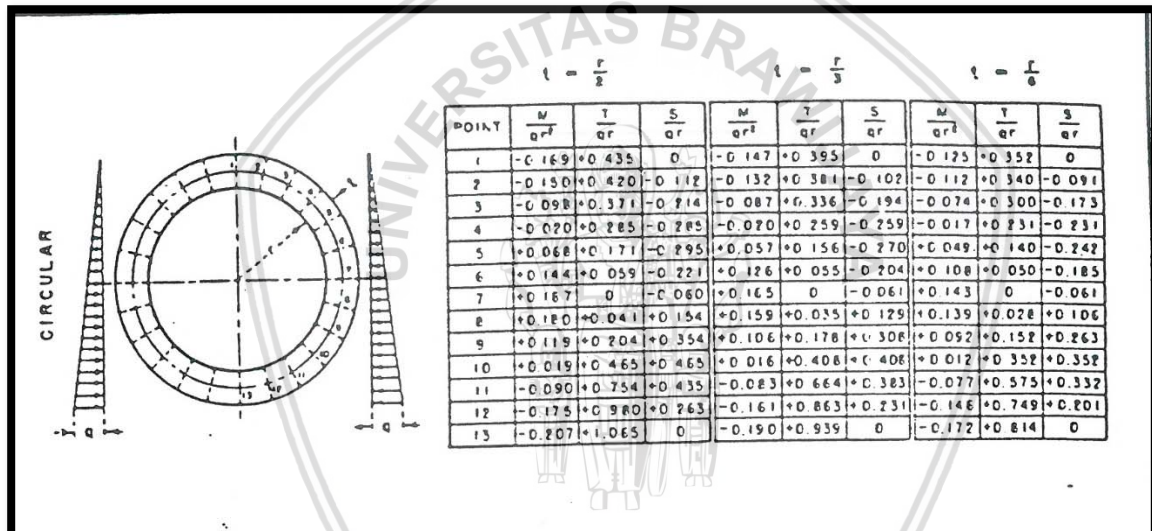
Gambar 2.11 Koefisien Pembebanan Tekanan Berat Air Penuh
Sumber: Philips, H.B., & Allen, LE. 1986.

2.8.2. Mekanika Terowongan Pada Pembebanan Horizontal

Tabel *Beggs Deformation Analysis of Barrel Conduit* menyediakan koefisien momen yang disediakan pada pembebanan horizontal berikut nilai koefisien beserta gambar:



Gambar 2.12. Koefisien Pembebanan Horizontal Seragam
Sumber: Philips, H.B., & Allen, LE. 1986.



Gambar 2.13. Koefisien Pembebanan Horizontal Segitiga
Sumber: Philips, H.B., & Allen, LE. 1986.

2.9. Software STAAD PRO untuk analisis 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. (M. Firdaus Alkaff.2005). Elemen mayor pada *interface* STAAD PRO sesuai dengan GUI (*Graphical User Interface*) dari STAAD PRO.

➤ Pulldown menu

Gunanya untuk mengakses ke semua fasilitas dari STAAD PRO.

➤ *Toolbar menu*

Toolbar berguna untuk mengakses perintah yang sering digunakan. Dapat juga membuat *customized toolbar* sendiri.

➤ *Main Windows*

Yaitu *layer* tempat bekerja, dimana model dan hasil analisis akan ditampilkan.

➤ *Page Menu*

Yaitu sekumpulan tab yang letaknya paling kiri dari *layer*. Setiap *page control* mempunyai perintah spesifik yang akan memudahkan dalam permodelan dan verifikasi hasil Analisa. Organisasi dari tab-tab tersebut menggambarkan operasi berurutan dari atas ke bawah. Setiap tab mempunyai nama spesifik dan *icon* tersendiri untuk mempermudah pekerjaan.

➤ *Data Area*

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

2.9.1. INPUT

STAAD PRO menyediakan *input data* melalui *input/command file* dan *graphical user* mengandung serangkaian perintah Bahasa Inggris yang mengandung instruksi atau data menyangkut Analisa maupun desain struktur. *Input data* pada program STAAD PRO meliputi tipe struktur, *unit system*, geometri struktur, spesifikasi batang, jenis tumpuan pembebanan, tipe analisa dan parameter desain struktur.

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

Dalam membaca output untuk gaya-gaya dalam, gaya-gaya dalam yang ditampilkan disesuaikan dengan koordinat/sumbu lokal elemen (Anonim, 2017).

2.10. Penulangan pada Konstruksi Dinding Terowongan

Langkah-langkah perencanaan beton bertulang/penulangan pada plat adalah sebagai berikut (W.C Vis D. Gideon K, 1991)

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. Untuk beban mati harus dikalikan dengan beban terfaktor sebesar 1,2 dan beban hidup sebesar 1,6.
3. Menentukan tebal pembebanan terowongan (t) dan tebal efektif (d) beton (direncanakan dan disesuaikan dengan table penutup beton).
4. Menghitung momen yang menentukan/momen luar.
5. Menghitung rasio tulangan dan luas tulangan pokok dengan menggunakan persamaan:

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

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

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

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

$$\rho = \omega \cdot \frac{f_c'}{f_y} \quad (2-33)$$

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

Dengan:

f_c' = Kuat tekan beton/mutu beton (Mpa)

f_y = Mutu baja tulangan (Mpa)

M_u = Momen yang bekerja (kNm)

b = panjang plat (diambil 1 m)

d = tebal efektif beton (cm)

R_n = momen per satuan luas

A_s = Luasan Tulangan (mm^2)

ρ = rasio tulangan yang direncana (mm^2)

$\rho_{\max}$ = rasio tulangan max (mm^2)

$\rho_{\min}$ = rasio tulangan min (mm^2)

6. Memilih diameter tulangan

Berdasarkan hasil perhitungan luas tulangan pasa mm^2 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 terhadap gaya lintang dirumuskan (SK SNI 1991)

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

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

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

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

Dengan:

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

$V_u \leq 0,5 \cdot \Phi \cdot V_c$ 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)

2.10.1. 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.

2.11.1.1. Mutu Beton f'_c

Beton dengan mutu beton f'_c 25 menyatakan kekuatan tekan minimum adalah 25 MPa pada umur beton 28 hari. Dan untuk beton dengan mutu dari 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 2.4. berikut:

Tabel 2.5.
Konversi Mutu Beton f'_c ke K

Mutu beton		$K = f'_c / 0.083$		Mutu Beton		$f'_c = K \cdot 0.083$	
Mpa		Kg/cm ²		Kg/cm ²		Mpa	
f'_c	5.0	K	60.2	K	100	f'_c	8.3
f'_c	10.0	K	120.5	K	125	f'_c	10.4
f'_c	12.0	K	144.6	K	150	f'_c	12.5
f'_c	15.0	K	180.7	K	175	f'_c	14.5
f'_c	16.0	K	192.8	K	200	f'_c	16.6
f'_c	20.0	K	241.0	K	225	f'_c	18.7
f'_c	22.5	K	271.1	K	250	f'_c	20.8
f'_c	25.0	K	301.2	K	275	f'_c	22.8
f'_c	30.0	K	361.4	K	300	f'_c	24.9
f'_c	35.0	K	421.7	K	325	f'_c	27.0
f'_c	40.0	K	481.9	K	350	f'_c	29.1

Sumber : Vis dan Kusuma ; 1994

2.11.2. Mutu Baja dan Tulangan

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

Tulangan yang dapat 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

Biasanya digunakan untuk tulangan geser dan mempunyai tegangan leleh (f_y) minimal sebesar 240(MPa) dengan ukuran $\phi 6, \phi 8, \phi 10, \phi 12, \phi 14$, dan $\phi 16$

2. Baja tulangan ulir

Digunakan untuk tulangan longitudinal atau tulangan memanjang, dan mempunyai titik leleh minimal 300 MPa. Dengan ukuran D10, D13, D16, D19, D22, D25, D29, D32, dan D36

Untuk mutu baja tulangan dapat dilihat pada Tabel 2.6. berikut:

Tabel 2.6.
Mutu Baja Tulangan

Mutu Baja	Kuat Leleh f_y (Mpa)	Kuat Leleh (kg/m ²)
$f_y.240$	240	2400
$f_y.300$	300	3000
$f_y.400$	400	4000
$f_y.500$	500	5000

Sumber : SNI;1992

2.11. Metode Pelaksanaan *Grouting*

2.11.1. *Grouting*

Permeabilitas berbutir kasar dapat diperkecil dengan cara *grouting*. Proses tersebut terdiri dari penyuntikan suatu cairan yang sesuai, dikenal dengan sebutan *grout*, kedalam pori-pori tanah. *Grout* tersebut secara berangsur-angsur akan mengeras, sehingga dapat mencegah atau memperkecil rembesan air. *Grouting* juga menghasilkan kenaikan kekuatan tanah. Cairan yang digunakan untuk *grouting* meliputi campuran semen air, suspensi lempung, larutan kimia, seperti sodium silikat atau dammar sintesis, dan emulasi bitumen. Penyuntikan (*injection*) biasanya dilakukan ke dalam suatu pipa yang dimasukkan ke dalam tanah atau ditempatkan kedalam lubang bor dan di tahan dengan sebuah selubung.

Distribusi ukuran partikel tanah menunjukkan jenis *grout* yang akan digunakan. Partikel-partikel *suspense* dalam *grout*, seperti semen atau lempung, akan merembes pori-pori tanah bila ukuran pori-pori yang lebih kecil dari ukuran ini akan menghalangi partikel untuk menembus tanah. *Grout* semen dan lempung hanya cocok untuk kerikil dan pasir kasar. Untuk pasir sedang dan pasir halus, *grout* yang digunakan adalah jenis larutan dan emulsi.

Grouting merupakan suatu metode atau teknik yang digunakan untuk memperbaiki keadaan bawah tanah dengan cara memasukkan bahan yang masih dalam keadaan cair, dengan cara tekanan, sehingga bahan tersebut akan mengisi semua retakan-retakan dan lubang-lubang yang ada dibawah permukaan tanah, kemudian setelah beberapa bahan tersebut akan mengeras, dan menjadi satu kesatuan dengan tanah yang ada sehingga kestabilan suatu permukaan tanah akan tetap terjaga.

Fungsi *grouting* di dalam tanah atau batuan dapat dibagi menjadi tiga, yaitu:

- a. Penetrasi atau penembusan (*permeation/penetration*)

Grouting mengalir ke dalam rongga tanah dan lapisan tipis batuan dengan pengaruh minimum terhadap struktur asli.

- b. Kompaksi atau Pemadatan

Material *grouting* dengan konsistensi sangat kental dipompakan ke dalam tanah sehingga mendorong dan memadatkan.

- c. Rekah Hidrolik

Apaabila tekanan *grouting* lebih besar dari kuat tarik batuan atau tanah yang di *grouting*, akhirnya material pecah dan *grouting* dengan cepat menembus zona rekahan.

Manfaat dari suatu pekerjaan *grouting* antara lain adalah sebagai berikut (Dwiyanto, 2005):

- a. Menahan aliran air dan mengurangi rembesan
- b. Memperkuat tanah dan batuan
- c. Mengisi rongga dan celah pada tanah dan batuan sehingga menjadi padat
- d. Memperbaiki kerusakan struktur
- e. Meningkatkan kemampuan *anchor* dan tiang pancang
- f. Menghindarkan dari material fluida yang dapat merusak tanah atau batuan

2.11.2. Jenis – Jenis Grouting

a) Jenis Grouting Berdasarkan Tujuannya

Menurut Kadar Budiyo tahun 2000 di dalam bukunya “*Pelaksanaan Grouting Bendungan Sangiran, Ngawi, Jawa Timur*”, berdasarkan tujuannya, tipe *grouting* dapat dibedakan menjadi 7 yaitu:

1. Sementasi Tirai (*Curtain Grouting*)

Tujuan utama dari jenis *grouting* ini adalah membentuk lapisan vertikal kedap dibawah permukaan, disamping juga untuk menambah kekuatan pondasi bendungan.

2. Sementasi Selimut (*Blanket Grouting*)

Tujuan utama dari jenis *grouting* ini adalah untuk memperbaiki lapisan permukaan tanah atau batuan pondasi yang langsung berhubungan dengan inti.

3. Sementasi Konsolidasi (*Consolidation Grouting*)

Tujuan utama dari *grouting* ini hampir sama dengan Sementasi Selimut (*Blanket Grouting*). Yang membedakan adalah pada pelaksanaan konsolidasi lubang bor dibuat lebih dangkal. Dikarenakan hanya untuk perbaikan lapisan permukaan tanah saja.

4. Sementasi Kontak (*Contact Grouting*)

Fungsi dari *grouting* ini adalah untuk menghubungkan antara lapisan lama dengan lapisan yang baru. Jadi antara lapisan yang sejenis maupun yang berbeda juga bisa, misalnya pada bendungan di bawah *concrete pad*.

5. Sementasi Semprot (*Slush Grouting*)

Untuk menutup permukaan pondasi bendungan, waduk, terowongan, atau struktur dengan tujuan mencegah kebocoran pada kontak antara pondasi dan material pondasi di atasnya dengan cara menyemprotkan semen atau mortar pada permukaan batuan pondasi untuk menutup celah, kekar atau rongga.

6. *Cavity Grouting*

Grouting ini digunakan untuk mengisi lubang atau celah antara struktur *concrete* dengan batuan atau lining terowongan dengan batuan.

7. Sementasi Cincin (*Ring/Radial Grouting*)

Pada prinsipnya sama dengan *grouting* tirai yaitu dengan membuat lapisan yang kedap air, tetapi dilaksanakan pada terowongan.

b) Jenis *Grouting* Berdasarkan Pelaksanaannya

Pembagian tipe sementasi berdasarkan metode pelaksanaannya dapat dibagi menjadi 2 metode sementasi, yaitu *Single Stage Grouting* dan *Multiple Stage Grouting*. Untuk *Multiple Stage Grouting* dibedakan lagi menjadi metode *Down Stage* dan *Up Grouting*.

1. *Single Stage Grouting*

Pada metode ini, pemboran dilaksanakan sampai pada kedalaman yang diinginkan, kemudian *grouting* dilaksanakan sekali mencakup seluruh kedalaman, dengan alat *packer* sebagai penutup lubang terletak dibagian atas lubang bor.

2. *Multiple Stage Gouting*

a. *Metode Grouting Up Stage*

Dalam pelaksanaan metode ini, lubang *grouting* dibor hingga mencapai kedalaman yang diinginkan kemudian dipasang sebuah alat *packer* didalam lubang bor. Alat *packer* ini berfungsi untuk menutup lubang bor agar campuran semen tidak kembali ke permukaan ketika disemprotkan, sehingga seluruh material *suspense grouting* dapat masuk ke sisi samping lubang bor. Kemudian dilakukan *grouting stage* mulai dasar lubang bor, menuju ke atas

b. *Metode Grouting Down Stage*

Pada pelaksanaan metode *grouting* ini, lubang yang nantinya akan di *grouting* dipersiapkan terlebih dahulu dengan melakukan pengeboran tahap pertama, kemudian dilakukan pencucian lubang bor dengan air pemboran (*Washing*) hingga kondisi lubang bor cukup bersih. Kemudian dilakukan *grouting* sepanjang lubang bor dengan kedalaman sesuai *stage* pertama tersebut. Setelah pelaksanaan *stage* pertama selesai, tekanan dibiarkan konstan untuk beberapa saat, kemudian alat *packer* dicabut dan pemboran dilanjutkan kembali pada kedalaman *stage* selanjutnya.

Setelah pelaksanaan *grouting* selesai hingga mencapai keseluruhan kedalaman yang diinginkan, lubang bor dibersihkan kembali dan ditutup dengan material *grouting* dengan letak alat *packer* diatas lubang bor.

2.11.3. Aplikasi *Grouting* pada bangunan pelengkap

Bangunan Pelengkap adalah bangunan – bangunan beserta instalasinya yang memungkinkan beroperasinya bendungan dengan baik. Berarti tanpa bangunan ini bendungan tidak dapat dibangun, tidak dapat berfungsi dengan baik dan membahayakan

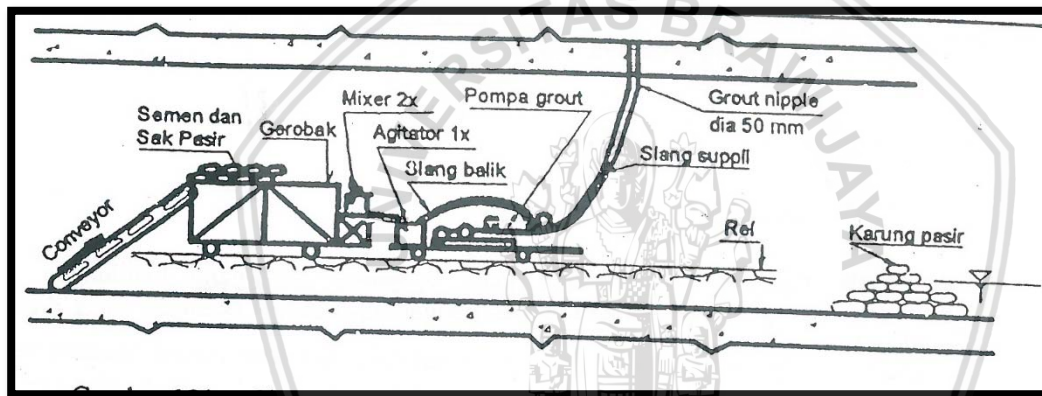
konstruksi bendungan. Adapun bangunan pelengkap ini meliputi bangunan pengelak, bangunan pelimpah dan bangunan pengambilan. Berkaitan dengan aplikasi *grouting* pada bangunan pelengkap khususnya bangunan pengelak, dapat dikelompokkan sebagai berikut:

- Backfill grouting* untuk tipe terowongan
- Consolidation grouting* untuk terowongan/saluran
- Contact grouting* untuk penyumbatan/plugging
- Radial (ring) curtain grouting* pada potongan as dam

2.11.4. Prosedur Pelaksanaan

2.11.4.1. Grouting Pengisi

- Grouting* pengisi atau *backfill grouting* dilaksanakan khusus dalam terowongan untuk mengisi rongga *overbreak* terowongan plus pembetonan lining terowongan, terutama terowongan pengelak, pelimpah, dan juga pengambilan



Gambar 2.14. Skematis Pelaksanaan *Backfill Grouting* didalam Terowongan

Sumber: Anonim, 2005

- Penempatan titik *grout* perlu disiapkan lebih dini dengan memasang *guide pipe (grout pipe)* Φ 50 mm pada saat fabrikasi tulangan dan kemudian dibenam setelah selesai di *grout*. Hal ini akan mempermudah pelaksanaannya *backfill grouting* tanpa ada tulangan yang putus oleh pemboran lubang *grout*.
- Umur pembetonan lining untuk dilaksanakannya *backfill grouting* minimal 2 minggu dan lebih lama lebih baik.
- Perhitungan volume *backfill grouting* dapat dihitung dengan rumus:

$$V = 2\pi(R + r) \times t_{ob} \quad (2-39)$$

Dengan:

V = volume *backfill* persatuan panjang (m^3)

R = jari-jari jadi terowongan (m)

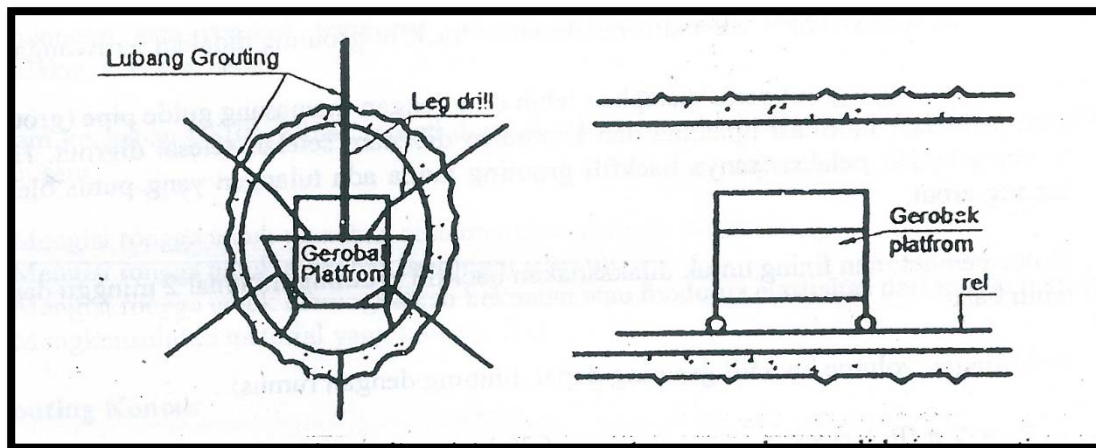
r = tebal lining beton (m)

- t_{ob} = tebal *overbreak* (m) sesuai spesifikasi 10% dari jari-jari terowongan atau diperhitungkan berdasarkan kondisi aktual.
- Campuran *grouting* perlu disiapkan dengan uji coba campuran (*trial mix*) dan pengujian viskositas mortar dengan *flow corie* atau *marsh cone*.
 - Campuran grout untuk *backfill grouting* adalah mortar yang terdiri dari air : semen : pasir ayak = 1 : 1 : 4 hingga 1 : 1 : 2 dalam campuran berat, pasir ayak yang dipakai dengan ukuran maksimum 1,5 mm untuk menambah fluiditas diperlukan editif seperti bentonit ata bahan kimia.
 - Dalam prakek campuran yang baik, memiliki nilai rate yang berkisar 18 hingga 20 detik dengan uji *flow cone* dan campura diawali lebih encer.
 - Penyiapan lubang *grout*, apabila sudah tersedia *grout ripple* tinggal membuka kembali dan dicek ulang kedalamannya dengan *leg drill*, kemudian disambung dengan slang suplai.
 - Apabila belum tersedia lubang maka perlu disediakannya lubang bor dengan *leg drill*, *rotary drill* atau DTH (*down to hole*) *drill* dengan diameter 33 mm hingga 45 mm. Pemasangan packer pendek tipe *lever expantion packer* dengan panjang 25 cm pada mulut lubang *grout* menembus ketebalan *concrete lining*.
 - Tekanan maksimum *grouting* yang diijinkan adalah 3kg/cm^2 , karena *backfill grouting* tergolong *grouting* bertekanan rendah.
 - Disamping tekanan *grout*, penyebaran *grout* dapat dikontrol dengan membuka lubang *grout* selang satu lubang disekitarnya.

2.11.4.2. *Grouting* Konsolidasi

2.11.4.2.1. Pelaksanaan dalam terowongan

- Pengerjaan *grouting* konsolidasi pada bangunan penunjang bendungan yaitu didalam terowongan pengelak, pelimpah, maupun pengambilan secara skematis dapat digambarkan pada Gambar 2.14. berikut:



Gambar 2.15. Skematik Pelaksanaan Pemboran untuk *Consolidation Grouting* dalam Terowongan.

Sumber: Anonim, 2005

- b. Setelah selesai pengerjaan *backfill grouting* dan selang minimal 2 minggu baru dimulai pelaksanaan *consolidation grouting* pada blok tersebut.
- c. Pemasangan *guide pipe / grout pipe* Φ 50 mm sejak dini pada saat fabrikasi tulangan pada pembetonan perlu dilakukan sehingga bebas kemungkinan pemboran yang dilakukan memotong tulangan. Hal ini diupayakan agar memudahkan pemboran lubang *grout* dan mengurangi kekuatan beton.
- d. Pemboran pada *grouting* konsolidasi untuk kedalaman sampai 3 m dapat dilakukan dengan *leg drill* seperti pada gambar 2.11., sedangkan yang lebih dalam dari 3 m perlu dengan DTH (*down to hole*) *percussion rotary drill* atau dengan *rotary drilling machine*.
- e. Diameter lubang *grout* berkisar 33 mm hingga 46 mm dan setiap *step/stage* dengan panjang 3 m hingga 5 m harus dilakukan test air.
- f. Pola perpindahan titik bor dan *grout* pada setiap blok mengacu pada acara *split-spacing* dan pada terowongan bertekanan, perpindahan pengrotingan berpola spiral.
- g. Perlu dimulai dengan lubang pilot yang dilengkapi pengambilan contoh inti dan pengujian air bertekanan, umumnya dengan cara modifikasi lugeon test. Kemudian diikuti pada lubang-lubang *grout* tanpa inti, tetapi selalu sebelumnya harus dilakukan pengujian air bertekanan untuk menguji nilai dari lugeon.
- h. Kriteria perlu dilanjutkan dengan *grouting* konsolidasi tergantung dengan nilai lugeon pada step tersebut dengan contoh spesifikasi sebagai berikut:
 - Nilai $Lu < 5$ tidak perlu digROUT
 - Nilai $10 > Lu > 5$, perlu digROUT dengan campuran 1/10, 1/5, 1/3 dan 1/1
 - Nilai $Lu > 15$, campuran dimulai dari 1/3 dan 1/1 dan apabila perlu dilanjutkan 1/0,5.

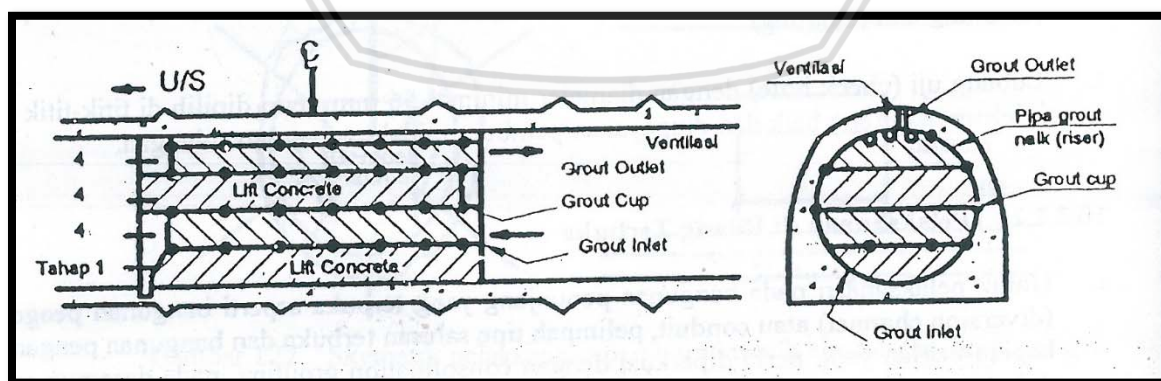
- i. Sesuai dengan panjang *step*, biasanya 3 m dan dapat dilakukan *grouting step* tunggal dengan tekanan maksimum yang diijinkan tidak lebih dari 5kg/cm^2
- j. Apabila terjadi kebocoran dibagian konstruksi lain perlu dilakukan penyumbatan.
- k. Lubang uji dengan diameter minimal 56 mm perlu dipilih di titik-titik yang dinilai injeksinya kurang baik dan diupayakan pemboran tidak menembus tulangan.

2.11.4.3. Grouting Kontak

- a. Pelaksanaan Grouting pada prinsip penegerjaannya sama dengan *backfill* atau *filling grouting*, namun umumnya sangat bervariasi tempatnya sesuai dengan fungsinya.
- b. Beberapa variasi tempat *contact grouting* untuk bangunan penunjang, diantaranya:
 - *Contact Grouting* untuk penyumbatan (*plugging*) terowongan pengelak antara beton lama dan beton baru.
 - *Contact Grouting* untuk perbaikan sandaran dinding pelimpah, antara beton dan permukaan batuan.
 - *Contact Grouting* untuk komponen bangunan pengambilan, antara pipa pesat baja dengan beton lama, antara beton primer dan beton sekunder.
 - *Contact Grouting* sering dipakai untuk mengatasi tambah-tambahan perbaikan yang tidak terjangkau oleh cara *grouting* lainnya dan dipakai secara *sporadic* disana-sini yang memerlukan pengisian bekas lubang rekah-rekahan, sesar-sesar minor, retak-retakan, celah-celah pada batuan, beton, baja dan lain-lain.

2.11.4.3.1. Grouting Kontak pada Penyumbatan Terowongan Pengelak

- a. Tahap penyumbatan pada terowongan pengelak menandai waduk siap diisi, sehingga kegagalan dalam penyumbatan menyebabkan pengisian waduk tertunda.



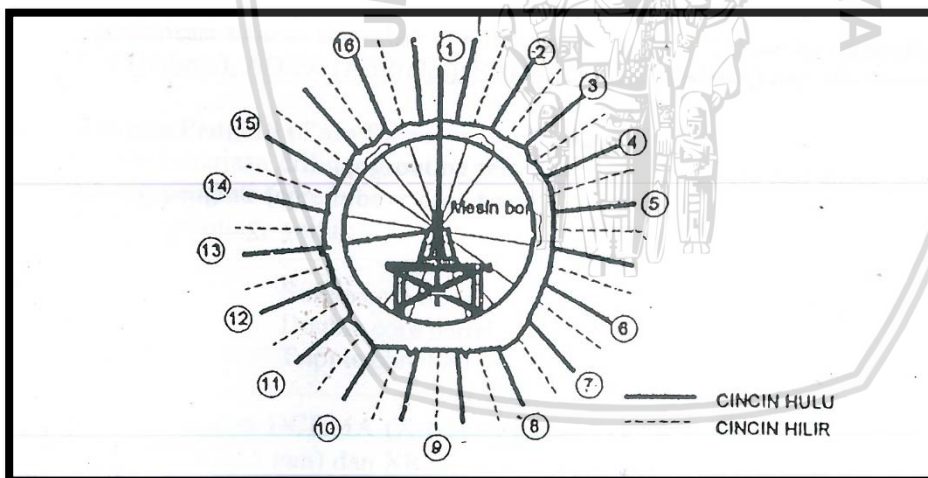
Gambar 2.16. Instalasi Pemipaan untuk *Contact Grouting* pada *Main Plug* Suatu *Diversion Channel*

Sumber: Anonim, 2015

- b. Setelah selesai penyiapan instalasi pemipaan sesuai gambar rencana penyumbatan, akan diikuti dengan pengujian dan pengisian air. Keberhasilan instalasi akan terlihat pada kenaikan manometer dan pipa *outlet*.
- c. Campuran *grout milk* terdiri dari air : semen = 1 : 1 dalam selanjutnya dipompakan hati-hati dengantekanan maksimum 5 kg/cm² dan *grout take* sesuai dengan direncanakan dan tidak memperlihatkan kebocoran diantara beton lama dan baru serta antar *lift* ke *lift* pembetonan.
- d. Dalam pengerjaan *contact grouting* dalam *plugging* bersamaan dengan curing dari setiap lift pembetonan melalui pipa-pipa pendingin. Panas hidrasi dari pembekuan massa beton perlu diimbangi dengan sirkulasi air pendingin selama 1 samapai 3 hari terus menerus.
- e. Baru pada tahap akhir pembetonan setelah mendingin yakni setelah umur 1 minggu diikuti dengan *contact grouting*.

2.11.4.4. Grouting Radial

- a. Pelaksanaan *radial grouting* didalam terowongan, biasanya dilakukan dengan mesin bor tipe putar dengan *spindle* yang diputar 300 derajat mengikuti inklinasi lubang *grout*.
- b. Biasanya terdiri dari 2 cincin mengikuti baris dan *curtain grouting* pada *bendung* utama.



Gambar 2.17. Grouting Radial didalam Terowongan Bundar

Sumber : Anonim, 2015

- c. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.13., dengan mesin bor putar dilakukan pengeboran lubang *grout* sesuai inklinasi yang ditetapkan dan urutan pemboran selalu dilakukan dengan arah bertolak belakang.
- d. Urutan pelaksanaan sesuai dengan *curtain grouting* dengan cara bertahap dengan panjang step 3-5 m dengan kedalaman sesuai spesifikasi desainnya. Cara *grouting* dapat seperti *upstage* atau *downstage*.

- e. Campuran *grout* standar seperti dalam *curtain grouting* diawali encer 1/10 dan dirubah bertahap ke kenl 1/1 hingga jenuh mencapai tekanan maksimum *grouting*.
- f. Sebelum penetapan perlu atau tidaknya *digROUT*, perlu ditest nlai lugeonnya, bila kurang dari 2 atau 5 dinyatakan tidak perlu *digROUT*.
- g. Setelah selesai *grouting* terutama di bagian atap perlu diisi dengan campuran kental dan disumbat sementara, begitu pula di bagian lantai dan samping.



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



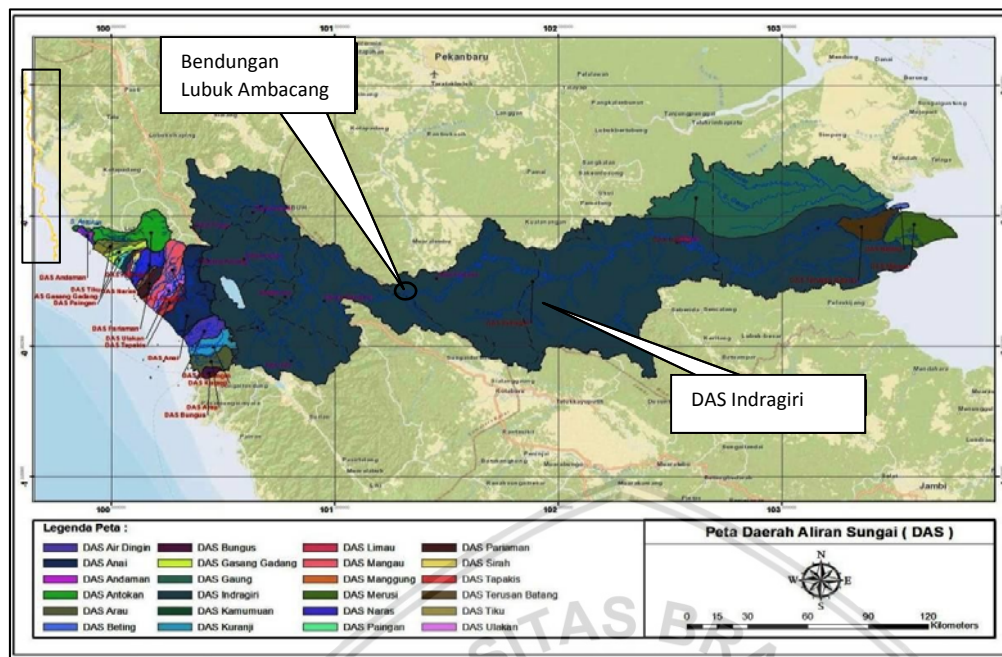
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Lokasi Daerah Studi

Lokasi Bendungan Lubuk Ambacang berada di Sungai Indragiri. Secara administratif terletak pada Kecamatan Hulu Kuantan, Kabupaten Kuantan Singingi, Provinsi Riau. Letak geografis rencana lokasi Bendungan Lubuk Ambacang terletak pada sekitar $00^{\circ}36'46,6''$ Lintang Selatan dan $101^{\circ}19'27,7''$ Bujur Timur. Sungai Indragiri masuk dalam Wilayah Sungai Indragiri-Akuaman. Berdasarkan Keputusan Presiden Nomor 12 Tahun 2012 tentang Penetapan Wilayah Sungai, Wilayah Sungai Indragiri-Akuaman yang selanjutnya disebut WS Indragiri- Akuaman, merupakan WS Lintas Propinsi. Dasar penggabungan Wilayah Sungai Indragiri- Akuaman adalah adanya outlet Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Singkarak yang dialirkan ke Sungai Anai yang mengalir ke Lautan Indonesia.

WS Indragiri-Akuaman seluas 25.270 km^2 terdiri atas 24 (dua puluh empat) daerah aliran sungai (DAS). Sungai Indragiri merupakan sungai terpanjang ($\pm 706 \text{ km}$) mengalir dari Pegunungan Bukit Barisan hingga bermuara di Selat Malaka, terletak pada koordinat $0^{\circ}17' \text{ LS} - 0^{\circ}20' \text{ LS}$ sampai dengan $0^{\circ}03' \text{ LU} - 0^{\circ}23' \text{ LS}$ dan $99^{\circ}49' \text{ BT} - 100^{\circ}22 \text{ BT}$ sampai dengan $100^{\circ}19' \text{ BT} - 103^{\circ}49' \text{ BT}$.



Gambar 3.1 Peta Lokasi Studi
Sumber PT Indra Karya

3.2. Data-Data yang Diperlukan

Data-data yang diperlukan dalam studi ini berdasarkan batasan dan rumusan masalah pada BAB I, maka data-data yang diperlukan adalah sebagai berikut :

1. Data *Inflow*

Data *Inflow* yang dipakai dalam analisis berasal dari pengukuran dan pencatatan 22 (dua puluh dua) pos hujan yang tersebar di WS Indragiri-Akuaman dalam kurun waktu bervariasi mulai dari Tahun 1979 hingga Tahun 2014. Stasiun curah hujan dikelola oleh beberapa instansi seperti Dinas Pengelolaan Sumber Daya Air Sumatera Barat dan Dinas Pekerjaan Umum Riau. Data curah hujan ini digunakan untuk memperoleh data debit banjir.

2. Data Geologi

Penyelidikan Geologi Teknik dilaksanakan di daerah rencana bendungan, bangunan pendukung, daerah genangan, dan lokasi ketersediaan material konstruksi. Pekerjaan Detail Desain Bendungan Lubuk Ambacang merupakan lanjutan dari Pekerjaan Studi Kelayakan pada tahun 2011. Dalam pelaksanaan pekerjaan Detail Desain ini dilakukan Investigasi Geologi dan Mekanika Tanah secara detail. Data geologi tubuh Bendungan Lubuk Ambacang digunakan untuk mengetahui tepat atau tidaknya kondisi geologi pada pembangunan bendungan Lubuk Ambacang.

3. Data Topografi (Peta Topografi)

Untuk data topografi digunakan untuk menentukan lokasi terowongan pengelak dalam bentuk peta, dimana mengenai elevasi dan juga desain terowongan pengelak.

4. Data Teknis Saluran Pengelak

Bangunan pengelak dibangun pada awal konstruksi bendungan. Bangunan berfungsi untuk mengalihkan aliran sungai selama periode pelaksanaan konstruksi. Diperlukan Data Teknik saluran pengelak untuk menghitung hidrolika saluran pengelak.

3.3. Langkah Pengolahan Data

Untuk memperlancar langkah-langkah perhitungan dalam studi ini maka diperlukan tahapan-tahapan sebagai berikut :

1. Data *Inflow*

Data *Inflow* disini digunakan untuk penentuan tinggi diameter pengelak yang mana diperlukan tinggi muka air

Debit Banjir pada pembangunan terowongan pengelak biasanya dengan kemungkinan periode perulangan 10 sampai 20 tahun dapat digunakan sebagai debit banjir rencana. Dan apabila data tersebut tidak ada maka dapat melakukan survey lapangan yang mana dapat dilihat dari tanda banjir pada sungai atau menggunakan data curah hujan. Untuk pengerjaan kali ini saya menggunakan 25 tahun

2. Data Topografi

Bertujuan untuk mengetahui letak lokasi bangunan terowongan pengelak dalam desain konstruksi.

3. Analisa Hidrolika

Analisa Hidrolika sendiri bertujuan untuk perhitungan dimensi-dimensi pada terowongan pengelak. Kondisi aliran di dalam terowongan pengelak selalu berubah-berubah tergantung pada berbagai faktor seperti:

1. Debit yang melintasi terowongan.
2. Dimensi serta formasi terowongan.
3. Elevasi permukaan air di hulu dan di hilir bendungan di hilir pengelak.

4. Desain Terowongan Pengelak

Pada desain terowongan pengelak yang dimaksudkan adalah penentuan tebal dari terowongan agar stabil terhadap berbagai gaya yang terdapat pada luar atau dalam terowongan.

5. Pembebanan terowongan

Pada pembebanan terowongan, disini menggunakan beberapa kondisi pembebanan sesuai yang sudah tercantum di teori bab 2

6. Perhitungan Penulangan dan pembetonan

Digunakan untuk mengetahui:

- a. Kekuatan beton dan baja untuk perencanaan terowongan berbentuk lingkaran
- b. Berapa banyak tulangan yang diperlukan untuk pembangunan terowongan berbentuk lingkaran.

7. *Treatment* Terowongan

Didaerah lokasi pembangunan terowongan ini terdapat jenis batuan kuarsit. Maka dari itu untuk membangun terowongan perlu melakukan peledakan (*blasting*). Untuk batuan kuarsit sendiri saat diledakkan akan menimbulkan *overbreak*, untuk itu perlu dilakukan *grouting* agar dapat menutup rongga yang berlebih dari hasil peledakan perlu dilakukan *consolidation grouting* untuk menutup retakan yang terjadi di batuan diluar terowongan.

3.4. Data Waduk dan Hidrologi Bendungan Lubuk Ambacang

Data kapasitas waduk dan elevasi muka air waduk telah dihitung oleh PT. Indra Karya dengan hasil sebagai berikut :

a. Elevasi Muka Air Waduk

Muka air normal = + 125,00 m

Muka air banjir = + 130,00 m

Muka air minimal = + 113,50 m

b. Volume Waduk

Volume mati = 529.900.000 m³

Volume efektif = 1.469.133.000 m³

Total tampungan = 1.999.033.000 m³

Perhitungan hidrologi untuk debit banjir rancangan DAS Indragiri telah dihitung oleh PT.

Indra Karya dengan hasil perhitungan sebagai berikut :

Inflow Q_{2th} : 2605,80 m³/detik

Inflow Q_{5th} : 3891,50 m³/detik

Inflow Q_{10th} : 4742,80 m³/detik

Inflow Q_{20th} : 5558,80 m³/detik

Inflow Q_{25th} : 5817,60 m³/detik

Inflow Q_{50th} : 6614,90 m³/detik

Inflow Q_{100th} : 7407,80 m³/detik

Inflow Q_{1000th} : 10049,20 m³/detik

Inflow Q_{PMFth} : 19522,80 m³/detik

3.5. Data Mekanika Tanah

Dari hasil pengamatan tanah yang dilakukan oleh PT. Indra Karya didapat data mekanika tanah seperti pada Tabel 3.1 dibawah ini :

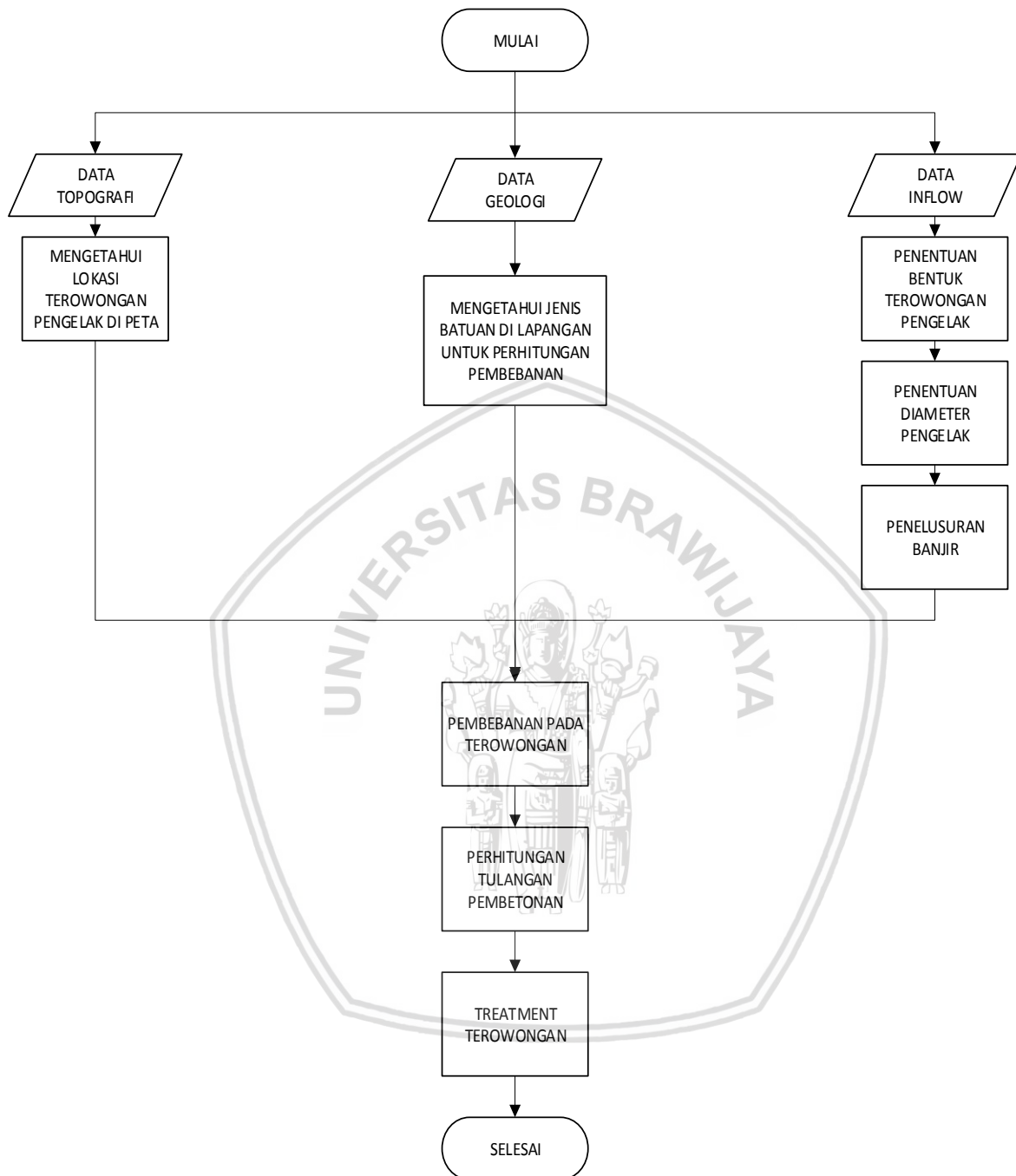
Tabel 3.1.

Hasil Pengujian Laboratorium Batuan Pondasi Rencana Tapak Bendungan Ambacang

HOLE No		BA 15 - 4			BA 15 - 5		BA 15 - 6	
DEPTH (m)		3.50 - 4.00	36.80 - 38.20	48.00 - 49.30	3.20 - 34.15	43.10 - 48.60	18.20 - 21.00	24.30 - 25.00
LITHOLOGI		Colluvial Deposit	Quartzite	Quartzite	Alternation Quartzite - Shale	Quartzite	Shale	Shale
PROPERTIES	Natural Water Content (%)	23.85	1.02	0.95	1.37	1.98	2.45	1.71
	Specific gravity of soil G_s	2.648						
	Wet density γ_{wet} (g/cm ³)	1.852	2.478	2.477	2.464	2.528	2.463	2.488
	Dry density γ_d (g/cm ³)	1.495	2.453	2.454	2.431	2.479	2.404	2.447
	Void ratio e	0.771	0.068	0.055	0.052	0.105	0.157	0.102
	Saturated density γ_{sat} (g/cm ³)	1.931	2.517	2.507	2.480	2.574	2.540	2.539
	Submerged density γ_{sub} (g/cm ³)	0.931	1.517	1.507	1.480	1.574	1.540	1.539
	Degree of Saturation S_{ro} %	81.91	39.28	44.38	67.31	51.83	43.39	44.93
SPECIFIC GRAVITY OF ROCK	Bulk dry Basis	-	2.518	2.493	2.479	2.548	2.479	2.477
	Saturated Surface Dry Condition	-	2.557	2.531	2.510	2.617	2.588	2.559
	Apparent	-	2.620	2.590	2.557	2.739	2.783	2.697
	Absorption %	-	1.55	1.50	1.24	2.74	4.40	3.29
UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH	Compressive Strength q_u kg/cm ²	2.06	397.37	439.90	112.28	510.87	152.02	155.19
	MODULUS ELASTICITY	Axial E_a kg/cm ²	1.215E+02	2.170E+04	3.004E+04	1.091E+04	1.876E+04	1.383E+04
		Diametral E_d kg/cm ²	5.141E+02	5.057E+04	6.843E+04	3.131E+04	4.210E+04	3.499E+04
	Poisson's Ratio μ	0.236	0.429	0.439	0.348	0.446	0.395	0.387
TRIAXIAL UU	Cohesion C kg/cm ²	0.544	24.136	27.306	8.993	28.920	14.292	14.088
	Internal friction angle ϕ°	18 ° 38 '	43 ° 20 '	45 ° 43 '	38 ° 48 '	48 ° 24 '	38 ° 42 '	39 ° 20 '
ULTRASONIC VELOCITY	Poisson Ratio	-	0.394	0.409	0.353	0.394	0.333	0.333
	Young Modulus Elasticity E kg/cm ²	-	4.40E+05	3.85E+05	5.00E+05	2.75E+05	4.27E+05	4.30E+05
	Modulus Rigidity or Shear Modulus kg/cm ²	-	1.58E+05	1.37E+05	1.85E+05	9.85E+04	1.60E+05	1.61E+05

Sumber : PT Indra Karya

3.6. Diagram Alir Penyelesaian Studi



Gambar 3.2 Diagram Alir Penyelesaian Studi

Sumber: Perhitungan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Perencanaan

Data perencanaan yang ada di proyek terowongan pengelak Bendungan Lubuk Ambacang :
Data Teknis

Tipe Terowongan	: Lingkaran
Debit banjir (Q_5)	: 3891,50 m ³ /detik
Debit banjir (Q_{10})	: 4742,80 m ³ /detik
Elevasi dasar Hulu	: +53
Elevasi dasar Hilir	: +52
Panjang Terowongan 1	: 419,638 m
Panjang Terowongan 2	: 430,110 m

Terowongan ini direncanakan pada tiga kondisi pengaliran, yaitu kondisi aliran tertekan, kondisi aliran transisi, dan kondisi aliran bebas.

4.2. Penentuan Dimensi Terowongan

Terowongan direncanakan berpenampang lingkaran dari inlet sampai outlet. Menurut perencanaan awal didapatkan tinggi terowongan 10 m dan lebar 10 m dengan bentuk terowongan tapal kuda, dan untuk membedakan dengan perencanaan awal maka dibuat terowongan berbentuk lingkaran dengan diameter 9 m untuk 1 terowongan.

4.3. Perhitungan Penelusuran Banjir

Untuk mengetahui karakter aliran dalam terowongan maka harus diketahui tinggi permukaan air dibagian pemasukan. Elevasi dasar pemasukan sebesar +53. Debit yang mengalir kedalam terowongan tergantung pada ketinggian air di depan lubang pemasukkan.

4.3.1. Aliran Bebas

Pada kontrol ini terowongan belum terisi penuh. Debit yang mengalir ke dalam terowongan tergantung dari muka air dibagian pemasukkan, untuk mencari debit pada waktu aliran bebas dicari debit terbesar yaitu pada saat terisi penuh $h = 9$ m. Dengan langkah-langkah perhitungan sebagai berikut (menurut materi kuliah KB1):

Perhitungan pengaliran bebas $h < 1,2 d$

1. Menghitung sudut (θ)

$$\begin{aligned}\theta &= \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right) \cdot (180/\pi) \\ &= \arccos\left(\frac{4.5-0.5}{4}\right) \cdot (180/3.14) \\ &= 27.266\end{aligned}$$

2. Menghitung luas persamaan A

$$\begin{aligned}A &= (\theta \cdot \pi r^2)/180 - r^2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ &= (27.266 \cdot 3.14 \cdot 4.5^2)/180 - 4^2 \cdot \sin 27.266 \cdot \cos 27.266 \\ &= 1.386 \text{ m}^2\end{aligned}$$

3. Menghitung keliling basah (P)

$$\begin{aligned}P &= (2\theta/360) \cdot 2\pi r \\ &= (2 \cdot 27.266/360) \cdot 2\pi 4 \\ &= 4.281 \text{ m}\end{aligned}$$

4. Menghitung jari-jari hidrolis (R)

$$\begin{aligned}R &= A/P \\ &= 1.386/4.241 \\ &= 0.324 \text{ m}\end{aligned}$$

5. Menghitung B terowongan pengelak

$$\begin{aligned}B &= 2 \cdot r \cdot \sin \theta \\ &= 2 \cdot 0.324 \cdot \sin 27.266 \\ &= 0.297 \text{ m}\end{aligned}$$

6. Menghitung kecepatan (V)

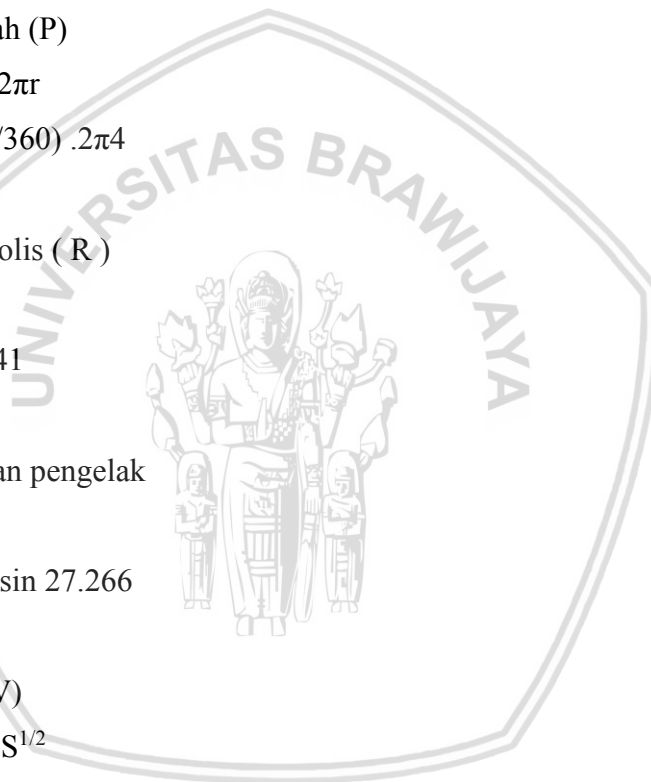
$$\begin{aligned}V &= 1/n \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \\ &= 1/0.014 \cdot 0.324^{2/3} \cdot 0.002383^{1/2} \\ &= 1.644 \text{ m/detik}\end{aligned}$$

7. Menghitung debit dengan persamaan

$$\begin{aligned}Q &= A \cdot V \\ &= 0.386 \cdot 1.644 \\ &= 2.277 \text{ m}^3/\text{detik}\end{aligned}$$

8. Menghitung debit kritis

$$\begin{aligned}Q_c &= \sqrt{(\pi \cdot A^3)/B} \\ &= \sqrt{(\pi \cdot 1.386^3)/0.297} \\ &= 9.380 \text{ m}^3/\text{detik}\end{aligned}$$



9. Menghitung nilai froude

$$\begin{aligned}
 F &= Q / Q_c \\
 &= 2.277 / 9.380 \\
 &= 0.243
 \end{aligned}$$

Perhitungan karakteristik aliran terowongan pada kondisi aliran bebas dapat dilihat pada Tabel 4.1. dan 4.2.

Tabel 4.1.

Kapasitas pengaliran saat kondisi aliran bebas $h < 1,2$ Terowongan Pengelak 1

El. MA	Tinggi MA	θ	A	P	R	B	v	Q	Q_c	F	
(m)	(m)	(°)	(m ²)	(m)	(m)	(m)	(m/detik)	(m ³ /detik)	(m ³ /detik)	Nilai	Keterangan
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
53.0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
53.5	0.5	27.266	1.386	4.281	0.324	0.297	1.644	2.277	9.380	0.243	subkritis
54.0	1.0	38.942	3.857	6.114	0.631	0.793	2.565	9.892	26.641	0.371	subkritis
54.5	1.5	48.190	6.961	7.566	0.920	1.371	3.298	22.959	49.115	0.467	subkritis
55.0	2.0	56.251	10.517	8.831	1.191	1.980	3.917	41.197	75.907	0.543	subkritis
55.5	2.5	63.612	14.409	9.987	1.443	2.585	4.452	64.148	106.551	0.602	subkritis
56.0	3.0	70.529	18.550	11.073	1.675	3.159	4.918	91.238	140.797	0.648	subkritis
56.5	3.5	77.160	22.869	12.114	1.888	3.681	5.326	121.805	178.534	0.682	subkritis
57.0	4.0	83.621	27.303	13.128	2.080	4.134	5.681	155.110	219.778	0.706	subkritis
57.5	4.5	90.000	31.793	14.130	2.250	4.500	5.987	190.348	264.676	0.719	subkritis
63.8	10.8	180.000	63.585	28.260	2.250	0.000	5.987	380.695	380.695	1.000	kritis

Sumber : Hasil Perhitungan

Tabel 4.2.

Kapasitas pengaliran saat kondisi aliran bebas $h < 1,2$ Terowongan Pengelak 2

El. MA	Tinggi MA	θ	A	P	R	B	v	Q	Q_c	F	
(m)	(m)	(°)	(m ²)	(m)	(m)	(m)	(m/detik)	(m ³ /detik)	(m ³ /detik)	Nilai	Keterangan
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
53.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
53.5	0.5	27.266	1.386	4.281	0.324	0.297	1.624	2.250	9.380	0.240	subkritis
54.0	1.0	38.942	3.857	6.114	0.631	0.793	2.533	9.771	26.641	0.367	subkritis
54.5	1.5	48.190	6.961	7.566	0.920	1.371	3.258	22.678	49.115	0.462	subkritis
55.0	2.0	56.251	10.517	8.831	1.191	1.980	3.869	40.693	75.907	0.536	subkritis
55.5	2.5	63.612	14.409	9.987	1.443	2.585	4.398	63.363	106.551	0.595	subkritis
56.0	3.0	70.529	18.550	11.073	1.675	3.159	4.858	90.121	140.797	0.640	subkritis
56.5	3.5	77.160	22.869	12.114	1.888	3.681	5.261	120.313	178.534	0.674	subkritis
57.0	4.0	83.621	27.303	13.128	2.080	4.134	5.612	153.211	219.778	0.697	subkritis
57.5	4.5	90.000	31.793	14.130	2.250	4.500	5.914	188.016	264.676	0.710	subkritis
63.8	10.8	180.000	63.585	28.260	2.250	0.000	5.914	376.032	376.032	1.000	kritis

Sumber: Hasil Perhitungan

4.3.2. Aliran Transisi

Pada kondisi ini terowongan menuju kedalam keadaan penuh, kondisi yang mana berada diantara aliran bebas dan aliran tertekan, Untuk mendapatkan debit transisi dapat dihitung menggunakan perhitungan sebagai berikut (menurut materi kuliah KB1):

1. Menghitung sudut (θ)

$$\begin{aligned}\theta &= \arctan h \cdot (360/\pi) \\ &= \arctan 11.8 \cdot (360/3.14) \\ &= 23.275\end{aligned}$$

2. Menghitung Luas Penampang (A)

$$\begin{aligned}A &= \pi \cdot (1/2 \cdot R)^2 \\ &= 3.14 \cdot (0.5 \cdot 4.5)^2 \\ &= 63.617 \text{ m}^2\end{aligned}$$

3. Menghitung Kecepatan (V)

$$V = \sqrt{\frac{(2 \cdot g \cdot (el \text{ muka air} - el \text{ hulu} - \left(\frac{D}{2}\right) + panjang \text{ saluran} \cdot \sin \theta))}{(1 + ci + cf + Co + Cb)}}$$

$$V = 39.063 \text{ m/detik}$$

4. Menghitung debit (Q)

$$\begin{aligned}Q &= V \cdot A \\ Q &= 39.063 \cdot 63.617 \\ Q &= 2485.050 \text{ m}^3/\text{detik}\end{aligned}$$

Perhitungan karakteristik terowongan pada kondisi aliran tertekan dapat dilihat pada

Tabel 4.3. dan 4.4 berikut:

Tabel 4.3.

Kapasitas pengaliran saat kondisi aliran transisi $h > 1,2$ Terowongan Pengelak 1

El. MA	Tinggi MA	θ	A	P	Ci	Cf	Co	Cb	V	Q
(m)	(m)	°	(m ²)	(m)	(rounded)	(Gesekan)	(Outlet)	(gesekan)	(m/detik)	(m ³ /detik)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
63.80	10.8	21.34	63.61	28.26	0.080	0.075	1.000	0.071	37.445	2382.124
64.30	11.3	22.31	63.61	28.26	0.080	0.075	1.000	0.071	38.266	2434.375
64.80	11.8	23.27	63.61	28.26	0.080	0.075	1.000	0.071	39.063	2485.050

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.4.

Kapasitas pengaliran saat kondisi aliran transisi $h > 1,2$ Terowongan Pengelak 2

El. MA	Tinggi MA	θ	A	P	Ci	Cf	Co	Cb	V	Q
(m)	(m)	°	(m ²)	(m)	(rounded)	(Gesekan)	(Outlet)	(gesekan)	(m ² /detik)	(m ³ /detik)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
63.80	10.80	21.34	63.61	28.26	0.080	0.075	1.000	0.067	37.478	2384.267
64.30	11.30	22.31	63.61	28.26	0.080	0.075	1.000	0.067	38.300	2436.565
64.80	11.80	23.27	63.61	28.26	0.080	0.075	1.000	0.067	39.098	2487.286

Sumber: Hasil Perhitungan

4.3.3. Aliran Tertekan (Pressure Flow)

Pada kondisi ini terowongan terisi penuh, debit yang masuk tergantung dari tinggi muka air yang dibagian pemasukan, untuk mencari debit pada waktu aliran tertekan dicari debit terbesar yaitu pada saat h setinggi bangunan pengambilan yaitu pada saat El. +80 m setelah perubahan dimensi. Dengan langkah-langkah perhitungan sebagai berikut (menurut materi kuliah KB1):

1. Menghitung sudut (θ)

$$\begin{aligned}\theta &= \arctan h \cdot (360/\pi) \\ &= \arctan 13.5 \cdot (360/3.14) \\ &= 26.516\end{aligned}$$

2. Menghitung Luas Penampang (A)

$$\begin{aligned}A &= \pi \cdot (1/2 \cdot R)^2 \\ &= 3.14 \cdot (0.5 \cdot 4.5)^2 \\ &= 63.617 \text{ m}^2\end{aligned}$$

3. Menghitung Kecepatan (V)

$$V = \sqrt{\frac{(2 \cdot g \cdot (el \text{ muka air} - el \text{ hulu} - \left(\frac{D}{2}\right) + panjang \text{ saluran} \cdot \sin \theta))}{(1 + ci + cf + Co + Cb)}}$$

$$V = 41.601 \text{ m/detik}$$

4. Menghitung debit (Q)

$$Q = V \cdot A$$

$$Q = 41.601 \cdot 63.617$$

$$Q = 2646.567 \text{ m}^3/\text{detik}$$

5. Jumlah koefisien kehilangan energi

$$\sum C = Ci + Co + Cf + Cb$$

Dengan :

Ci = koefisien kehilangan energi pada inlet

C_o = koefisien kehilangan energi pada outlet (1)

C_f = koefisien kehilangan energi akibat adanya gesekan

$$= (8.g/(\sqrt{R^{1/6}/n} \cdot)) \cdot L/R$$

$$= 0.075$$

C_b = koefisien kehilangan energi akibat belokan

Perhitungan karakteristik terowongan pada kondisi aliran tertekan dapat dilihat pada Tabel 4.5. dan 4.6 berikut

Tabel 4.5.

Kapasitas pengaliran saat kondisi aliran tertekan $h > 1,5$ Terowongan Pengelak 1

El. MA	Tinggi MA	θ	A	R	C_i	C_f	C_o	C_b	v	Q
(m)	(m)	(°)	(m ²)	(m)	(rounded)	(gesekan)	(outlet)	(belokan)	(m/detik)	(m ³ /detik)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
66.5	13.5	26.516	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	41.601	2646.562
67.5	14.5	28.404	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	42.984	2734.497
68.5	15.5	30.275	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	44.291	2817.697
69.5	16.5	32.131	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	45.530	2896.494
70.5	17.5	33.969	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	46.704	2971.175
71.5	18.5	35.789	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	47.817	3041.988
72.5	19.5	37.591	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	48.873	3109.155
73.5	20.5	39.374	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	49.874	3172.872
74.5	21.5	41.137	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	50.825	3233.316
75.5	22.5	42.880	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	51.726	3290.648
76.5	23.5	44.602	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	52.580	3345.019
77.5	24.5	46.304	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	53.391	3396.565
78.5	25.5	47.984	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	54.158	3445.414
79.5	26.5	49.642	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	54.886	3491.688
80.5	27.5	51.279	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	55.575	3535.499
81.5	28.5	52.893	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	56.226	3576.954
82.5	29.5	54.485	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	56.842	3616.157
83.5	30.5	56.055	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	57.425	3653.203
84.5	31.5	57.602	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	57.975	3688.187
85.5	32.5	59.127	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	58.494	3721.196
86.5	33.5	60.628	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	58.983	3752.317
87.5	34.5	62.108	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	59.443	3781.631
88.5	35.5	63.564	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	59.877	3809.217
89.5	36.5	64.998	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	60.285	3835.150
90.5	37.5	66.409	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	60.668	3859.505
91.5	38.5	67.798	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	61.027	3882.350

Lanjutan Tabel 4.5.

Kapasitas pengaliran saat kondisi aliran tertekan $h > 1,5$ Terowongan Pengelak 1

EL. MA	Tinggi MA	θ	A	R	Ci	Cf	Co	Cb	v	Q
(m)	(m)	(°)	(m ²)	(m)	(rounded)	(gesekan)	(outlet)	(belokan)	(m/detik)	(m ³ /detik)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
92.5	39.5	69.165	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	61.363	3903.753
93.5	40.5	70.510	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	61.678	3923.780
94.5	41.5	71.833	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	61.972	3942.493
95.5	42.5	73.133	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	62.247	3959.953
96.5	43.5	74.413	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	62.502	3976.218
97.5	44.5	75.671	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	62.740	3991.343
98.5	45.5	76.908	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	62.961	4005.383
99.5	46.5	78.124	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	63.165	4018.389
100.5	47.5	79.320	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	63.354	4030.411
101.5	48.5	80.495	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.071	63.528	4041.496

Sumber : Hasil Perhitungan

Tabel 4.6.

Kapasitas pengaliran saat kondisi aliran tertekan $h > 1,5$ Terowongan Pengelak 2

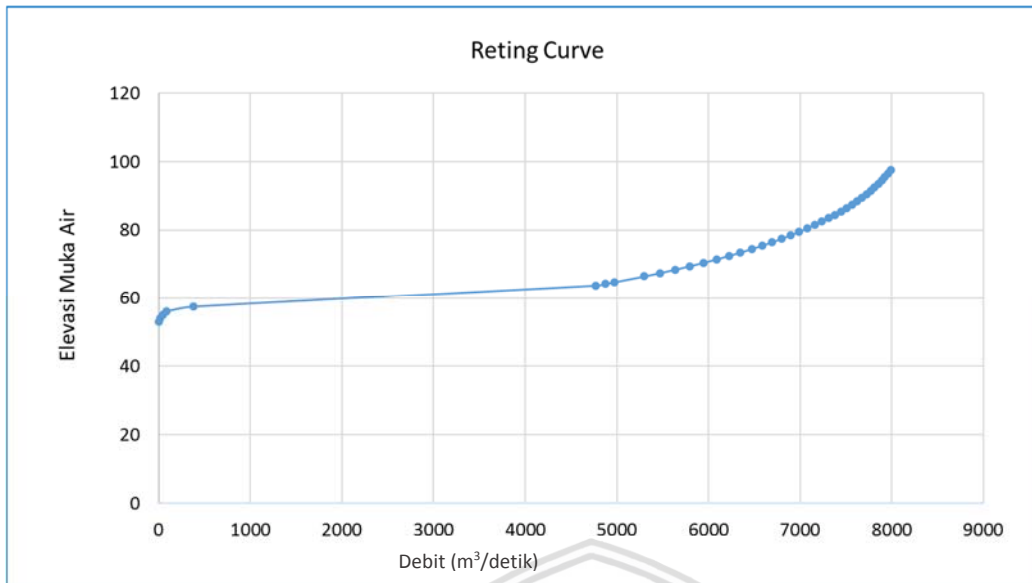
EL. MA	Tinggi MA	θ	A	R	Ci	Cf	Co	Cb	v	Q
(m)	(m)	(°)	(m ²)	(m)	(rounded)	(gesekan)	(outlet)	(belokan)	(m/detik)	(m ³ /detik)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
66.5	13.5	26.516	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	41.639	2648.943
67.5	14.5	28.404	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	43.022	2736.958
68.5	15.5	30.275	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	44.331	2820.232
69.5	16.5	32.131	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	45.571	2899.100
70.5	17.5	33.969	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	46.746	2973.848
71.5	18.5	35.789	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	47.860	3044.725
72.5	19.5	37.591	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	48.917	3111.952
73.5	20.5	39.374	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	49.919	3175.726
74.5	21.5	41.137	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	50.870	3236.225
75.5	22.5	42.880	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	51.772	3293.609
76.5	23.5	44.602	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	52.628	3348.029
77.5	24.5	46.304	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	53.439	3399.621
78.5	25.5	47.984	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	54.207	3448.514
79.5	26.5	49.642	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	54.935	3494.829
80.5	27.5	51.279	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	55.625	3538.680
81.5	28.5	52.893	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	56.277	3580.173
82.5	29.5	54.485	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	56.894	3619.410

Lanjutan Tabel 4.6.

Kapasitas pengaliran saat kondisi aliran tertekan $h > 1,5$ Terowongan Pengelak 2

El. MA	Tinggi MA	θ	A	R	Ci	Cf	Co	Cb	v	Q
(m)	(m)	(°)	(m ²)	(m)	(rounded)	(gesekan)	(outlet)	(belokan)	(m/detik)	(m ³ /detik)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
83.5	30.5	56.055	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	57.476	3656.490
84.5	31.5	57.602	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	58.027	3691.505
85.5	32.5	59.127	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	58.546	3724.544
86.5	33.5	60.628	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	59.036	3755.693
87.5	34.5	62.108	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	59.497	3785.033
88.5	35.5	63.564	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	59.931	3812.644
89.5	36.5	64.998	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	60.339	3838.601
90.5	37.5	66.409	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	60.722	3862.977
91.5	38.5	67.798	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	61.082	3885.843
92.5	39.5	69.165	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	61.418	3907.265
93.5	40.5	70.510	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	61.733	3927.310
94.5	41.5	71.833	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	62.028	3946.041
95.5	42.5	73.133	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	62.303	3963.516
96.5	43.5	74.413	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	62.558	3979.796
97.5	44.5	75.671	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	62.796	3994.934
98.5	45.5	76.908	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	63.017	4008.987
99.5	46.5	78.124	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	63.222	4022.004
100.5	47.5	79.320	63.617	28.274	0.080	0.075	1.000	0.067	63.411	4034.037
101.5	48.5	80.495	63.617	28.274	0.080	0.075	2.000	0.067	52.804	3359.233

Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 4.1. Hubungan H dan Q Diameter Terowongan Pengelak
Sumber : Hasil Perhitungan

Tabel 4.7.
Hubungan antara H, Q, Psi dan Phi Terowongan Pengelak

Elevasi	H	S (tampungan)	S/Δt	Q	Q/2	Psi	Phi
						$y = S/\Delta t - Q/2$	$\phi = S/\Delta t + Q/2$
(m)	(m)	(juta m³)	(m³/detik)	(m³/detik)	(m³/detik)	(m³/detik)	(m³/detik)
(1)	(2)	(3)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
53.0	0	28000	7.778	0	0	7.778	7.778
54.0	1	40000	11.111	19.66299086	9.831	1.280	20.943
55.0	2	58000	16.111	45.63685308	22.818	-6.707	38.930
56.0	3	93000	25.833	81.88992642	40.945	-15.112	66.778
57.5	4.5	151000	41.944	378.3638568	189.182	-147.237	231.126
63.8	10.8	234000	65.000	4766.391706	2383.196	-2318.196	2448.196
64.3	11.3	353000	98.056	4870.940401	2435.470	-2337.415	2533.526
64.8	11.8	542000	150.556	4972.33582	2486.168	-2335.612	2636.723
66.5	13.5	835000	231.944	5295.504556	2647.752	-2415.808	2879.697
67.5	14.5	1251000	347.500	5471.454868	2735.727	-2388.227	3083.227
68.5	15.5	1774000	492.778	5637.929332	2818.965	-2326.187	3311.742
69.5	16.5	2359000	655.278	5795.594386	2897.797	-2242.519	3553.075
70.5	17.5	3021000	839.167	5945.022768	2972.511	-2133.345	3811.678

Sumber : Hasil Perhitungan

Tabel 4.8.
Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak

T	Inflow	$(I_1+I_2)/2$	ψ_1	φ_2	Outflow	h	Elevasi
	(I)				(Q)		
(jam)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m)	(m)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
0	189.000				189.000	0.000	53.000
3	201.000	195.000	-62.846	132.154	199.824	3.597	56.597
6	229.200	215.100	-67.670	147.430	227.381	3.736	56.736
9	269.700	249.450	-79.951	169.499	267.192	3.938	56.938
12	317.700	293.700	-97.693	196.007	315.011	4.179	57.179
15	373.100	345.400	-119.004	226.396	369.831	4.457	57.457
18	436.000	404.550	-143.435	261.115	437.718	4.585	57.585
21	505.300	470.650	-176.603	294.047	502.897	4.679	57.679
24	579.400	542.350	-208.850	333.500	580.982	4.791	57.791
27	656.800	618.100	-247.482	370.618	654.446	4.896	57.896
30	736.400	696.600	-283.828	412.772	737.878	5.016	58.016
33	832.300	784.350	-325.105	459.245	829.856	5.148	58.148
36	949.400	890.850	-370.611	520.239	950.575	5.322	58.322
39	1081.900	1015.650	-430.337	585.313	1079.371	5.506	58.506
42	1223.600	1152.750	-494.058	658.692	1224.603	5.715	58.715
45	1388.300	1305.950	-565.911	740.039	1385.605	5.946	58.946
48	1690.800	1539.550	-645.566	893.984	1690.293	6.384	59.384
51	2230.300	1960.550	-796.309	1164.241	2225.186	7.152	60.152
54	2728.000	2479.150	-1060.945	1418.205	2727.832	7.873	60.873
57	3120.800	2924.400	-1309.627	1614.773	3116.880	8.432	61.432
60	3429.700	3275.250	-1502.107	1773.143	3430.326	8.882	61.882
63	3699.600	3564.650	-1657.183	1907.467	3696.180	9.263	62.263
66	3947.400	3823.500	-1788.713	2034.787	3948.172	9.625	62.625
69	4155.300	4051.350	-1913.385	2137.965	4152.382	9.918	62.918
72	4317.300	4236.300	-2014.417	2221.883	4318.472	10.157	63.157
75	4443.000	4380.150	-2096.590	2283.560	4440.545	10.332	63.332
78	4542.500	4492.750	-2156.984	2335.766	4543.869	10.481	63.481
81	4620.100	4581.300	-2208.104	2373.196	4617.952	10.587	63.587
84	4678.000	4649.050	-2244.756	2404.294	4679.501	10.675	63.675
87	4716.200	4697.100	-2275.207	2421.893	4714.333	10.725	63.725
90	4736.700	4726.450	-2292.440	2434.010	4738.315	10.760	63.760
93	4742.800	4739.750	-2304.305	2435.445	4741.155	10.764	63.764
96	4737.100	4739.950	-2305.710	2434.240	4738.770	10.760	63.760
99	4709.600	4723.350	-2304.530	2418.820	4708.251	10.717	63.717
102	4657.500	4683.550	-2289.431	2394.119	4659.363	10.646	63.646
105	4586.300	4621.900	-2265.244	2356.656	4585.216	10.540	63.540
108	4501.800	4544.050	-2228.560	2315.490	4503.740	10.423	63.423
111	4407.500	4454.650	-2188.250	2266.400	4406.581	10.283	63.283
114	4305.200	4356.350	-2140.181	2216.169	4307.164	10.141	63.141
117	4196.400	4250.800	-2090.995	2159.805	4195.608	9.981	62.981
120	4082.900	4139.650	-2035.803	2103.847	4084.855	9.822	62.822
123	3965.900	4024.400	-1981.009	2043.391	3965.202	9.650	62.650

Lanjutan Tabel 4.8.
Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak

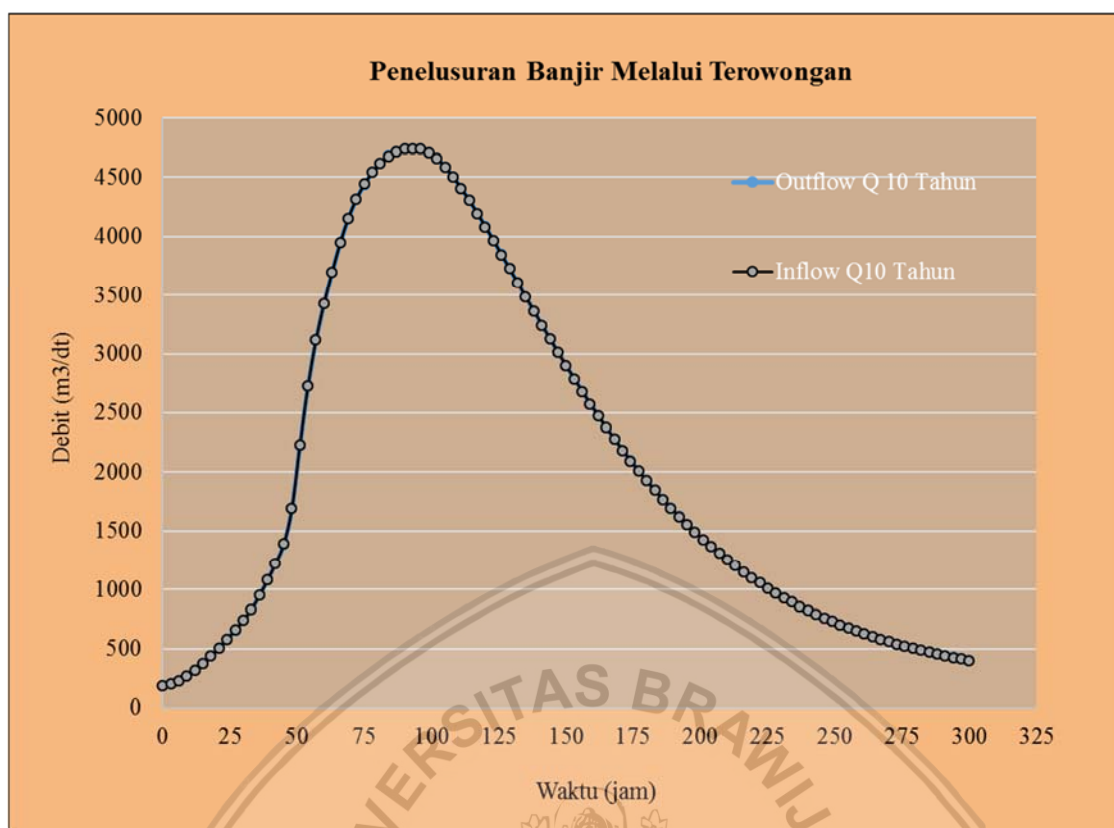
T	Inflow		ψ_1	ϕ_2	Outflow		Elevasi
	(I)	$(I_1+I_2)/2$			(Q)	h	
(jam)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m)	(m)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
126	3846.600	3906.250	-1921.811	1984.439	3848.524	9.482	62.482
129	3726.000	3786.300	-1864.085	1922.215	3725.370	9.305	62.305
132	3604.900	3665.450	-1803.155	1862.295	3606.776	9.135	62.135
135	3484.000	3544.450	-1744.481	1799.969	3483.420	8.958	61.958
138	3363.800	3423.900	-1683.451	1740.449	3365.618	8.789	61.789
141	3244.700	3304.250	-1625.169	1679.081	3244.158	8.614	61.614
144	3127.400	3186.050	-1565.077	1620.973	3129.150	8.449	61.449
147	3012.100	3069.750	-1508.177	1561.573	3011.585	8.281	61.281
150	2899.100	2955.600	-1450.013	1505.587	2900.779	8.121	61.121
153	2788.600	2843.850	-1395.192	1448.658	2788.105	7.960	60.960
156	2680.700	2734.650	-1339.447	1395.203	2682.307	7.808	60.808
159	2575.700	2628.200	-1287.104	1341.096	2575.219	7.654	60.654
162	2473.700	2524.700	-1234.122	1290.578	2475.232	7.511	60.511
165	2374.700	2424.200	-1184.654	1239.546	2374.229	7.366	60.366
168	2278.800	2326.750	-1134.683	1192.067	2280.258	7.231	60.231
171	2186.000	2232.400	-1088.192	1144.208	2185.537	7.095	60.095
174	2096.400	2141.200	-1041.329	1099.871	2097.785	6.969	59.969
177	2009.800	2053.100	-997.914	1055.186	2009.344	6.842	59.842
180	1926.500	1968.150	-954.158	1013.992	1927.812	6.725	59.725
183	1846.200	1886.350	-913.821	972.529	1845.750	6.607	59.607
186	1769.000	1807.600	-873.221	934.379	1770.244	6.498	59.498
189	1694.700	1731.850	-835.864	895.986	1694.255	6.389	59.389
192	1623.400	1659.050	-798.269	860.781	1624.577	6.289	59.289
195	1555.000	1589.200	-763.796	825.404	1554.559	6.189	59.189
198	1489.400	1522.200	-729.155	793.045	1490.514	6.097	59.097
201	1426.600	1458.000	-697.469	760.531	1426.162	6.004	59.004
204	1366.400	1396.500	-665.631	730.869	1367.455	5.920	58.920
207	1308.800	1337.600	-636.586	701.014	1308.366	5.835	58.835
210	1253.700	1281.250	-607.352	673.898	1254.698	5.758	58.758
213	1201.000	1227.350	-580.800	646.550	1200.571	5.680	58.680
216	1150.600	1175.800	-554.021	621.779	1151.545	5.610	58.610
219	1102.500	1126.550	-529.765	596.785	1102.075	5.539	58.539
222	1056.700	1079.600	-505.291	574.309	1057.592	5.475	58.475
225	1012.900	1034.800	-483.283	551.517	1012.482	5.410	58.410
228	971.100	992.000	-460.965	531.035	971.944	5.352	58.352
231	931.300	951.200	-440.909	510.291	930.887	5.293	58.293
234	893.400	912.350	-420.596	491.754	894.198	5.241	58.241
237	857.200	875.300	-402.444	472.856	856.795	5.187	58.187
240	822.800	840.000	-383.939	456.061	823.554	5.139	58.139
243	790.100	806.450	-367.494	438.956	789.701	5.091	58.091
246	758.900	774.500	-350.745	423.755	759.615	5.047	58.047

Lanjutan Tabel 4.8.
Penelusuran Banjir Terowongan Pengelak

T	Inflow	$(I_1+I_2)/2$	ψ_1	φ_2	Outflow	h	Elevasi
	(I)				(Q)		
(jam)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m ³ /det)	(m)	(m)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
249	729.200	744.050	-335.860	408.190	728.809	5.003	58.003
252	701.000	715.100	-320.619	394.481	701.676	4.964	57.964
255	674.200	687.600	-307.195	380.405	673.816	4.924	57.924
258	648.700	661.450	-293.411	368.039	649.341	4.889	57.889
261	624.500	636.600	-281.302	355.298	624.124	4.853	57.853
264	601.500	613.000	-268.826	344.174	602.107	4.821	57.821
267	579.600	590.550	-257.934	332.616	579.233	4.788	57.788
270	558.800	569.200	-246.617	322.583	559.375	4.760	57.760
273	539.100	548.950	-236.792	312.158	538.741	4.730	57.730
276	520.700	529.900	-226.584	303.316	521.242	4.705	57.705
279	502.700	511.700	-217.926	293.774	502.356	4.678	57.678
282	485.900	494.300	-208.582	285.718	486.412	4.655	57.655
285	469.900	477.900	-200.694	277.206	469.565	4.631	57.631
288	454.800	462.350	-192.359	269.991	455.285	4.610	57.610
291	440.400	447.600	-185.294	262.306	440.075	4.589	57.589
294	426.800	433.600	-177.769	255.831	427.259	4.570	57.570
297	413.900	420.350	-171.428	248.922	413.584	4.551	57.551
300	401.600	407.750	-164.663	243.087	402.037	4.534	57.534
			max		4741.155	10.764	63.7638

Sumber : Hasil Perhitungan

Setelah dihitung Penelusuran banjir maka didapatkan Inflow puncak sebesar 4737,8 m³/detik pada ketinggian 10.760 m.

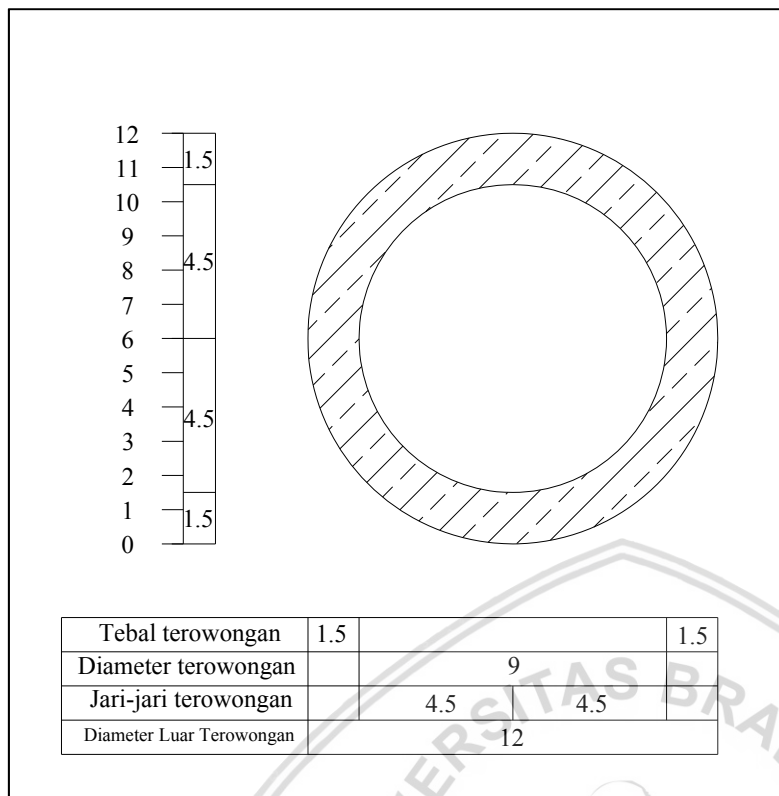


Gambar 4.2. Grafik Penelusuran banjir terowongan pengelak dengan diameter 9 m
Sumber : Hasil Perhitungan

a. Perhitungan Konstruksi

Bentuk lingkaran menjadi pilihan untuk studi perencanaan terowongan ini dengan pertimbangan sebagai berikut:

1. Sesuai dengan kondisi geologi yang memiliki batuan dasar keras, dikarenakan dari segi elastisitas terowongan lingkaran adalah yang terbaik.
 2. Terowongan lingkaran lebih bisa mendistribusikan beban secara merata
 3. Menggunakan *blasting* dalam pengerjaan terowongan, maka dari itu pemilihan terowongan berbentuk lingkaran sangat tepat karena dapat mempermudah pengerjaan.
- Detail potongan melintang terowongan bentuk lingkaran dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Potongan Melintang Alternatif Desain Lingkaran Terowongan

Sumber : Hasil Perhitungan

Keterangan gambar :

- r : Jari - jari lingkaran dalam terowongan 4.5 m
 R : Jari – jari lingkaran luar terowongan 6 m
 t : Tebal terowongan $r/3 = 1.5$ m
 B : Lebar bukaan terowongan 9 m
 Ht : Tinggi bukaan terowongan 9 m

4.4.1. Macam Pembebanan

Ada 9 beban yang dihitung sebagai batasan dalam perencanaan laporan skripsi ini yaitu:

1. Beban Batuan Vertikal

Beban akibat adanya batuan aktif yang bekerja secara vertikal diatas terowongan. Beban ini berpengaruh pada terowongan yang mana dapat dikatakan juga sebagai beban hidup.

2. Berat Sendiri

Beban dengan besar yang konstan dan berada pada posisi yang sama setiap saat. Pada perencanaan ini beban mati adalah berat terowongan itu sendiri.

3. Beban Air Vertikal

Beban akibat adanya Air Tanah yang bekerja secara vertikal diatas terowongan. Beban

ini berpengaruh pada terowongan yang mana dapat dikatakan juga sebagai beban hidup.

4. Tekanan *Grouting*

Tekanan *grouting* perlu diperhitungkan dalam perencanaan ini karena *grouting* punya tekanan sebesar 20 t/m yang mana dapat berpengaruh pada tubuh terowongan pengelak.

5. Tekanan Air Horizontal

Ada juga tekanan dari air tanah disekitar terowongan yang mana dalam perhitungan kali ini, tekanan air tanah termasuk tekanan yang bekerja secara horizontal diluar terowongan.

6. Tekanan Air Dalam Terowongan

Dalam hal ini tekanan air dari dalam sangat berpengaruh pada saat pengoperasian terowongan itu sendiri. Perlu diperhitungkan untuk menjaga agar terowongan tidak pecah dari dalam akibat tekanan air dari dalam.

7. Tekanan Batuan Horizontal (Normal)

Tekanan dari Batuan disekitar terowongan yang mana dalam perhitungan kali ini, Tekanan Batuan Horizontal termasuk tekanan yang bekerja secara horizontal diluar terowongan. Perlu diperhitungkan agar terowongan tetap dalam kondisi statis dan tidak bergerak kesamping kiri maupun kanan pada kondisi normal.

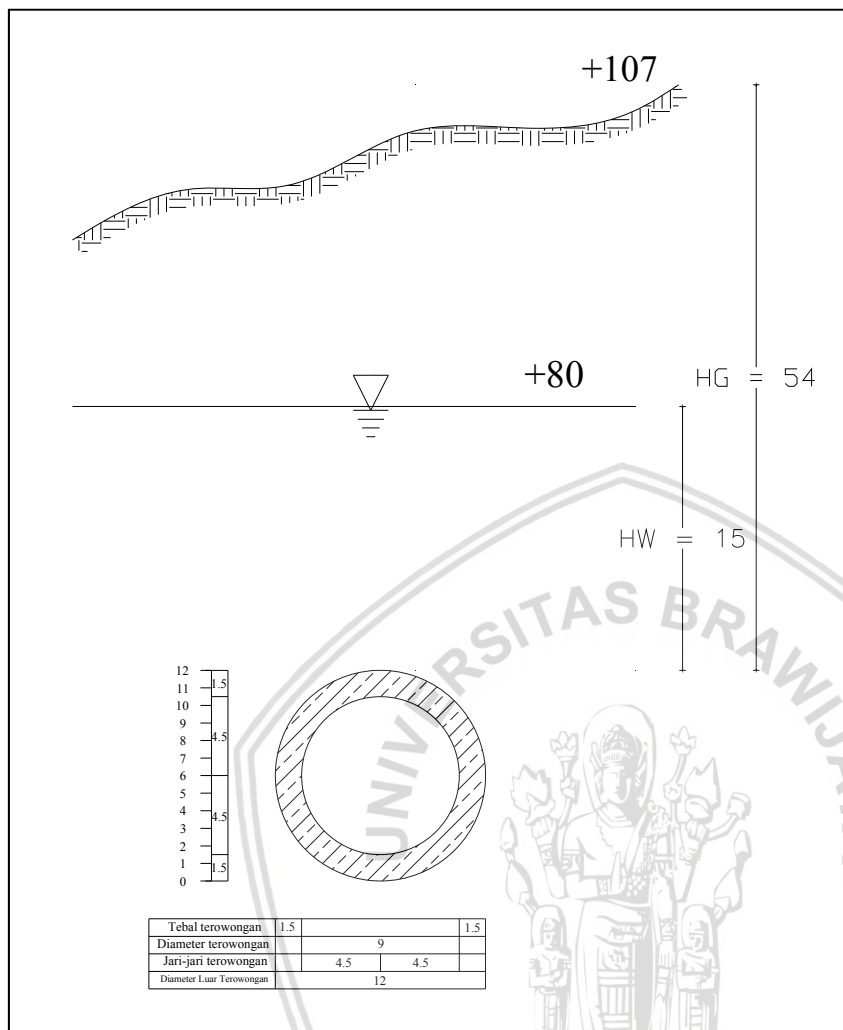
8. Tekanan Batuan Horizontal (Gempa)

Tekanan dari Batuan disekitar terowongan yang mana dalam perhitungan kali ini, Tekanan Batuan Horizontal termasuk tekanan yang bekerja secara horizontal diluar terowongan. Perlu diperhitungkan agar terowongan tetap dalam kondisi statis dan tidak bergerak kesamping kiri maupun kanan pada kondisi gempa.

9. Tekanan *Uplift*

Tekanan yang berasal dari bawah terowongan yang bekerja secara vertikal ke atas akibat tekanan dari air tanah. Perlu diperhitungkan agar terowongan tetap dalam kondisi statis dan tidak bergerak keatas.

4.4 Design Section



Gambar 4.4 Desain Section Terowongan Pengelak
Sumber : Hasil Perhitungan

4.4.2. Perhitungan Pembebanan

Beban yang bekerja pada terowongan :

a. Beban Batuan Vertikal

$$q_{bv} = \gamma_{kuarsit} \cdot h_p \cdot 1m$$

dimana:

$$\gamma_{kuarsit} = \text{Unit Weight of Rock (t/m}^3\text{)}$$

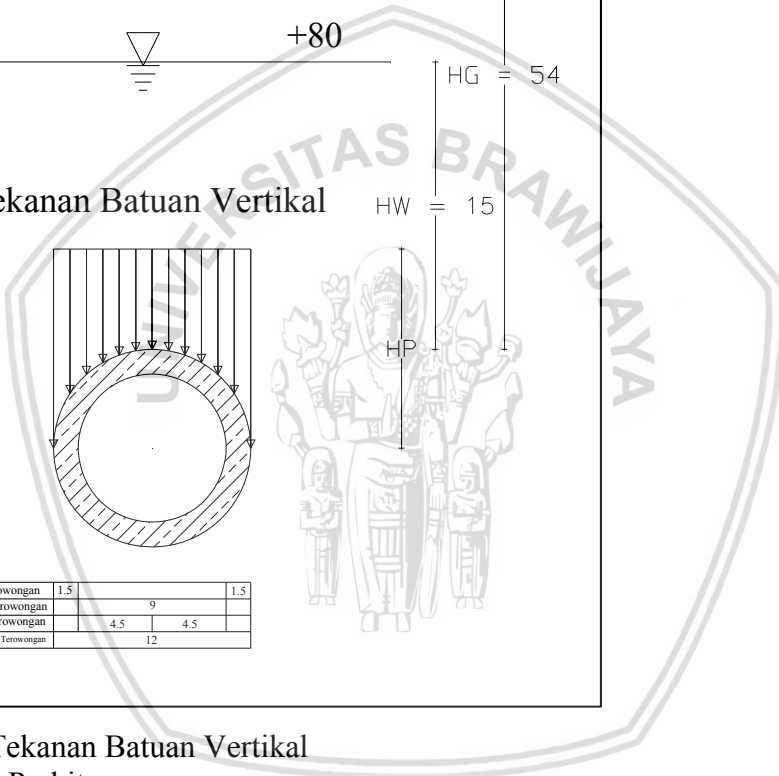
$$H_p = \text{Head Pressure (Very Blocky and Seamy)}$$

$$= 0.3 \cdot (B + H_t)$$

$$= 0.3 \cdot (12 + 12)$$

$$= 43.2 \text{ m}$$

$$B = \text{Lebar Terowongan (m)}$$

$$\begin{aligned} q_v &= \gamma_{\text{kuarsit}} \cdot H_p \cdot 1 \text{ m} \\ &= 2.8 \cdot 43.2 \cdot 1 \text{ m} \\ &= 120.96 \text{ t/m} \end{aligned}$$
**b. Berat Sendiri**

Dimana :

t = tebal terowongan (m)

c. Tekanan Air Vertikal

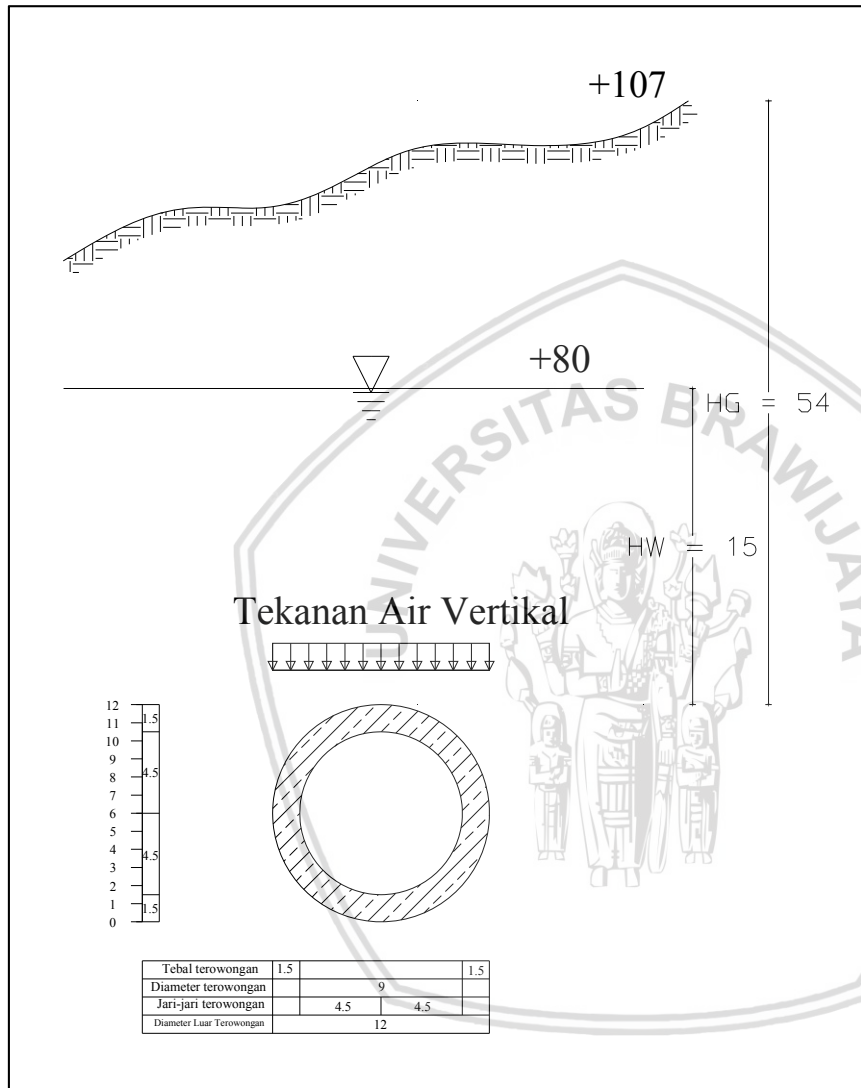
$$= 80 - 65$$

$$= 15 \text{ m}$$

$$q_{wv} = \gamma_w \cdot H \cdot 1\text{m}$$

$$= 1 \cdot 15 \cdot 1\text{m}$$

$$= 15 \text{ t/m}$$

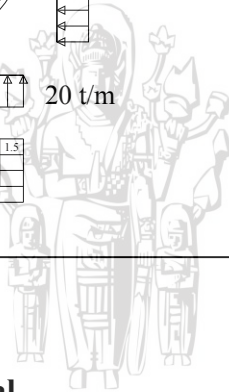


Gambar 4.6. Tekanan Air Vertikal

Sumber : Hasil Perhitungan

d. Tekanan Grouting

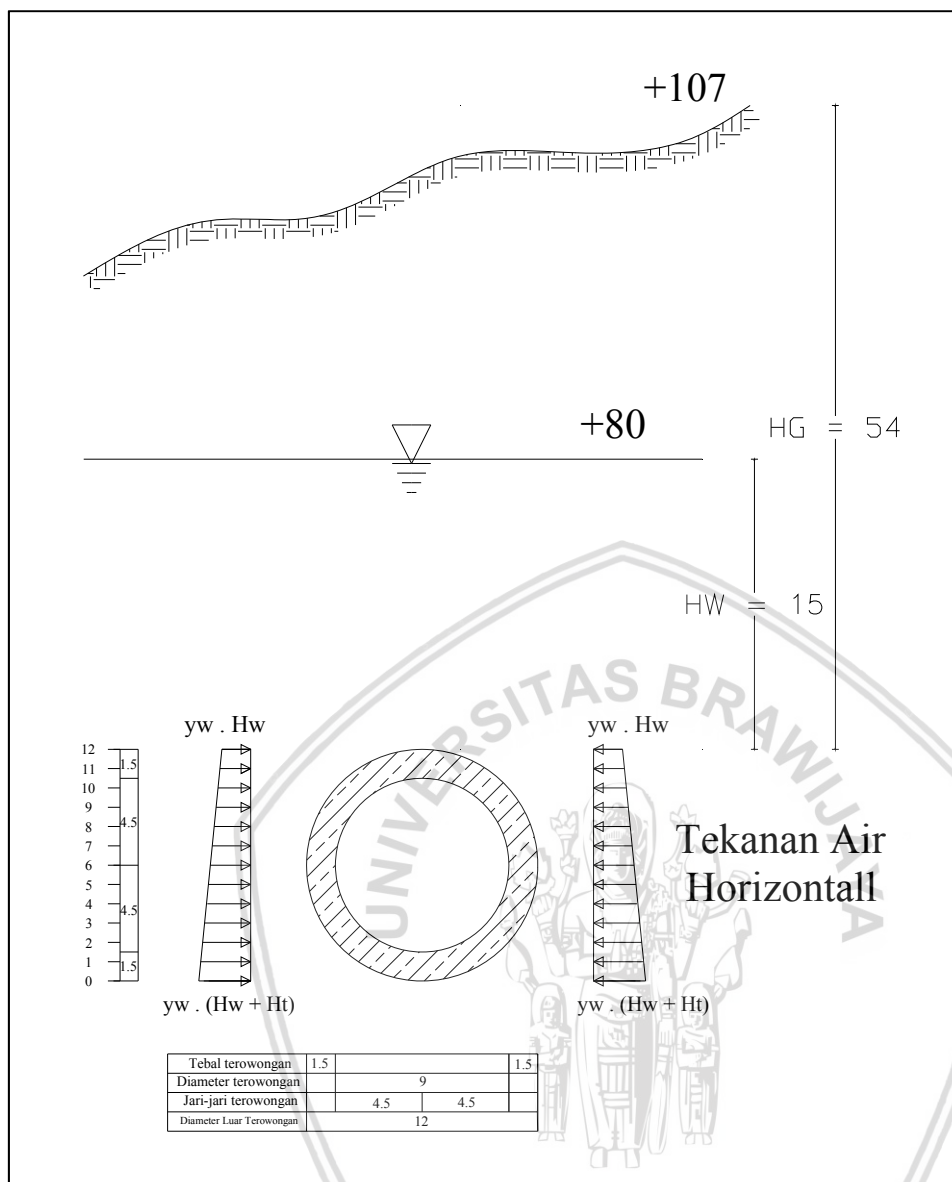
Low Pressure = 20 t/m (Anonim,2005)



e. Tekanan Air Tanah Horizontal

Hw = elevasi muka air tanah - elevasi puncak terowongan
= 80 - 65
= 15

$$\begin{aligned} P_{wh} &= \gamma_w \cdot H_w \cdot 1 \text{ m} \\ &= 1 \cdot 15 \cdot 1 \text{ m} \\ &= 15 \text{ t/m} \end{aligned}$$



Gambar 4.8. Tekanan Air Horizontal

Sumber : Hasil Perhitungan

f. Tekanan Air Dalam Terowongan

$$V \text{ per 1 meter} = A \cdot 1 \text{ m} \cdot 1000$$

$$= 63585 \text{ liter}$$

Berat air

$$1 \text{ liter} = 1 \text{ kg}$$

$$\text{Maka} = 1 \text{ liter} = 0.001 \text{ ton}$$

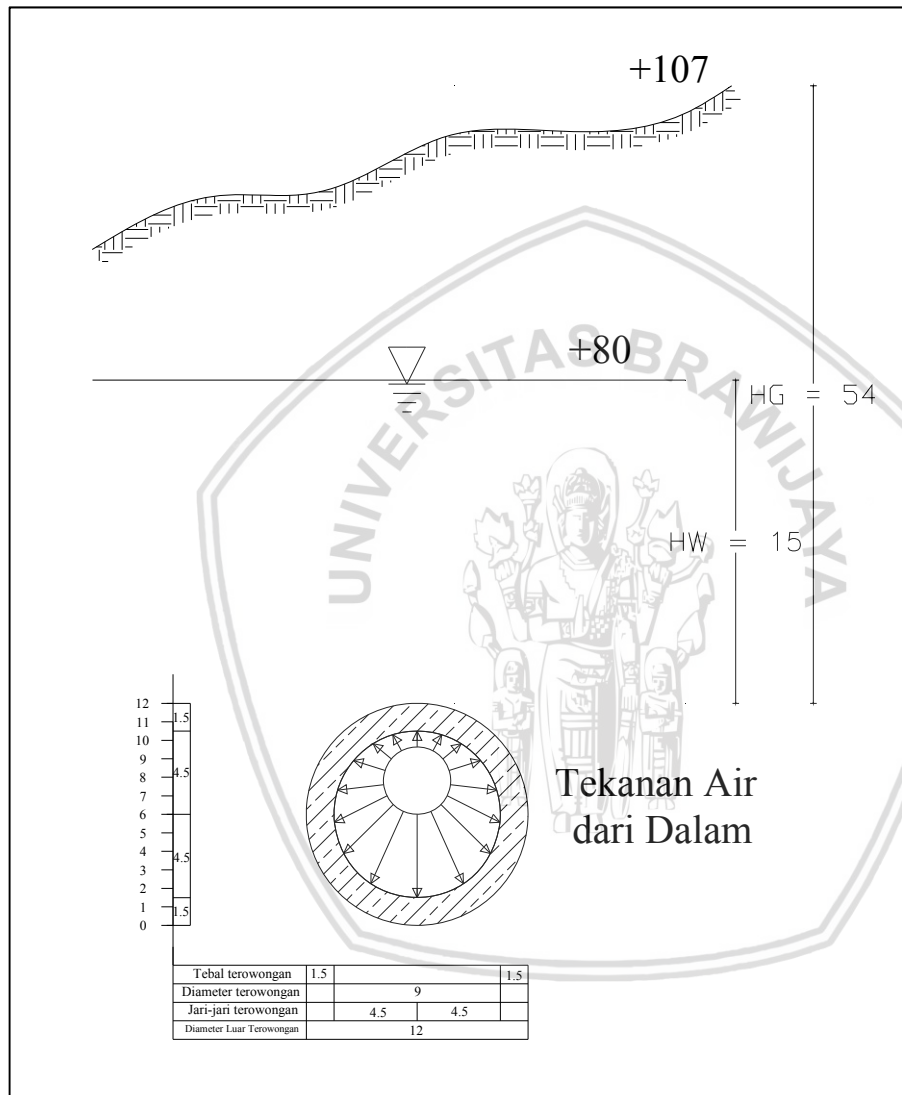
$$63585 \text{ liter} = 63585 \cdot 0.001$$

$$= 1.4 \text{ ton}$$

Tekanan air dari dalam

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

$$\begin{aligned} P &= 1000 \cdot 9.81 \cdot 10.8 \\ P &= 105948 \text{ pascal} \cdot 0.000145 \\ &= 15.362 \text{ psi} \\ 1 \text{ pon} &= 0.00045 \text{ ton} \\ 1 \text{ inch} &= 0.0006451 \text{ m}^2 \\ P &= 10.7 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$



Gambar 4.9. Tekanan Air Dalam Terowongan
Sumber : Hasil Perhitungan

Tabel 4.9
Perhitungan Tekanan Air dari Dalam Terowongan

Elevasi	Tinggi muka air	Sudut	Luas Terowongan	Volume air per 1 meter	Berat Air Kondisi Penuh	Tekanan Dalam
+	m	φ	m2	liter	t	t/m2
53.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
53.5	0.5	27.3	1.4	1385.5	1.4	0.5
54.0	1.0	38.9	3.9	3856.9	3.9	1.0
54.5	1.5	48.2	7.0	6960.7	7.0	1.5
55.0	2.0	56.3	10.5	10516.5	10.5	2.0
55.5	2.5	63.6	14.4	14408.8	14.4	2.5
56.0	3.0	70.5	18.6	18550.3	18.6	3.0
56.5	3.5	77.2	22.9	22869.4	22.9	3.5
57.0	4.0	83.6	27.3	27302.9	27.3	4.0
57.5	4.5	90.0	31.8	31792.5	31.8	4.5
63.8	10.8	180.0	63.6	63585.0	63.6	10.7

Sumber: Hasil Perhitungan

g. Tekanan Batuan Horizontal (Normal)

$$q_h = 0.5 \cdot (\gamma_{\text{kuarsit}} \cdot h_p \cdot 1\text{m})$$

dimana:

$$\gamma_{\text{kuarsit}} = \text{Unit Weight of Rock (t/m}^3\text{)}$$

$$H_p = \text{Head Pressure Very Blocky and Seamy}$$

$$= 0.3 \cdot (B + H_t)$$

$$= 0.3 \cdot (12 + 12)$$

$$= 43.2 \text{ m}$$

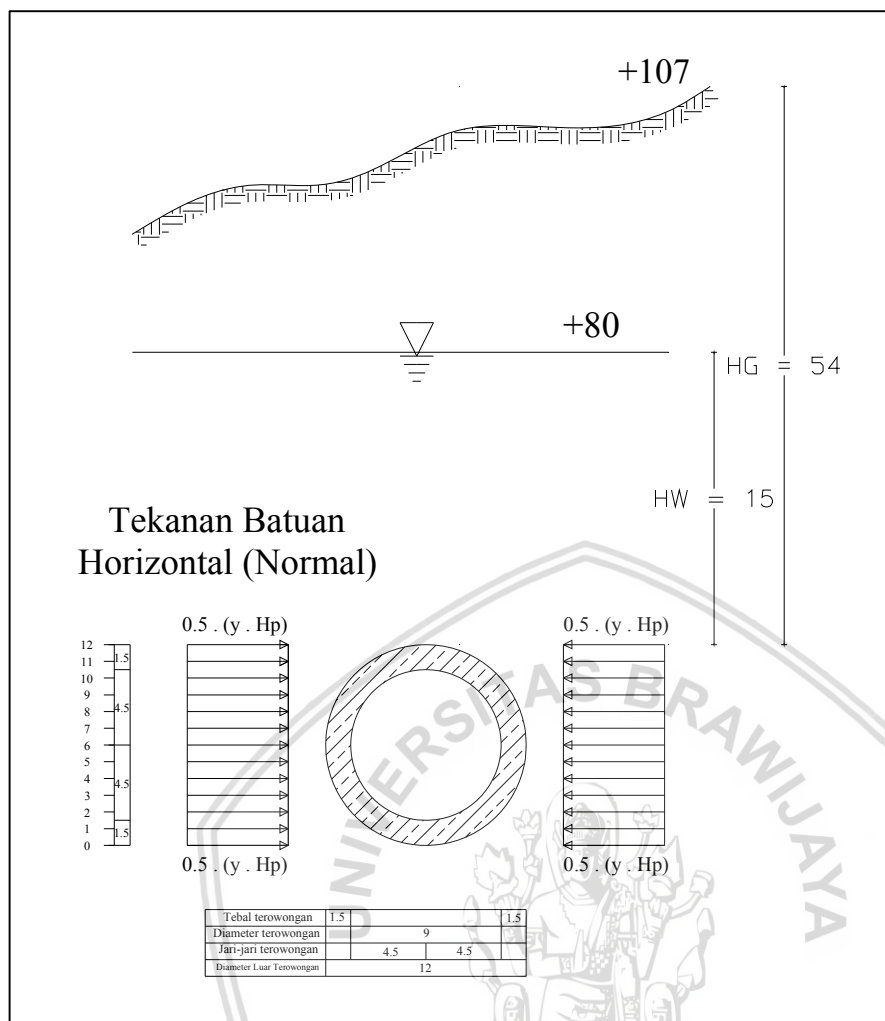
$$B = \text{Lebar Terowongan (m)}$$

$$H_t = \text{Tinggi Terowongan (m)}$$

$$q_h = 0.5 \cdot (\gamma_{\text{kuarsit}} \cdot H_p \cdot 1 \text{ m})$$

$$= 0.5 \cdot (2.8 \cdot 43.2 \cdot 1 \text{ m})$$

$$= 60.48 \text{ t/m}$$



Gambar 4.10. Tekanan Batuan Horizontal (Normal)

Sumber : Hasil Perhitungan

h. Tekanan Batuan Horizontal (Gempa)

Perhitungan koefisien gempa

Untuk perencanaan bangunan air dapat digunakan peta zonasi gempa. Dimana percepatan gempa dan koefisien gempanya dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Ad = Z \cdot Ac \cdot v$$

$$Kh = Ad/g$$

Dimana :

Ad : Percepatan gempa maksimum

Ac : Percepatan gempa dasar tergantung periode ulang

z : koefisien zona

v : koreksi pengaruh jenis tanah setempat

Kh : koefisien gempa

g : gravitasi



Gambar 4.11. Peta Zona Gempa Indonesia

Sumber : PUSLITBANG AIR

Setelah menghitung Nilai Percepatan Gempa melalui Online PGA Calculator dengan koordinat 00°36'46.6"LS dan 101°19'27.7"BT diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 4.10

Nilai Percepatan Gempa

Jenis Tanah	50 Tahun			100 Tahun			200 Tahun			500 Tahun			1000 Tahun			2500 Tahun			10000 Tahun		
	PBA	FPGA	PSA	PBA	FPGA	PSA	PBA	FPGA	PSA	PBA	FPGA	PSA	PBA	FPGA	PSA	PBA	FPGA	PSA	PBA	FPGA	PSA
Batuan	0.078	1.000	0.078	0.101	1.000	0.101	0.132	1.000	0.132	0.173	1.000	0.173	0.215	1.000	0.215	0.274	1.000	0.274	0.397	1.000	0.397
Tanah Keras	0.078	1.200	0.094	0.101	1.200	0.122	0.132	1.200	0.158	0.173	1.200	0.208	0.215	1.185	0.255	0.274	1.126	0.308	0.397	1.003	0.398
Tanah Sedang	0.078	1.600	0.125	0.101	1.597	0.132	0.132	1.536	0.202	0.173	1.454	0.252	0.215	1.370	1.370	0.274	1.252	0.343	0.397	1.103	0.438
Tanah Lunak	0.078	2.500	0.195	0.101	2.489	0.252	0.132	2.246	0.296	0.173	1.915	0.332	0.215	1.624	1.624	0.274	1.330	0.364	0.397	0.908	0.361

Sumber: Hasil Perhitungan

Maka dari Tabel 4.10 diperoleh PBA,FPGA,dam PSA. Yang mana dapat digunakan untuk menghitung Percepatan gempa dasar sebagai berikut:

- $Ac = PBA \cdot g \cdot 100$

$$Ac = 0.078 \cdot 9.81 \cdot 100$$

$$Ac = 76.492$$

$$Ad = Ac \cdot z \cdot v$$

$$Ad = 76.492 \cdot 0.6 \cdot 0.8$$

$$Ad = 36.716$$

- $K_h = A_d/g$

$$K_h = 186.939/(9.81 \cdot 100)$$

$$K_h = 0.191$$

$$q_{he} = 0.5 \cdot (\gamma_{\text{kuarsit}} \cdot h_p \cdot 1 \text{ m}) \cdot K_h$$

$$\gamma_{\text{kuarsit}} = \text{Unit Weight of Rock (t/m}^3\text{)}$$

$$H_p = \text{Head Pressure Very Blocky and Seamy}$$

$$= 0.3 \cdot (B + H_t)$$

$$= 0.3 \cdot (12 + 12)$$

$$= 43.2 \text{ m}$$

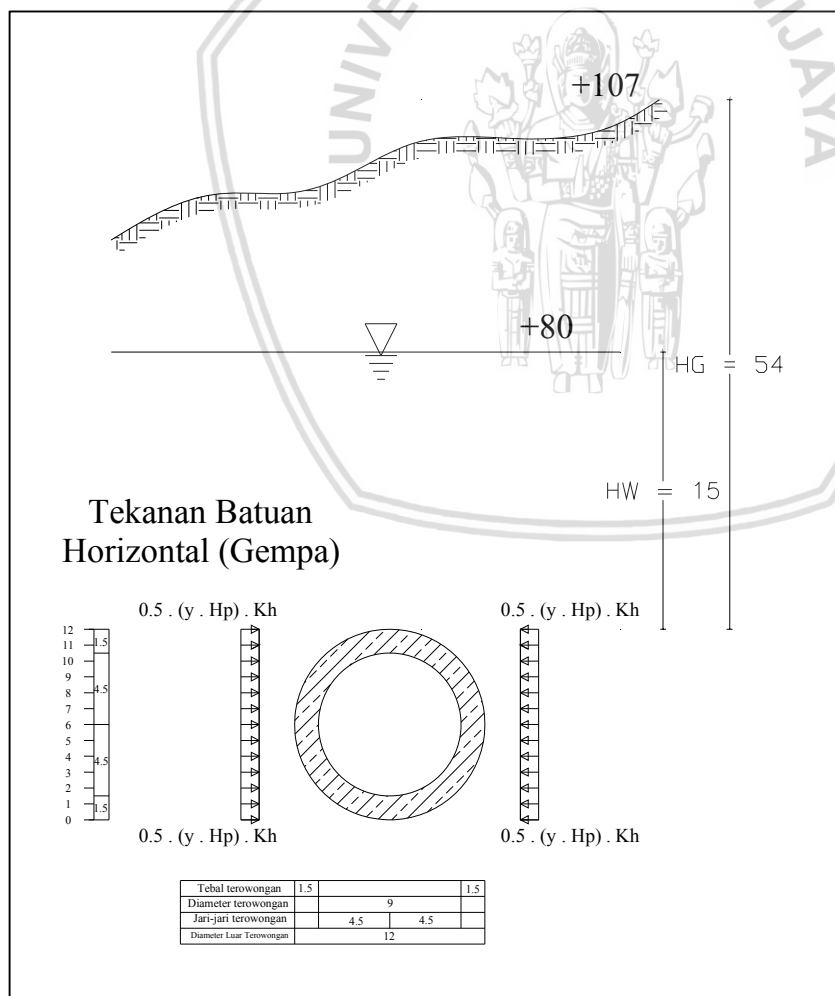
$$B = \text{Lebar Terowongan (m)}$$

$$H_t = \text{Tinggi Terowongan (m)}$$

$$q_{he} = 0.5 \cdot (\gamma_{\text{kuarsit}} \cdot H_p \cdot 1 \text{ m}) \cdot K_h$$

$$= 0.5 \cdot (2.8 \cdot 43.2 \cdot 1 \text{ m}) \cdot 0.191$$

$$= 11.551 \text{ t/m}$$



Gambar 4.12. Tekanan Batuan Horizontal (Gempa)

Sumber : Hasil Perhitungan

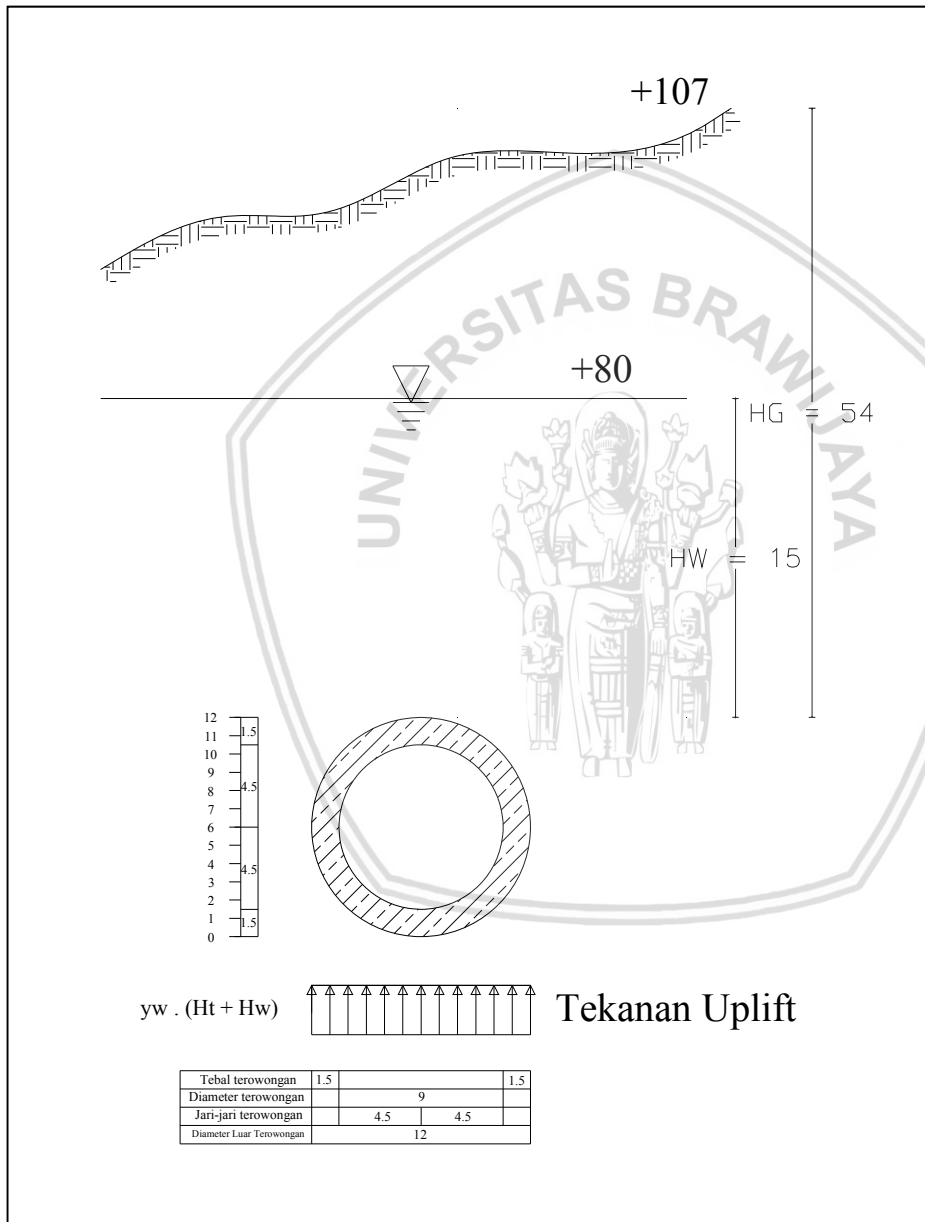
i. Tekanan Uplift

Besar tekanan Air tanah:

$$\begin{aligned} P_{wv} &= \gamma_w \cdot (H_w + H_t) \\ &= 1 \cdot (15 + 12) \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

Besar beban per satuan meter:

$$\begin{aligned} q &= P_{wv} \cdot 1 \text{ m} \\ &= 27 \text{ t/m} \end{aligned}$$

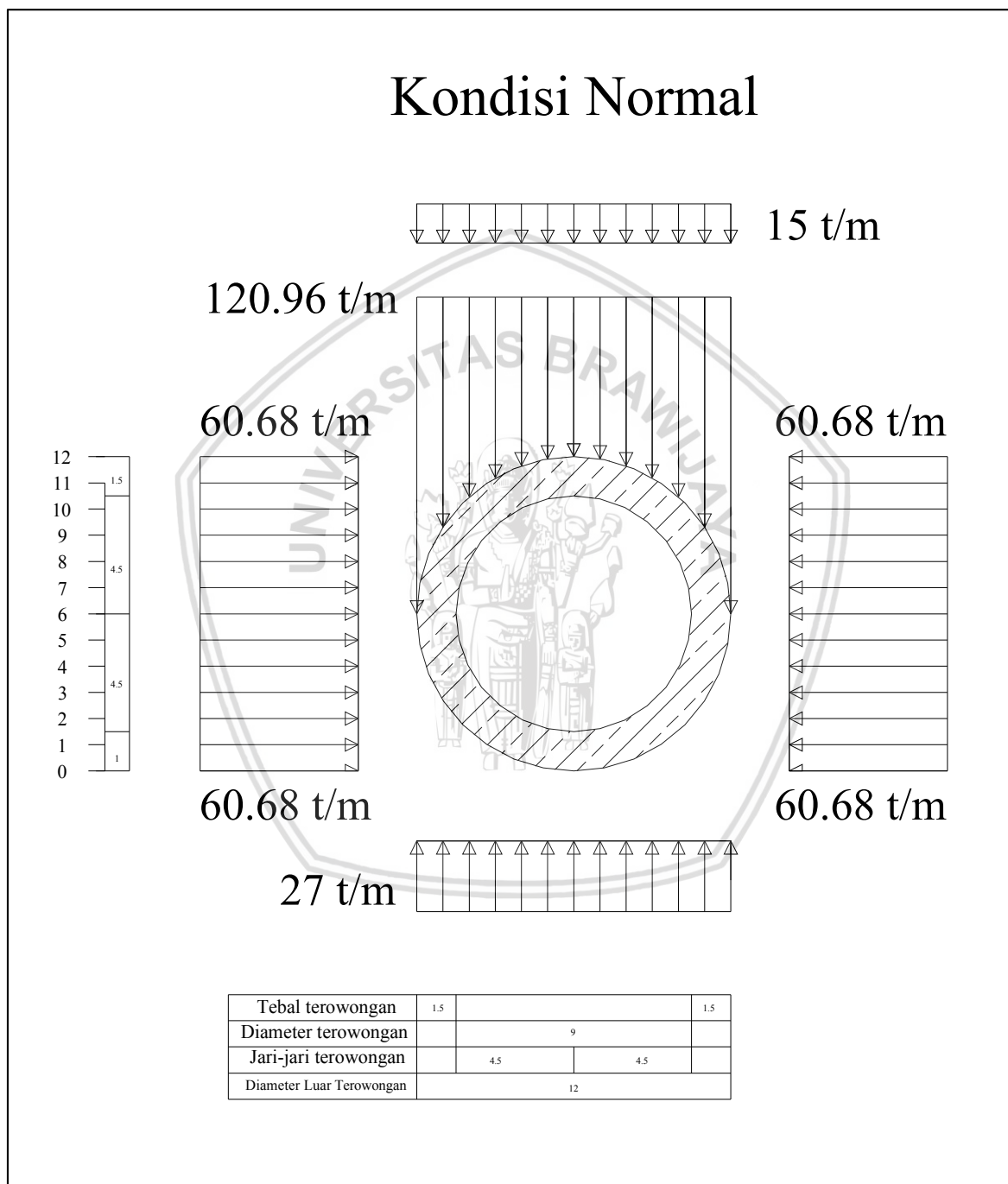


Gambar 4.13. Tekanan Uplift
Sumber : Hasil Perhitungan

Kekuatan perlu U untuk menahan beban mati D dan beban Hidup L tidak boleh kurang dari $U = 1,4 D + 1,7L$. (SK SNI '13 pers. C.9.2.1.) Kondisi 1, Perencanaan Normal

Beban yang bekerja:

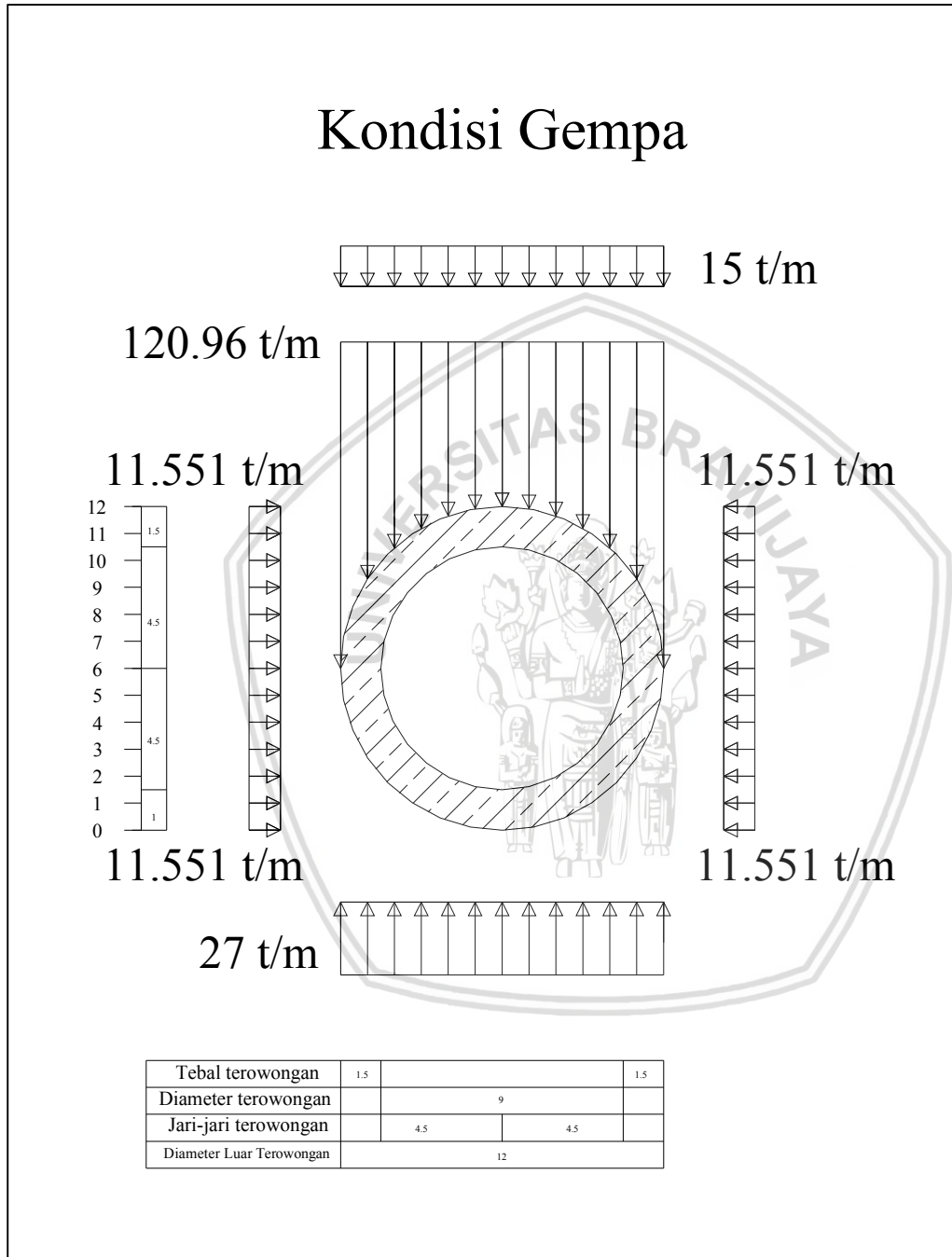
(1,7 . Beban batuan Vertikal) + (1,7. Tekanan Air Vertikal) + (1,4 . Berat Sendiri) + (1,7 . Reaksi Pondasi) + (1,7 . Tekanan Batuan Horizontal (normal))



Gambar 4.14. Kondisi Pembebanan Perencanaan Normal

Sumber Hasil Perhitungan

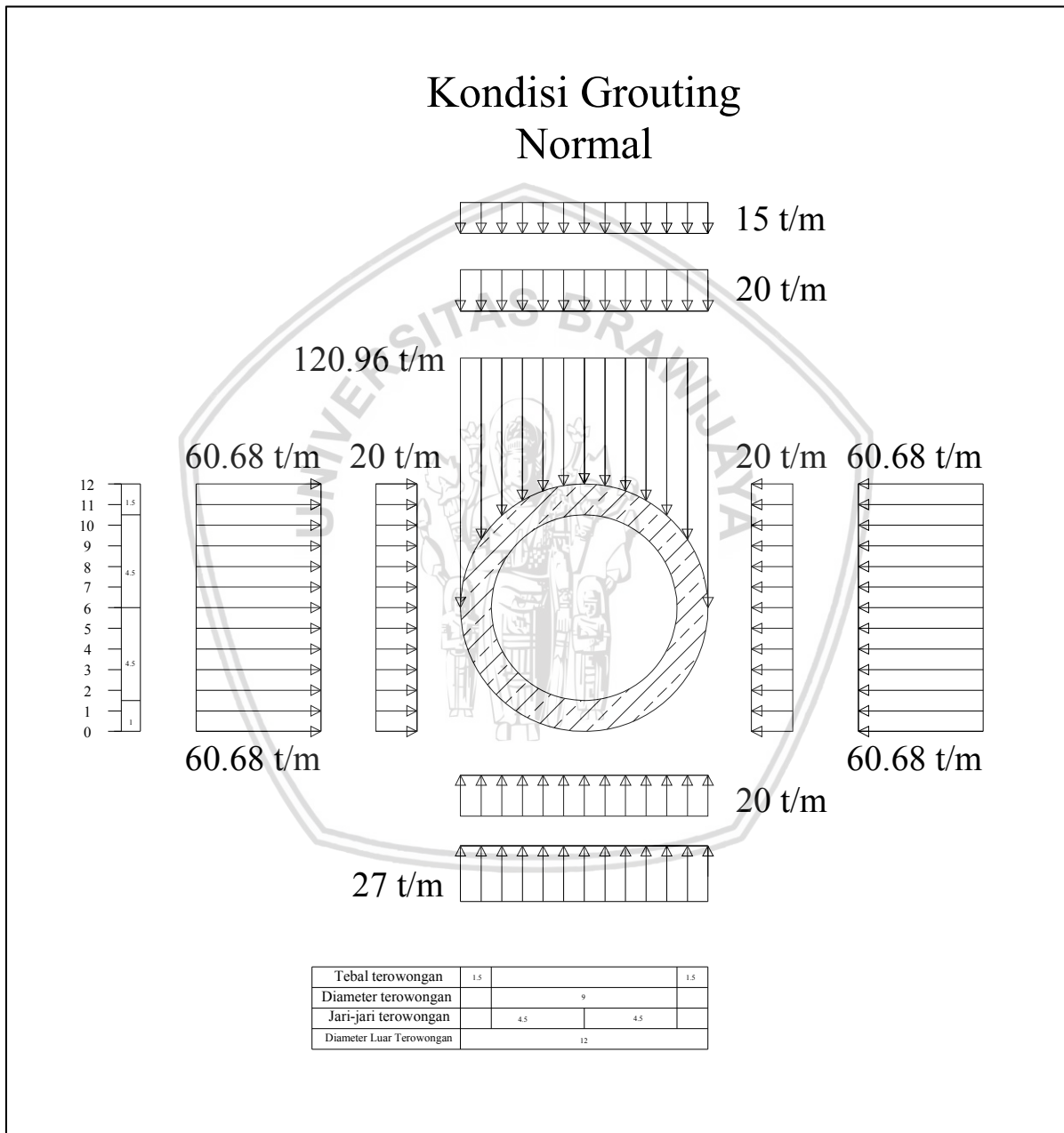
Untuk struktur penahan E atau pengaruh beban gempa, $U = 0,75(1,4D + 1,7L) + (1,0 E)$ (SK SNI '13 pers. C.9.2.2.). Kondisi 2 Perencanaan Gempa beban yang bekerja :
 $(1,275 \cdot \text{Beban batuan Vertikal}) + (1,275 \cdot \text{Tekanan Air Vertikal}) + (1,050 \cdot \text{Berat sendiri}) + (1,275 \cdot \text{Reaksi Pondasi}) + (1,000 \cdot \text{Tekanan Batuan Horizontal (Gempa)})$



Gambar 4.15 .Kondisi Pembebanan Perencanaan Gempa
 Sumber : Hasil Perhitungan

Kekuatan perlu U untuk menahan beban mati D dan beban Hidup L tidak boleh kurang dari $U = 1,4 D + 1,7L$ (SK SNI '13 pers. C.9.2.1.). Kondisi 3, Kondisi sementara saat pelaksanaan *Grouting* (Normal)

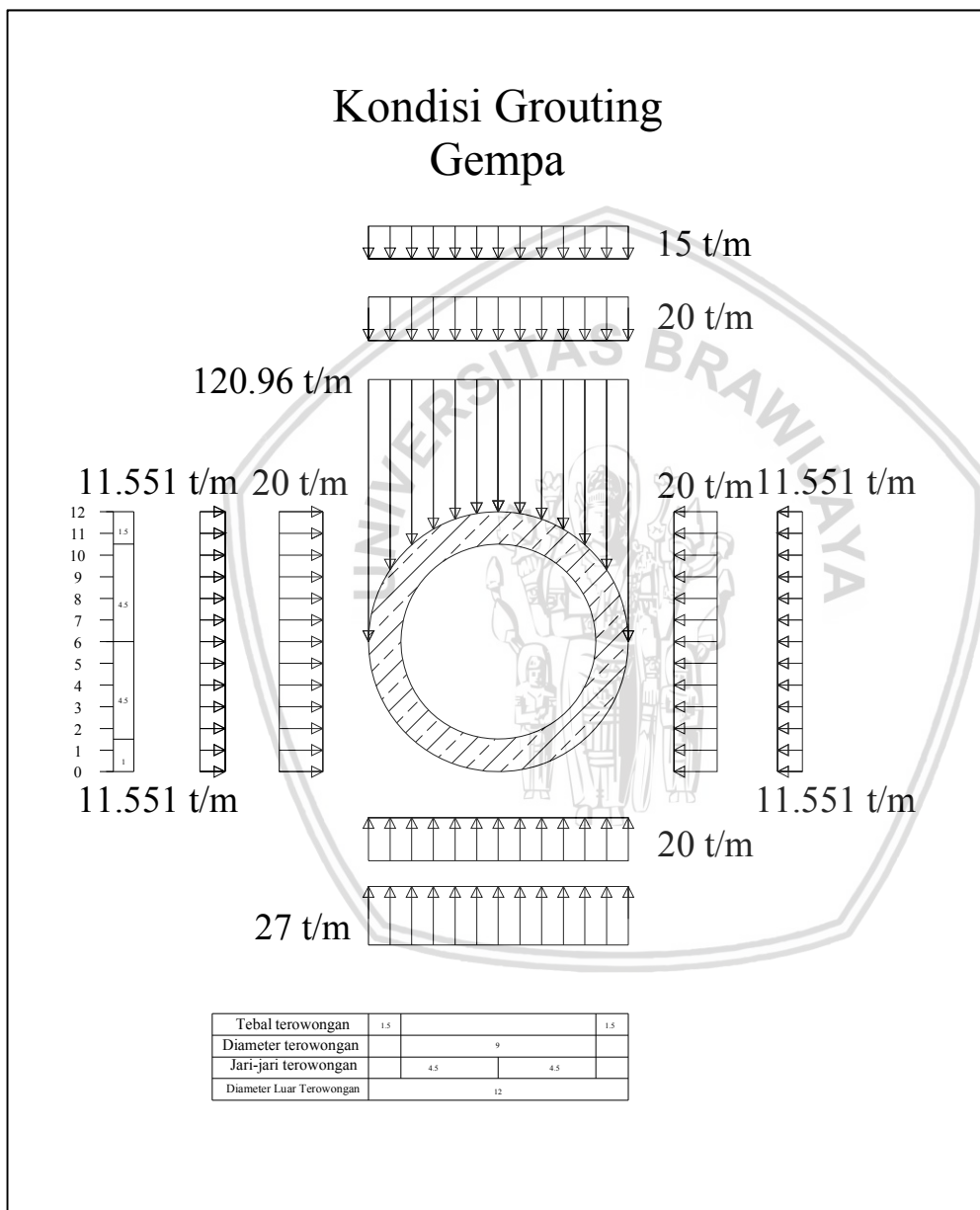
Beban yang bekerja : (1,7 . Beban batuan vertikal) + (1,7 . Tekanan Air Vertikal) + (1,4 . Berat sendiri) + (1,7 . Reaksi Pondasi) + (1,7 . Tekanan Batuan horizontal (Normal)) + (1,4 . Tekanan *Grouting*)



Gambar 4.16. Kondisi Sementara saat *Grouting* Normal
Sumber : Hasil Perhitungan

Untuk struktur penahan E atau pengaruh beban gempa, $U = 0,75(1,4D + 1,7L) + (1,0 E)$ (SK SNI '13 pers. C.9.2.2.). Beban yang bekerja Kondisi 4, Kondisi sementara saat pelaksanaan *Grouting* (Gempa) beban yang bekerja :

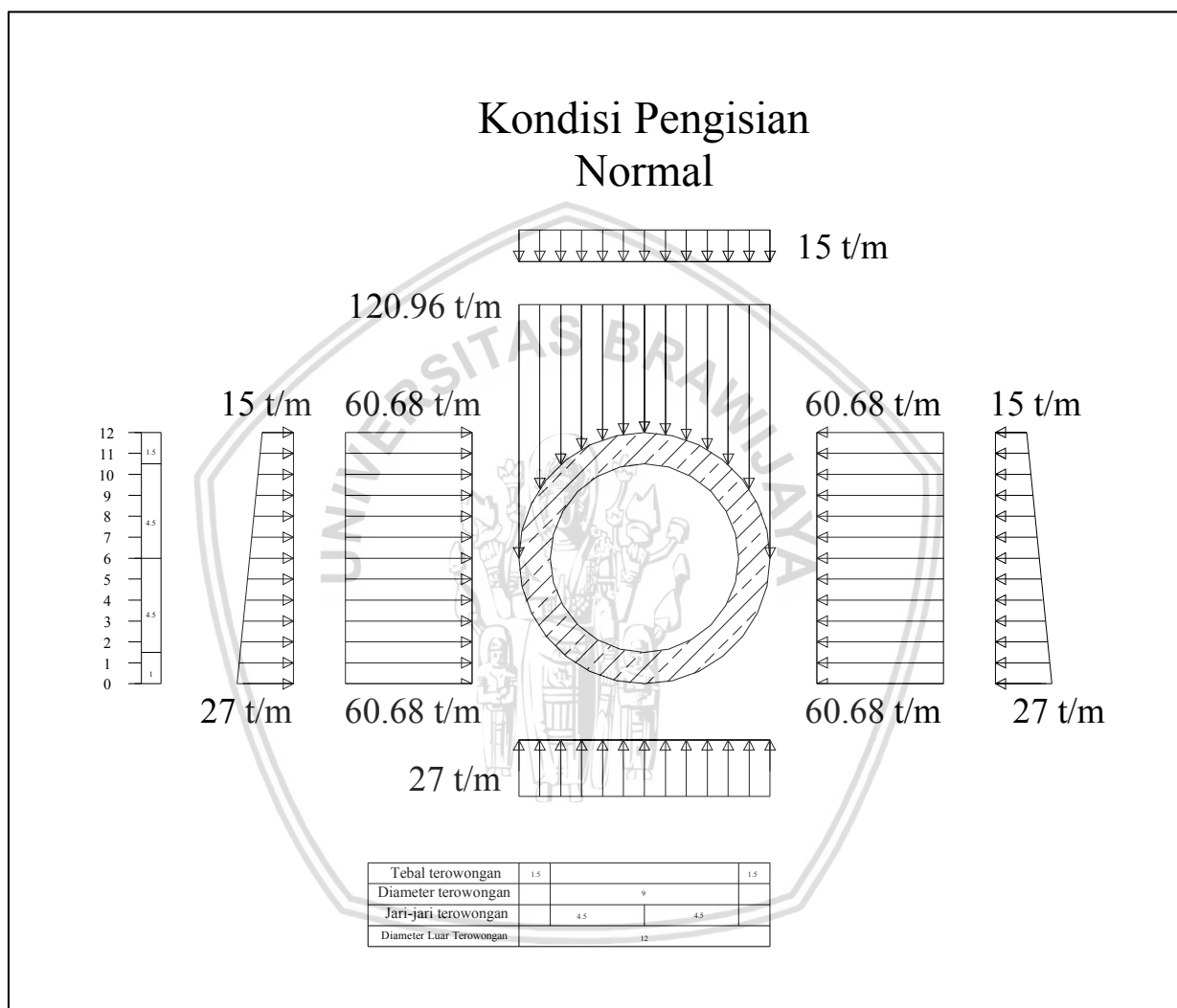
(1,275 . Beban Batuan Vertikal) + (1,275 . Tekanan Air Vertikal) + (1,050 . Berat Sendiri) + (1,275 . Reaksi Pondasi) + (1,000 . Tekanan Batuan Horizontal (Gempa)) + (1,050 . Tekanan *Grouting*)



Gambar 4.17. Kondisi Sementara saat *Grouting* Gempa
Sumber : Hasil Perhitungan

Kekuatan perlu U untuk menahan beban mati D dan beban Hidup L tidak boleh kurang dari $U = 1,4 D + 1,7L$ (SK SNI '13 pers. C.9.2.1.). Kondisi 5, Kondisi sementara saat pengisian waduk (Normal) beban yang bekerja :

(1,7 . Beban Batuan Vertikal) + (1,7 . Tekanan Air Vertikal) + (1,4 . Berat sendiri) + (1,7 . Reaksi Pondasi) + (1,7 . Tekanan Batuan Horizontal (Normal)) + (1,7 . Tekanan Air dari Luar)

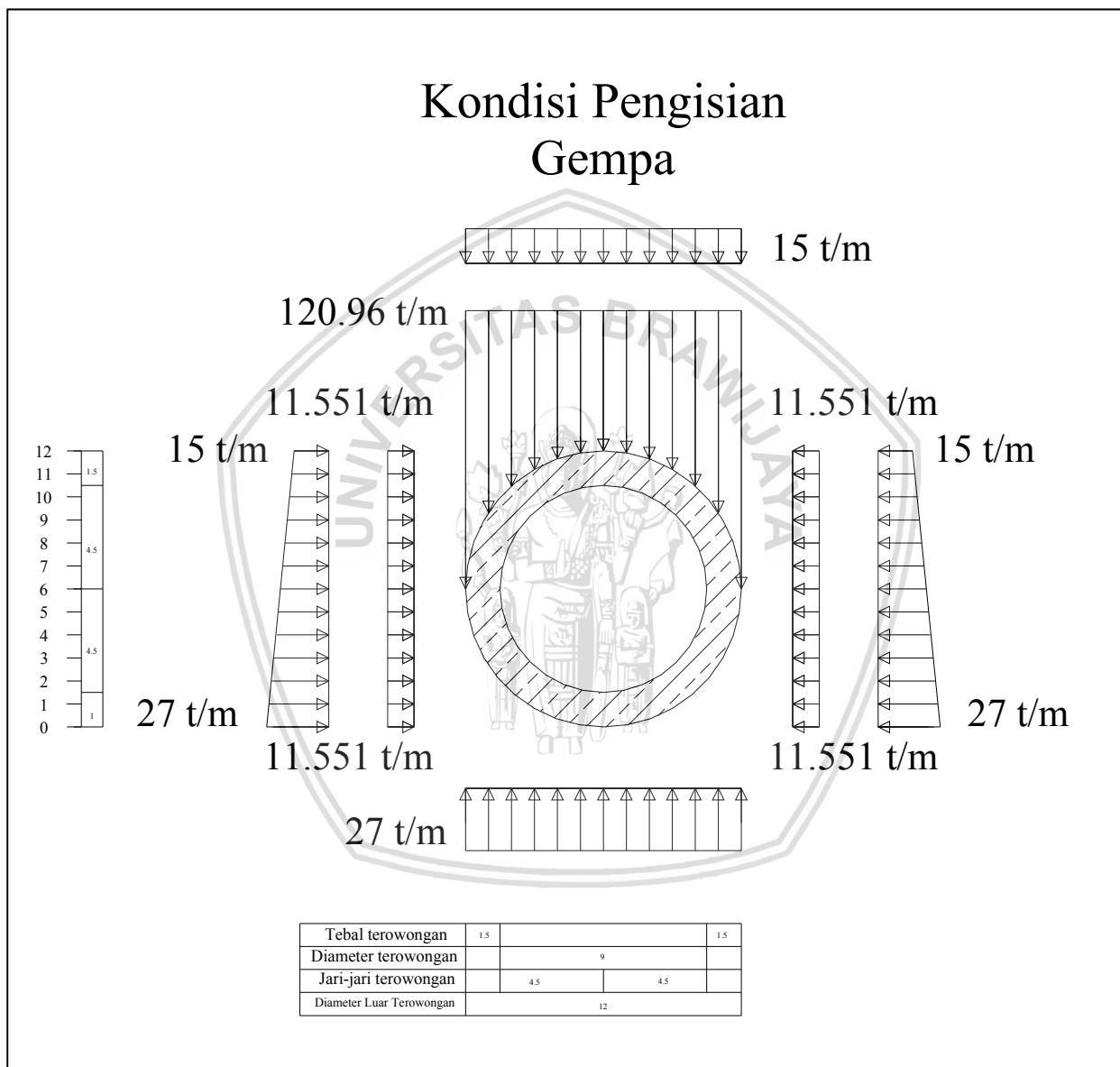


Gambar 4.18. Kondisi Pengisian Waduk Normal

Sumber : Hasil Perhitungan

Untuk struktur penahan E atau pengaruh beban gempa, $U = 0,75(1,4D + 1,7L) + (1,0 E)$ (SK SNI '13 pers. C.9.2.2.). Kondisi 6, Kondisi sementara saat pengisian waduk (Gempa) beban yang bekerja :

$(1,275 \cdot \text{Beban Batuan Vertikal}) + (1,275 \cdot \text{Tekanan Air Vertikal}) + (1,050 \cdot \text{Berat sendiri}) + (1,275 \cdot \text{Reaksi Pondasi}) + (1,000 \cdot \text{Tekanan Batuan Horizontal (Gempa)}) + (1,275 \cdot \text{Tekanan Air dari Luar})$

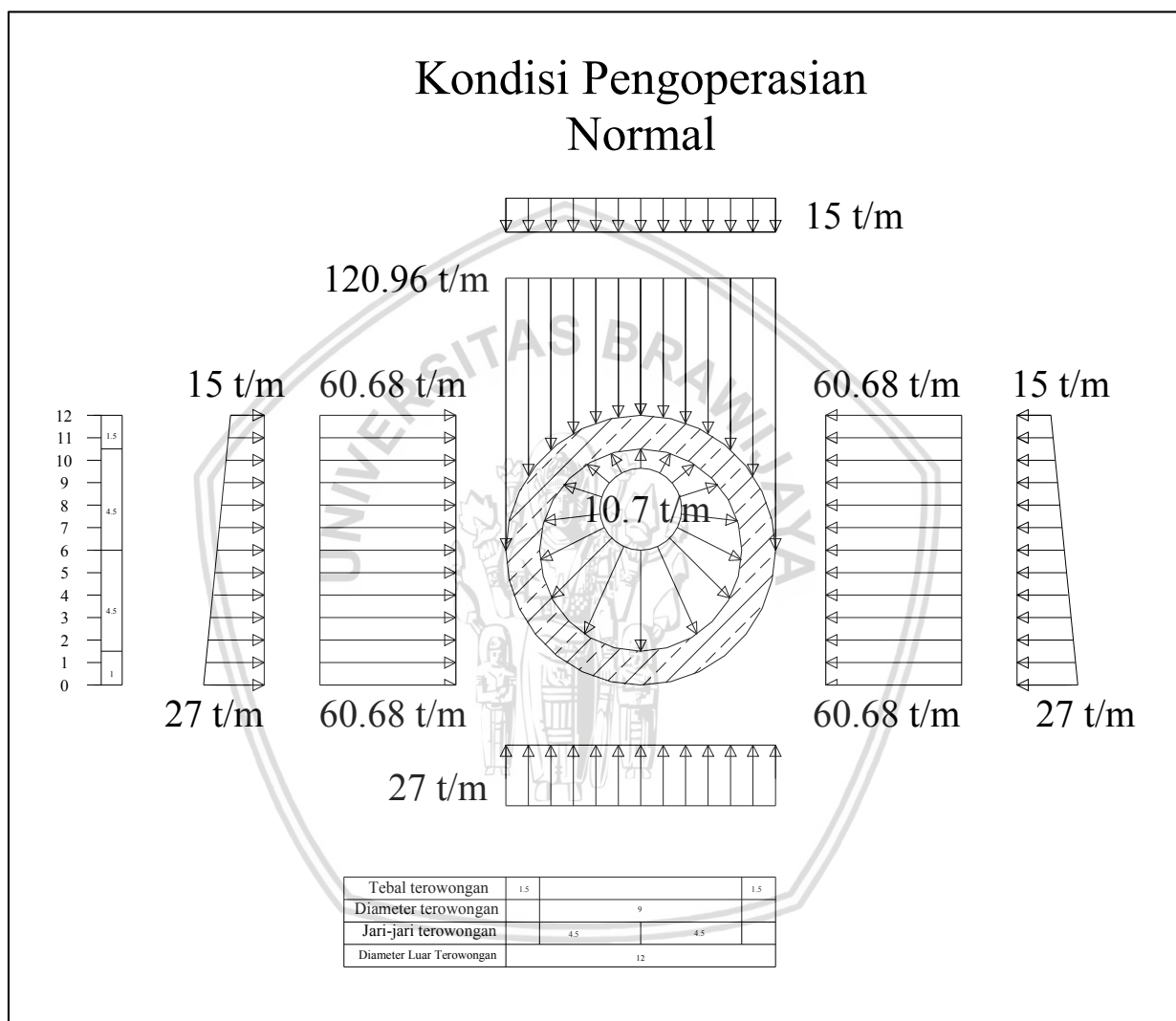


Gambar 4.19. Kondisi Pengisian Waduk Gempa

Sumber : Hasil Perhitungan

Kekuatan perlu U untuk menahan beban mati D dan beban Hidup L tidak boleh kurang dari $U = 1,4 D + 1,7L$ (SK SNI '13 pers. C.9.2.1.). Kondisi 7, Kondisi pada saat pengoperasian (Normal) beban yang bekerja :

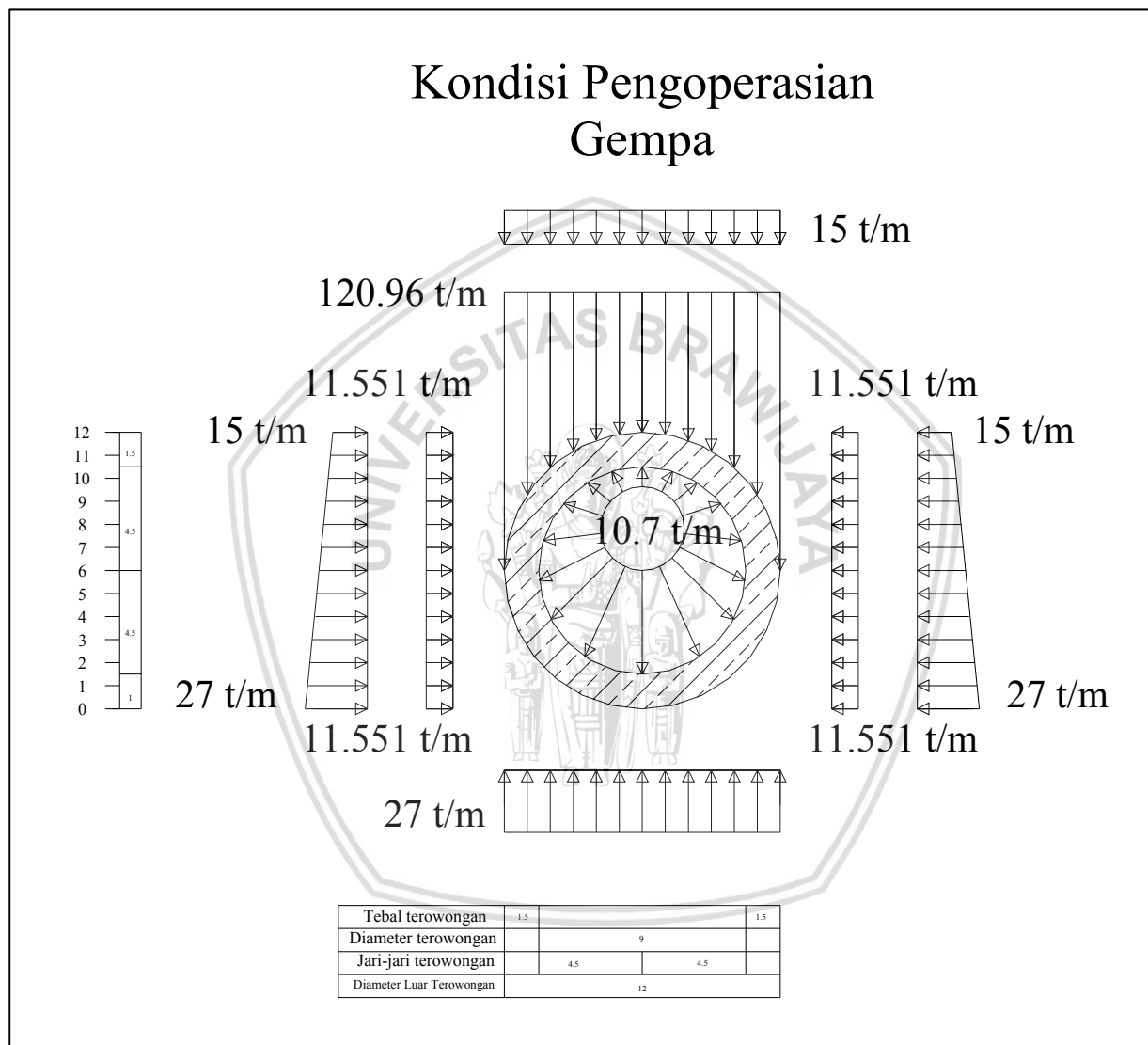
(1,7 . Beban Batuan Vertikal) + (1,4 .Berat Sendiri) + (1,7 . Tekanan Air Vertikal) + (1,7 . Reaksi Pondasi) + (1,7 . Tekanan Air dari Luar) + (1,7 . Tekanan Air dari Dalam) + (1,4 . Tekanan Batuan Horizontal (Normal)



Gambar 4.20. Kondisi Pengoperasian Normal
Sumber : Hasil Perhitungan

Untuk struktur penahan E atau pengaruh beban gempa, $U = 0,75(1,4D + 1,7L) + (1,0 E)$ (SK SNI '13 pers. C.9.2.2.). Kondisi 8, Kondisi pada saat pengoperasian (Gempa) beban yang bekerja :

(1,275 . Beban Batuan Vertikal) + (1,050 . Berat Sendiri) + (1,275 . Tekanan Air Vertikal) + (1,275 . Reaksi Pondasi) + (1,275 . Tekanan Air dari Luar) + (1,275 . Tekanan Air dari Dalam) + (1,000 . Tekanan Batuan Horizontal (Gempa))



Gambar 4.21. Kondisi Pengoperasian Gempa
Sumber : Hasil Perhitungan

4.4.4. Kondisi Perencanaan

Konstruksi terowongan direncanakan sama mulai dari inlet sampai outlet. Batasan kondisi yang digunakan dalam perencanaan terowongan adalah:

- Kondisi 1, Perencanaan Normal
Beban yang bekerja : Beban Batuan Vertikal + Berat Sendiri + Tekanan Air Vertikal + Reaksi Pondasi + Tekanan Batuan Horizontal (Normal)
- Kondisi 2, Perencanaan Gempa
Beban yang bekerja : Beban Batuan Vertikal + Berat Sendiri + Tekanan Air Vertikal + Reaksi Pondasi + Tekanan Batuan Horizontal (Gempa)
- Kondisi 3, Kondisi sementara saat pelaksanaan *Grouting* (Normal)
Beban yang bekerja : Beban Batuan Vertikal + Berat Sendiri + Tekanan Air Vertikal + Reaksi Pondasi + Tekanan Batuan Horizontal (Normal)+ Tekanan Grouting
- Kondisi 4, Kondisi sementara saat pelaksanaan *Grouting* (Gempa)
Beban yang bekerja : Beban Batuan Vertikal + Berat Sendiri + Tekanan Air Vertikal + Reaksi Pondasi + Tekanan Batuan Horizontal (Gempa)+ Tekanan Grouting
- Kondisi 5, Kondisi sementara saat pengisian waduk (Normal)
Beban yang bekerja : Beban Batuan Vertikal + Berat Sendiri + Tekanan Air Vertikal + Reaksi Pondasi + Tekanan Batuan Horizontal (Normal)+ Tekanan Air dari Luar
- Kondisi 6, Kondisi sementara saat pengisian waduk (Gempa)
Beban yang bekerja : Beban Batuan Vertikal + Berat Sendiri + Tekanan Air Vertikal + Reaksi Pondasi + Tekanan Batuan Horizontal (Gempa)+ Tekanan Air dari Luar
- Kondisi 7, Kondisi pada saat pengoperasian (Normal)
Beban yang bekerja : Beban Batuan Vertikal + Berat Sendiri + Tekanan Air Vertikal + Reaksi Pondasi + Tekanan Batuan Horizontal (Normal)+ Tekanan Air dari Luar + Tekanan Air dari Dalam
- Kondisi 8, Kondisi pada saat pengoperasian (Gempa)
Beban yang bekerja : Beban Batuan Vertikal + Berat Sendiri + Tekanan Air Vertikal + Reaksi Pondasi + Tekanan Batuan Horizontal (Gempa) + Tekanan Air dari Luar + Tekanan Air dari Dalam

4.5. Stabilitas Terowongan

Stabilitas terowongan pada batuan keras seperti kuarsit harus memiliki $q_{\text{vertikal total}} < q_u$ (*Compressive strength*) agar kekuatan batuan mampu untuk menahan tekanan total vertikal yang bekerja dari atas batuan. Untuk q_u (*Compressive strength*) dapat dilihat dalam Tabel 4.11. berikut ini:

Tabel 4.11.

Hasil Pengujian Laboratorium Batuan Jalur Terowongan Pengelak Bendungan Ambacang

HOLE No		BA 15 - 4			BA 15 - 5		BA 15 - 6	
DEPTH (m)		3.50 - 4.00	36.80 - 38.20	48.00 - 49.30	3.20 - 34.15	43.10 - 48.60	18.20 - 21.00	24.30 - 25.00
LITHOLOGI		Colluvial Deposit	Quartzite	Quartzite	Alternation Quartzite - Shale	Quartzite	Shale	Shale
PROPERTIES	Natural Water Content (%)	23.85	1.02	0.95	1.37	1.98	2.45	1.71
	Specific gravity of soil G_s	2.648						
	Wet density γ_{wet} (g/cm ³)	1.852	2.478	2.477	2.464	2.528	2.463	2.488
	Dry density γ_d (g/cm ³)	1.495	2.453	2.454	2.431	2.479	2.404	2.447
	Void ratio e	0.771	0.068	0.055	0.052	0.105	0.157	0.102
	Saturated density γ_{sat} (g/cm ³)	1.931	2.517	2.507	2.480	2.574	2.540	2.539
	Submerged density γ_{sub} (g/cm ³)	0.931	1.517	1.507	1.480	1.574	1.540	1.539
	Degree of Saturation S_{ro} %	81.91	39.28	44.38	67.31	51.83	43.39	44.93
SPECIFIC GRAVITY OF ROCK	Bulk dry Basis	-	2.518	2.493	2.479	2.548	2.479	2.477
	Saturated Surface Dry Condition	-	2.557	2.531	2.510	2.617	2.588	2.559
	Apparent	-	2.620	2.590	2.557	2.739	2.783	2.697
	Absorption %	-	1.55	1.50	1.24	2.74	4.40	3.29
UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH	Compressive Strength q_u kg/cm ²	2.06	397.37	439.90	112.28	510.87	152.02	155.19
	MODULUS ELASTICITY	Axial E_a kg/cm ²	1.215E+02	2.170E+04	3.004E+04	1.091E+04	1.876E+04	1.383E+04
		Diametral E_d kg/cm ²	5.141E+02	5.057E+04	6.843E+04	3.131E+04	4.210E+04	3.499E+04
	Poisson's Ratio μ		0.236	0.429	0.439	0.348	0.446	0.395
TRIAXIAL UU	Cohesion C kg/cm ²	0.544	24.136	27.306	8.993	28.920	14.292	14.088
	Internal friction angle ϕ°		18 ° 38 '	43 ° 20 '	45 ° 43 '	38 ° 48 '	48 ° 24 '	38 ° 42 '
ULTRASONIC VELOCITY	Poisson Ratio	-	-	0.394	0.409	0.353	0.394	0.333
	Young Modulus Elasticity E kg/cm ²	-	-	4.40E+05	3.85E+05	5.00E+05	2.75E+05	4.27E+05
	Modulus Rigidity or Shear Modulus kg/cm ²	-	-	1.58E+05	1.37E+05	1.85E+05	9.85E+04	1.60E+05

Sumber : PT Indra Karya

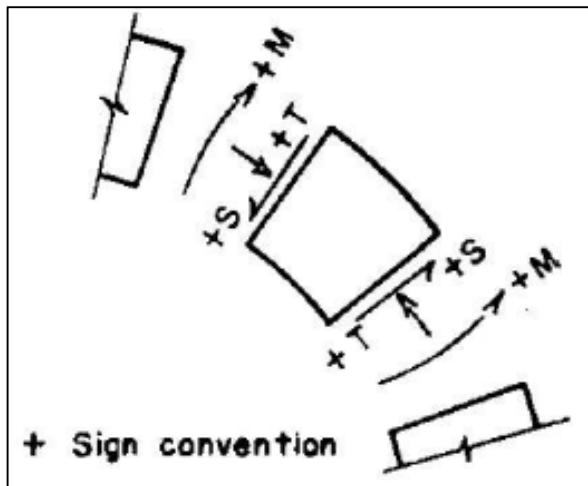
Maka dihitung jumlah $q_{\text{vertikal total}}$ sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Beban vertikal total (q)} &= (q_{\text{batuan vertikal}} + q_{\text{berat sendiri}} + q_{\text{air vertikal}} + q_{\text{air dalam terowongan}}) \\
 &= (120.96 + 3.6 + 15 + 10.7) \\
 &= 150.26 \text{ t/m}^2 = 15.026 \text{ kg/cm}^2
 \end{aligned}$$

Maka $q_{\text{total vertikal}} 15.026 \text{ kg/cm}^2 < 510.87 \text{ kg/cm}^2 q_u$ yang mana terowongan masih bisa dikatakan aman.

4.6. Perhitungan Momen, Normal, dan Lintang

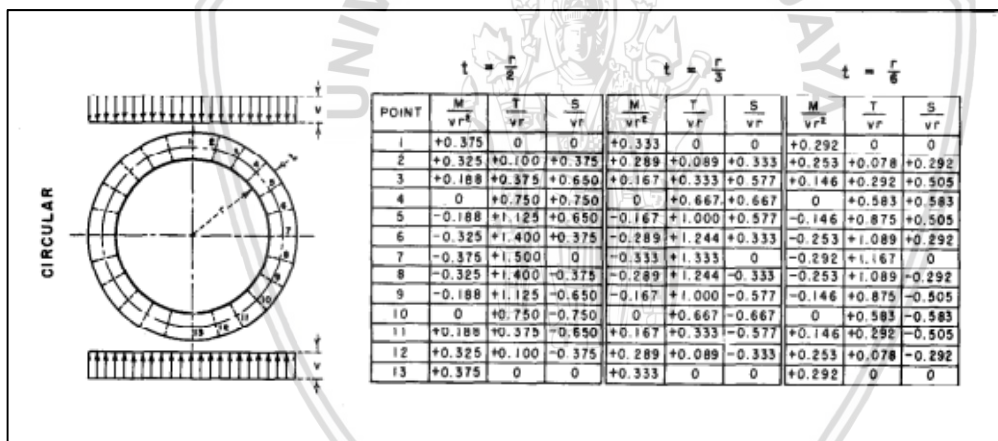
Untuk perhitungan Momen, Normal, dan Lintang pada perencanaan terowongan ini menggunakan tabel *Beegs Deformation Analysis of Single Barrel Conduit* sebagai perencanaan tulangan nantinya. Konsep Mekanika yang terjadi pada tiap potongan dapat dilihat pada gambar berikut:



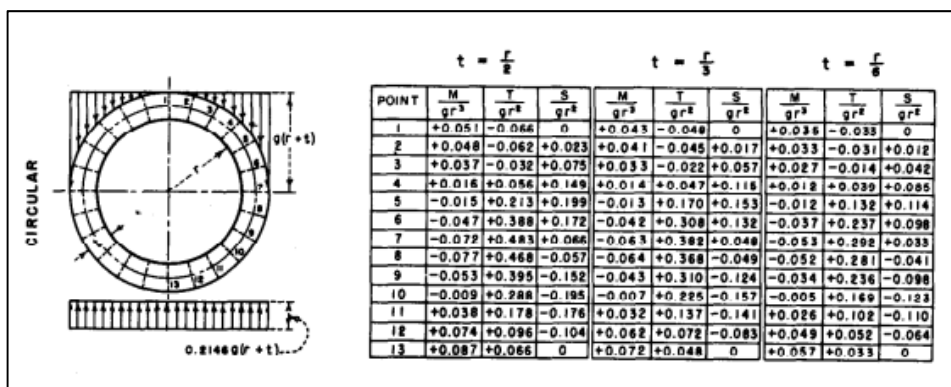
Gambar 4.22. Arah Momen, Normal, dan Lintang di tiap Potongan Terowongan
Sumber: Philips, H.B., & Allen, I.E. 1986:2

4.6.1. Kondisi Normal

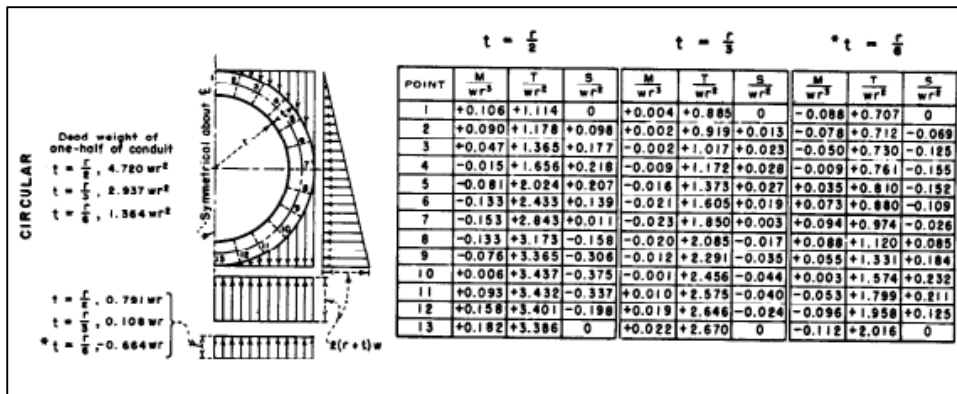
Pada Kondisi Normal ini ada beberapa tekanan yang bekerja, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.14. dan pada perhitungan momen, normal, dan lintang menggunakan koefisien dari pada gambar berikut:



Gambar 4.23. Beban Vertikal Merata
Sumber: Philips., & Allen., 1986:2

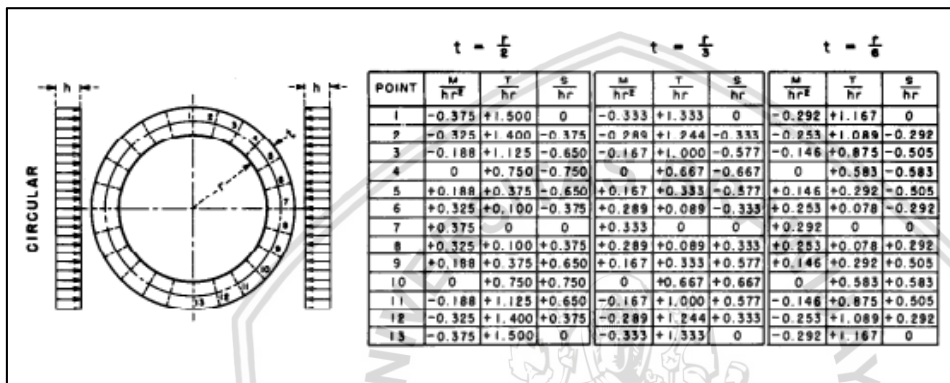


Gambar 4.24. Beban Batuan
Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.25. Berat Sediri

Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.26. Beban Merata Horizontal

Sumber: Philips., & Allen., 1986:2

Tabel 4.12.
Kondisi Normal

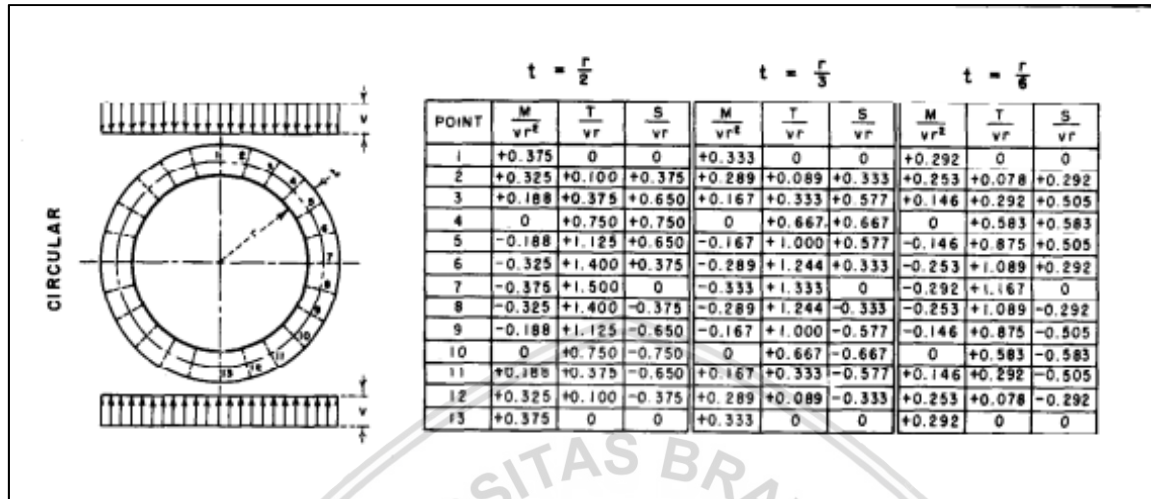
Point	Tekanan Vertikal									Tekanan Horizontal			Total		
	Batuan			Air Tanah			Berat Sendiri			Batuan Horizontal N			Momen	Normal	Lintang
	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang			
1	3.378097	-3.7709	0	38.21175	0	0	0.09072	20.0718	0	-154.07	616.7418	0	-112.389	-137.769	0
2	3.312301	-3.63545	1.373393	33.16275	10.21275	38.21175	0.15876	20.84292	0.29484	-133.712	575.564	-154.06978	-97.0784	-106.292	-114.19
3	2.88218	-1.92145	4.97831	19.16325	38.21175	66.21075	-0.15876	23.06556	0.52164	-77.2662	462.672	-266.96174	-55.3796	-17.9104	-195.251
4	1.369684	4.598225	11.25098	0	76.53825	76.53825	-0.20412	26.71704	0.63504	0	308.6022	-308.60222	1.165564	107.8535	-220.178
5	-1.45164	18.98297	17.08467	-19.16325	114.75	66.21075	-0.36288	31.13964	0.61236	77.26622	154.0698	-266.96174	56.28846	242.1388	-183.054
6	-0.53764	3.942708	1.689732	-33.16275	142.749	38.21175	-0.47628	36.4014	0.43092	133.7122	41.17781	-154.06978	99.53554	316.8053	-113.737
7	-16.5174	100.1531	12.58468	-38.21175	152.96175	0	-0.52164	41.958	0.06804	154.0698	0	0	98.819	449.1426	12.65272
8	-6.03914	34.72507	-4.62372	-59.69295	256.9482	-77.8694	-4.131	47.2878	-0.38556	133.7122	41.17781	154.06978	63.84912	472.6733	71.19115
9	-4.05755	29.2521	-11.7008	-34.49385	206.55	-119.179	-2.7216	51.95988	-0.7938	77.26622	154.0698	266.96174	35.99323	365.0282	135.2878
10	-0.66053	21.23136	-14.8148	0	137.76885	-137.769	-0.02268	55.70208	-0.99792	0	308.6022	308.60222	-0.68321	214.7023	155.0207
11	3.019571	12.92754	-13.305	34.49385	68.78115	-119.179	0.2268	58.401	-0.9072	-77.2662	462.672	266.96174	-39.526	62.84347	133.5702
12	5.850419	6.794035	-7.83201	59.69295	18.38295	-68.7812	0.43092	60.01128	-1.90512	-133.712	575.564	154.06978	-67.7379	-48.5239	75.55149
13	6.794035	4.529357	0	68.78115	0	0	0.49896	60.5556	0	-154.07	616.7418	0	-77.9956	-88.9848	0
												Maksimum	99.53554	472.6733	155.0207

Sumber : Perhitungan

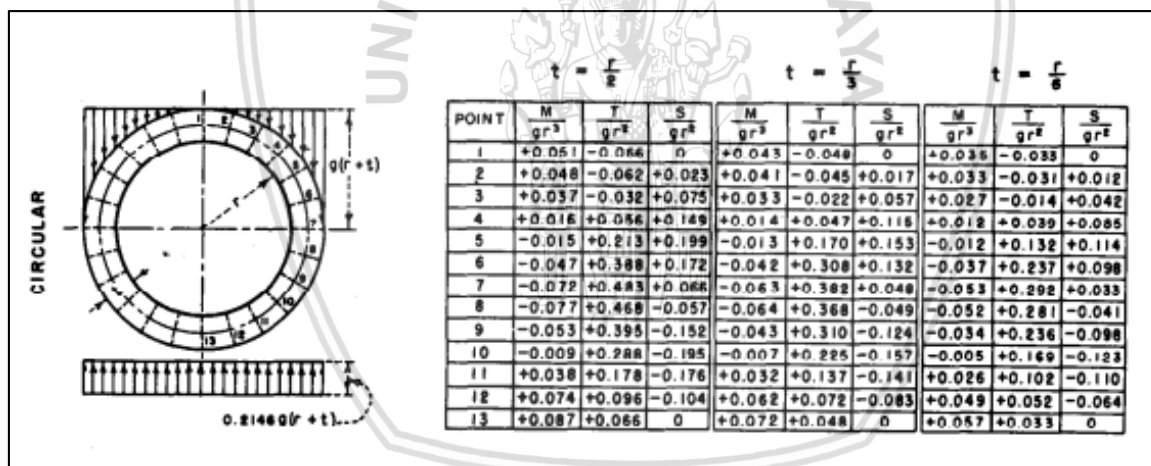
Nilai Momen Maksimum Terjadi pada Titik 6 dengan nilai Momen = 99.53 tm, Normal = 472.67 t, Lintang = 155.02 t

4.6.2. Kondisi Gempa

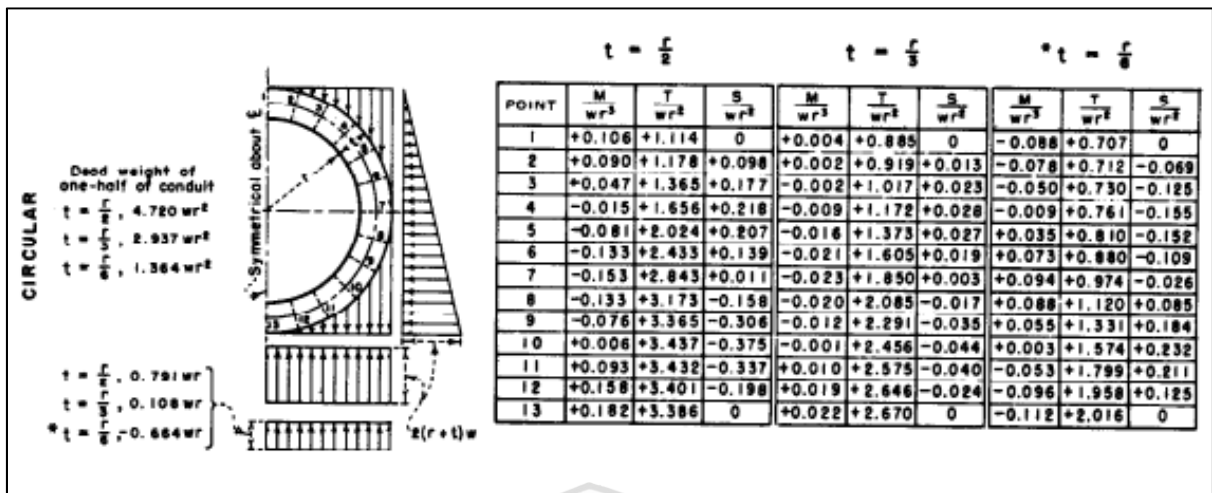
Pada Kondisi Gempa ini ada beberapa tekanan yang bekerja, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.15. dan pada perhitungan momen, normal, dan lintang menggunakan koefisien dari pada gambar berikut:



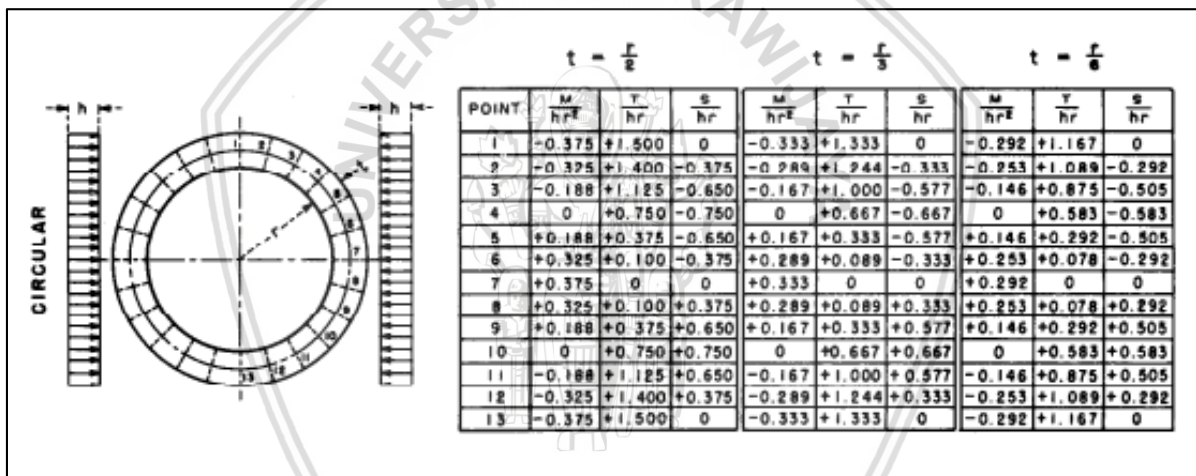
Gambar 4.27. Beban Vertikal Merata
Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.28. Beban Batuan
Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.29. Berat Sediri
 Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.30. Beban Merata Horizontal
 Sumber: Philips., & Allen., 1986:2

Tabel 4.13.
Kondisi Gempa

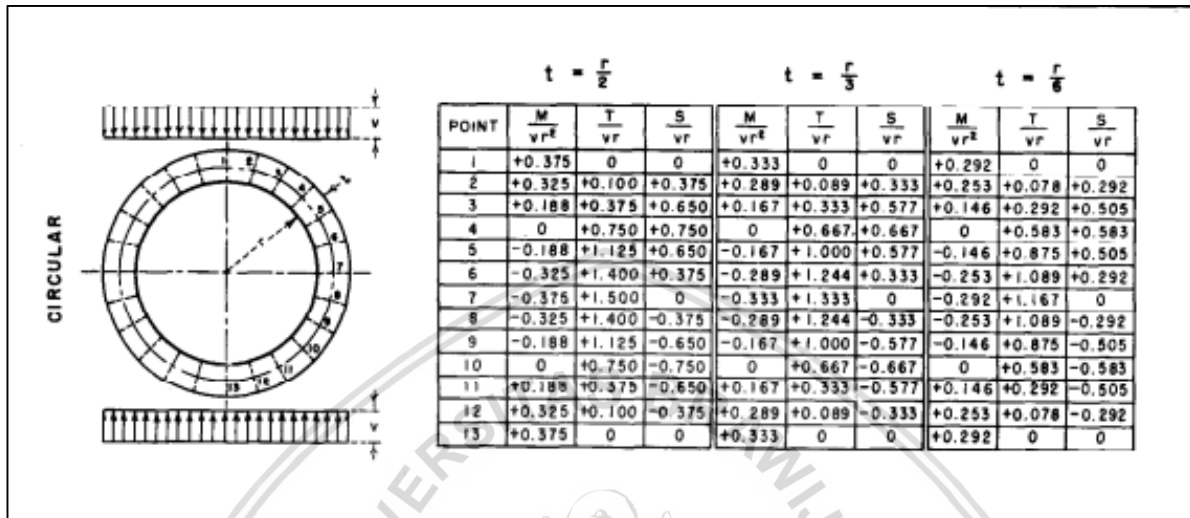
Point	Tekanan Vertikal									Tekanan Horizontal			Total		
	Batuan			Air Tanah			Berat Sendiri			Batuan Horizontal G			Momen	Normal	Lintang
	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang			
1	2.533573	-2.82817	0	28.65881	0	0	0.06804	15.05385	0	-115.552	462.5563	0	-84.2919	-103.327	0
2	2.415732	-2.65141	1.001645	24.87206	7.659563	28.65881	0.11907	15.63219	0.22113	-100.284	431.673	-115.552332	-72.8773	-79.6438	-85.6707
3	1.94437	-1.29625	3.358457	14.37244	28.65881	49.65806	-0.11907	17.29917	0.39123	-57.9497	347.004	-200.221308	-41.7519	-13.2879	-146.814
4	0.824884	2.769254	6.775835	0	57.40369	57.40369	-0.15309	20.03778	0.47628	0	231.4517	-231.451668	0.671794	80.21072	-166.796
5	-0.76596	10.01645	9.014806	-14.3724	86.0625	49.65806	-0.27216	23.35473	0.45927	57.94967	115.5523	-200.221308	42.53911	177.3833	-141.089
6	-2.47465	18.14745	7.77748	-24.8721	107.0618	28.65881	-0.35721	27.30105	0.32319	100.2842	30.88336	-115.552332	72.58023	252.7944	-78.7928
7	-3.71198	22.50755	2.828174	-28.6588	114.7213	0	-0.39123	31.4685	0.05103	115.5523	0	0	82.79031	284.2497	2.879204
8	-7.69991	44.27446	-5.89524	-44.7697	192.7112	-58.402	-4.131	47.2878	-0.38556	100.2842	30.88336	115.552332	43.68354	384.5576	50.86952
9	-5.17337	37.29642	-14.9186	-25.8704	154.9125	-89.3845	-2.7216	51.95988	-0.7938	57.94967	115.5523	200.221308	24.18431	302.1185	95.12443
10	-0.84218	27.06998	-18.8888	0	103.3266	-103.327	-0.02268	55.70208	-0.99792	0	231.4517	231.451668	-0.86486	186.0987	108.2383
11	3.849953	16.48261	-16.9639	25.87039	51.58586	-89.3845	0.2268	58.401	-0.9072	-57.9497	347.004	200.221308	-28.0025	68.51981	92.96574
12	7.459285	8.662395	-9.98582	44.76971	13.78721	-51.5859	0.43092	60.01128	-1.90512	-100.284	431.673	115.552332	-47.6242	-17.8233	52.07553
13	8.662395	5.77493	0	51.58586	0	0	0.49896	60.5556	0	-115.552	462.5563	0	-54.8051	-49.2218	0
												Maksimum	82.79031	384.5576	108.2383

Sumber : Perhitungan

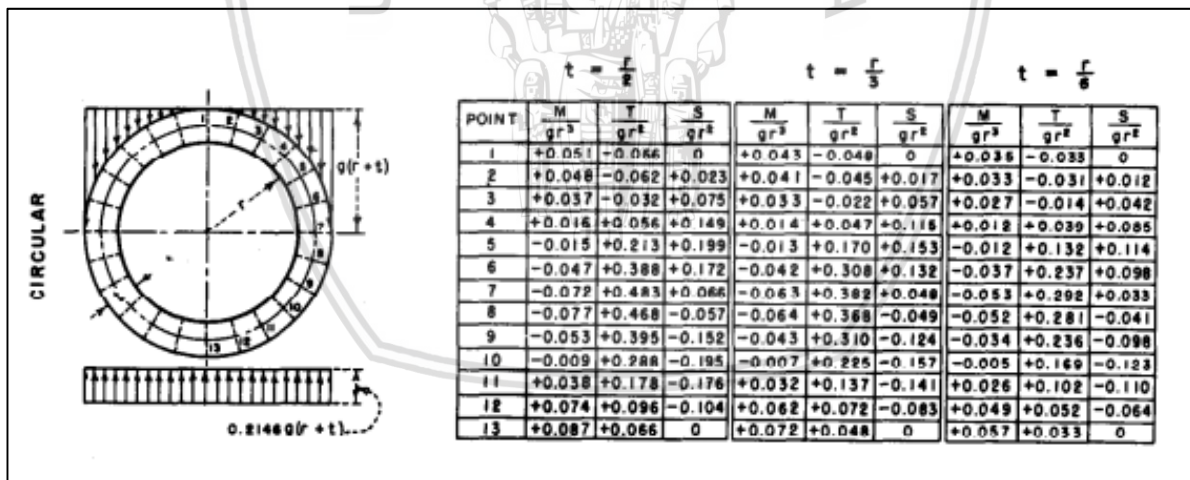
Nilai Momen Maksimum Terjadi pada Titik 7 dengan nilai Momen = 82.790 tm, Normal = 384.557 t, Lintang = 108.238 t

4.6.3. Kondisi Grouting Normal

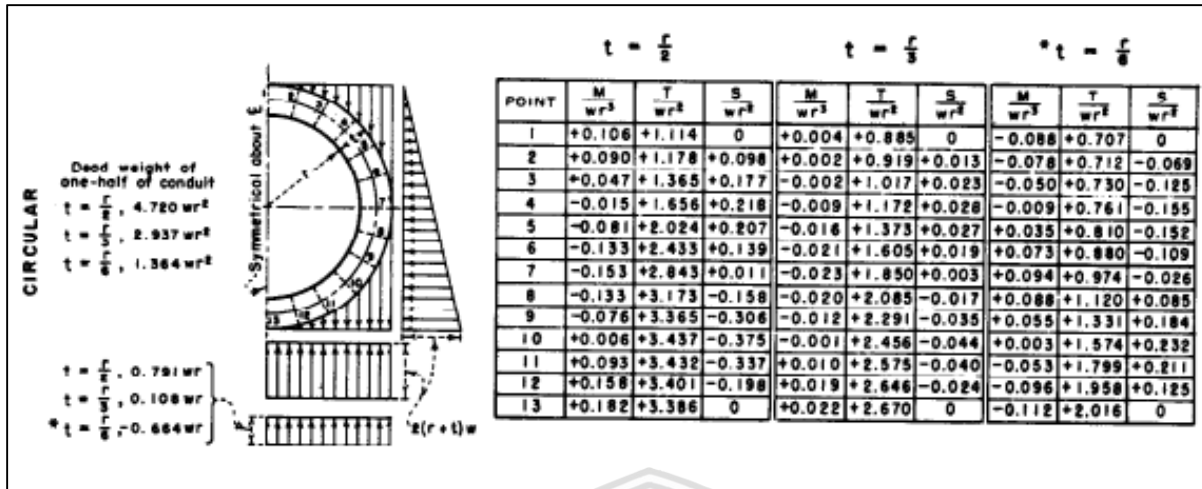
Pada Kondisi Grouting Normal ini ada beberapa tekanan yang bekerja, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.16. dan pada perhitungan momen, normal, dan lintang menggunakan koefisien dari pada gambar berikut:



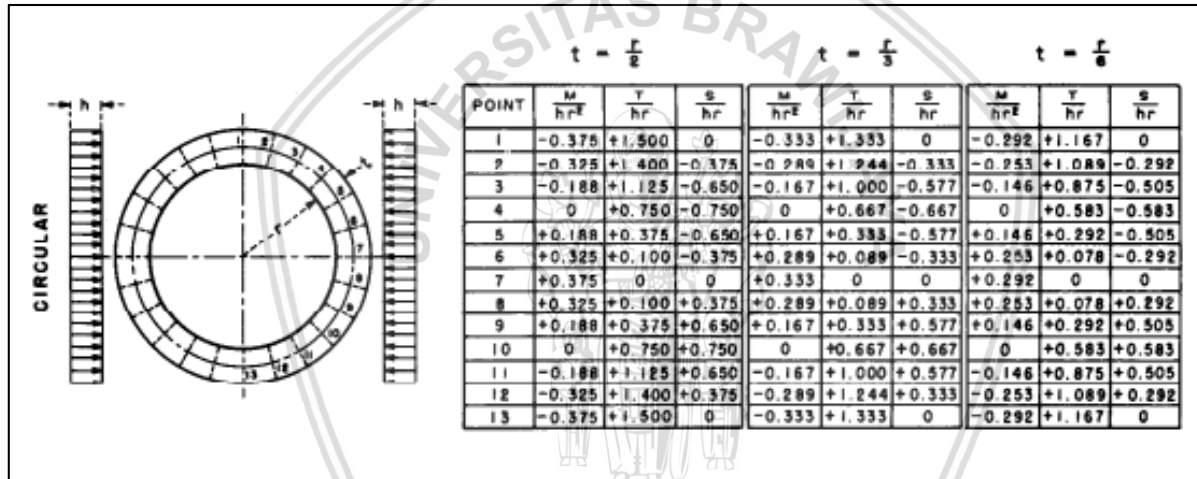
Gambar 4.31. Beban Vertikal Merata
Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.32. Beban Batuan
Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.33. Berat Sediri
Sumber: Philips., & Allen,. 1986:2



Gambar 4.34. Beban Merata Horizontal
Sumber: Philips., & Allen,. 1986:2

Tabel 4.14.
Kondisi *Grouting* Normal

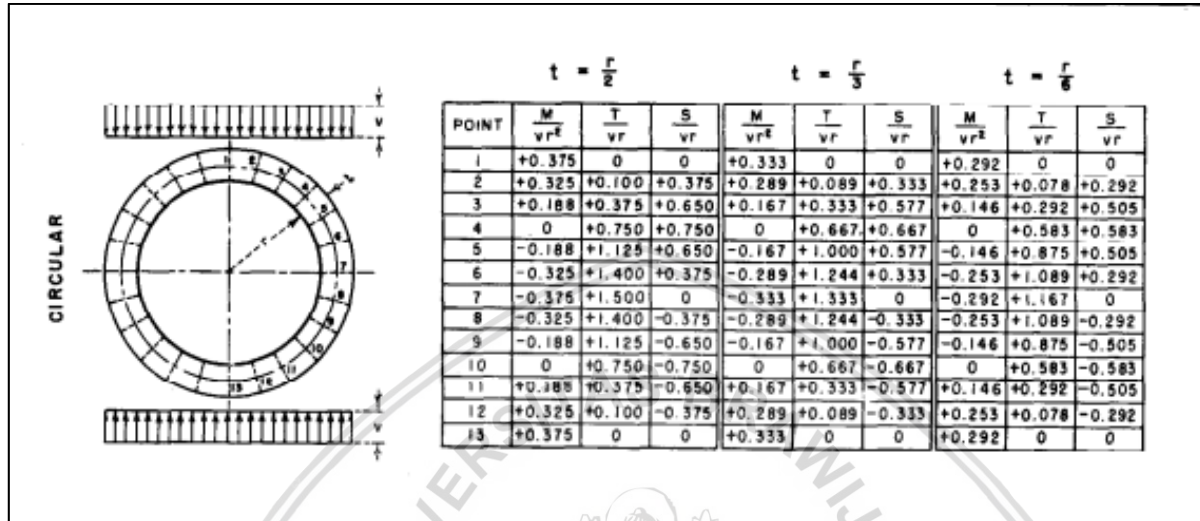
Point	Tekanan Vertikal												Tekanan Horizontal			Total		
	Batuan			Air Tanah			Berat Sendiri			Tekanan Grouting			Batuan Horizontal N			Momen	Normal	Lintang
	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang			
1	3.378097	-3.7709	0	38.21175	0	0	0.09072	20.0718	0	-38.4615	167.958	0	-154.07	616.7418	0	-150.851	30.18912	0
2	3.312301	-3.63545	1.373393	33.16275	10.21275	38.21175	0.15876	20.84292	0.29484	-33.3795	157.6785	-38.4615	-133.712	575.564	-154.069776	-130.458	51.38651	-152.651
3	2.88218	-1.92145	4.97831	19.16325	38.21175	66.21075	-0.15876	23.06556	0.52164	-19.2885	129.4965	-66.6435	-77.2662	462.672	-266.961744	-74.6681	111.5861	-261.895
4	1.369684	4.598225	11.25098	0	76.53825	76.53825	-0.20412	26.71704	0.63504	0	91.0455	-77.0385	0	308.6022	-308.602224	1.165564	198.899	-297.216
5	-1.45164	18.98297	17.08467	-19.1633	114.75	66.21075	-0.36288	31.13964	0.61236	19.2885	52.458	-66.6435	77.26622	154.0698	-266.961744	75.57696	294.5968	-249.697
6	-0.53764	3.942708	1.689732	-33.1628	142.749	38.21175	-0.47628	36.4014	0.43092	33.3795	24.276	-38.4615	133.7122	41.17781	-154.069776	132.915	341.0813	-152.199
7	-16.5174	100.1531	12.58468	-38.2118	152.9618	0	-0.52164	41.958	0.06804	38.4615	13.9965	0	154.0698	0	0	137.2805	463.1391	12.65272
8	-6.03914	34.72507	-4.62372	-59.693	256.9482	-77.8694	-4.131	47.2878	-0.38556	33.3795	24.276	37.9995	133.7122	41.17781	154.069776	97.22862	496.9493	109.1906
9	-4.05755	29.2521	-11.7008	-34.4939	206.55	-119.179	-2.7216	51.95988	-0.7938	19.2885	52.458	66.6435	77.26622	154.0698	266.961744	55.28173	417.4862	201.9313
10	-0.66053	21.23136	-14.8148	0	137.7689	-137.769	-0.02268	55.70208	-0.99792	0	91.0455	77.0385	0	308.6022	308.602224	-0.68321	305.7478	232.0592
11	3.019571	12.92754	-13.305	34.49385	68.78115	-119.179	0.2268	58.401	-0.9072	-19.2885	129.4965	66.6435	-77.2662	462.672	266.961744	-58.8145	192.34	200.2137
12	5.850419	6.794035	-7.83201	59.69295	18.38295	-68.7812	0.43092	60.01128	-1.90512	-33.3795	157.6785	38.4615	-133.712	575.564	154.069776	-101.117	109.1546	114.013
13	6.794035	4.529357	0	68.78115	0	0	0.49896	60.5556	0	-38.4615	167.958	0	-154.07	616.7418	0	-116.457	78.97318	0
															Maksimum	137.2805	496.9493	232.0592

Sumber : Perhitungan

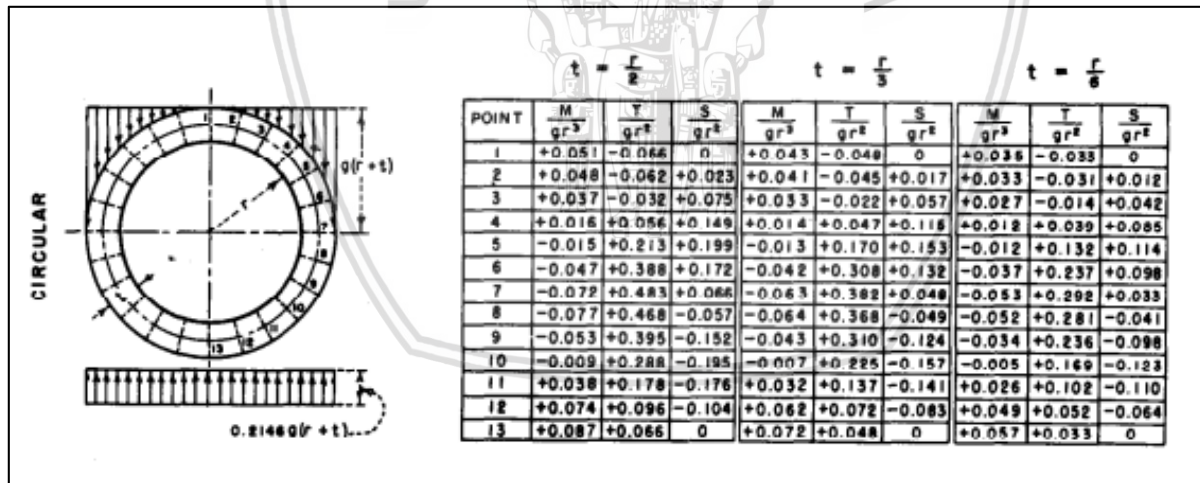
Nilai Momen Maksimum Terjadi pada Titik 7 dengan nilai Momen = 137.290 tm, Normal = 496.949 t, Lintang = 232.059 t

4.6.4. Kondisi Grouting Gempa

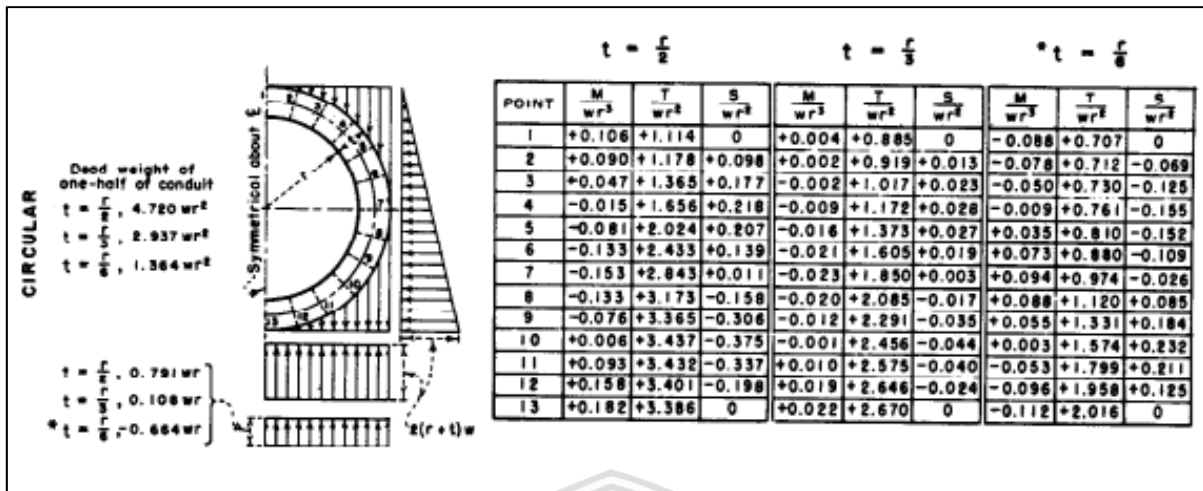
Pada Kondisi Grouting Gempa ini ada beberapa tekanan yang bekerja, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.17 . dan pada perhitungan momen,normal,dan lintang menggunakan koefisien dari pada gambar berikut:



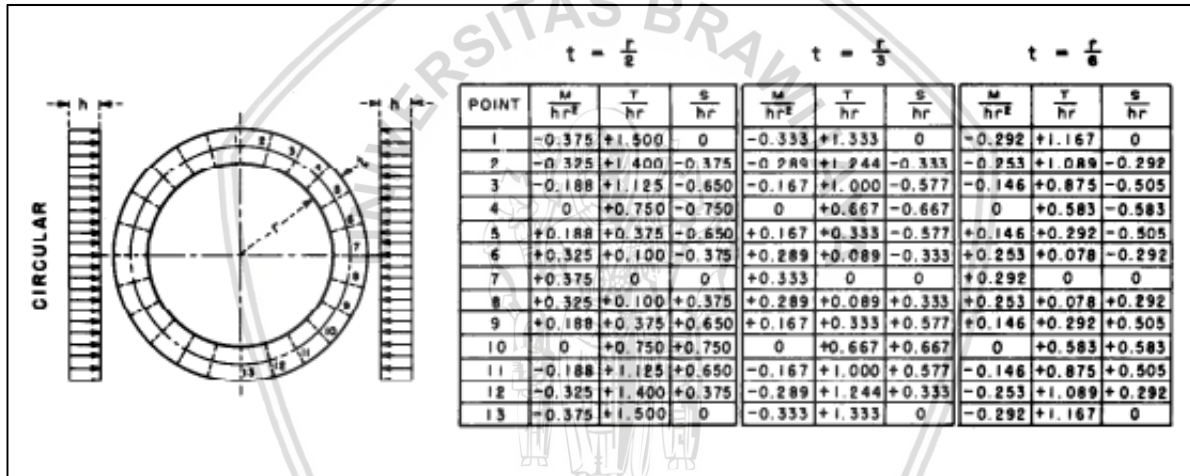
Gambar 4.35. Beban Vertikal Merata
Sumber: Philips., & Allen,. 1986:2



Gambar 4.36. Beban Batuan
Sumber: Philips., & Allen,. 1986:2



Gambar 4.37. Berat Sediri
 Sumber: Philips., & Allen,. 1986:2



Gambar 4.38. Beban Merata Horizontal
 Sumber: Philips., & Allen,. 1986:2

Tabel 4.15.
Kondisi *Grouting* Gempa

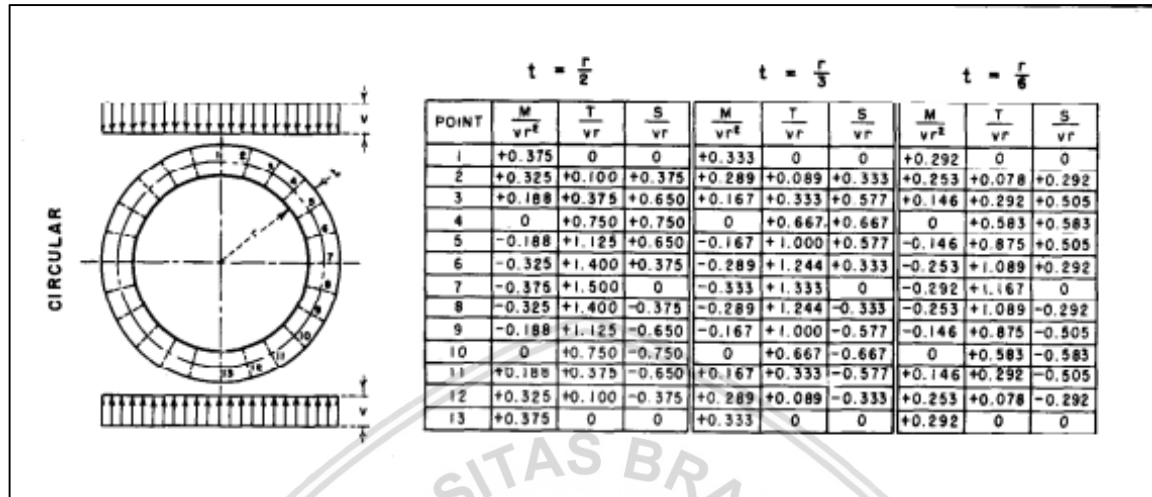
Point	Tekanan Vertikal												Tekanan Horizontal			Total		
	Batuan			Air Tanah			Berat Sendiri			Tekanan Grouting			Batuan Horizontal G			Momen	Normal	Lintang
	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang			
1	2.533573	-2.82817	0	28.65881	0	0	0.06804	15.05385	0	0	10.49738	0	-17.3092	69.28867	0	13.95125	5.413877	0
2	2.415732	-2.65141	1.001645	24.87206	7.659563	28.65881	0.11907	15.63219	0.22113	0	10.49738	0	-15.0221	64.6625	-17.309174	12.38479	16.11564	12.57241
3	1.94437	-1.29625	3.358457	14.37244	28.65881	49.65806	-0.11907	17.29917	0.39123	0	10.49738	0	-8.68058	51.9795	-29.992172	7.517161	46.47853	23.41558
4	0.824884	2.769254	6.775835	0	57.40369	57.40369	-0.15309	20.03778	0.47628	0	10.50525	0	0	34.67033	-34.670327	0.671794	90.71597	29.98548
5	-0.76596	10.01645	9.014806	-14.3724	86.0625	49.65806	-0.27216	23.35473	0.45927	0	10.49738	0	8.680577	17.30917	-29.992172	-6.72998	138.6116	29.13997
6	-2.47465	18.14745	7.77748	-24.8721	107.0618	28.65881	-0.35721	27.30105	0.32319	0	10.49738	0	15.02208	4.626176	-17.309174	-12.6818	178.0297	19.45031
7	-3.71198	22.50755	2.828174	-28.6588	114.7213	0	-0.39123	31.4685	0.05103	0	10.49738	0	17.30917	0	0	-15.4528	196.5039	2.879204
8	-7.69991	44.27446	-5.89524	-44.7697	192.7112	-58.402	-4.131	47.2878	-0.38556	0	10.49738	-0.3465	15.02208	4.626176	17.3091735	-41.5785	309.7929	-47.7201
9	-5.17337	37.29642	-14.9186	-25.8704	154.9125	-89.3845	-2.7216	51.95988	-0.7938	0	10.49738	0	8.680577	17.30917	29.9921715	-25.0848	263.3468	-75.1047
10	-0.84218	27.06998	-18.8888	0	103.3266	-103.327	-0.02268	55.70208	-0.99792	0	10.50525	0	0	34.67033	34.6703265	-0.86486	196.604	-88.5431
11	3.849953	16.48261	-16.9639	25.87039	51.58586	-89.3845	0.2268	58.401	-0.9072	0	10.49738	0	-8.68058	51.9795	29.9921715	21.26656	128.2863	-77.2634
12	7.459285	8.662395	-9.98582	44.76971	13.78721	-51.5859	0.43092	60.01128	-1.90512	0	10.49738	0	-15.0221	64.6625	17.3091735	37.63784	77.93619	-46.1676
13	8.662395	5.77493	0	51.58586	0	0	0.49896	60.5556	0	0	10.49738	0	-17.3092	69.28867	0	43.43804	59.51873	0
															Maksimum	43.43804	309.7929	29.98548

Sumber: Perhitungan

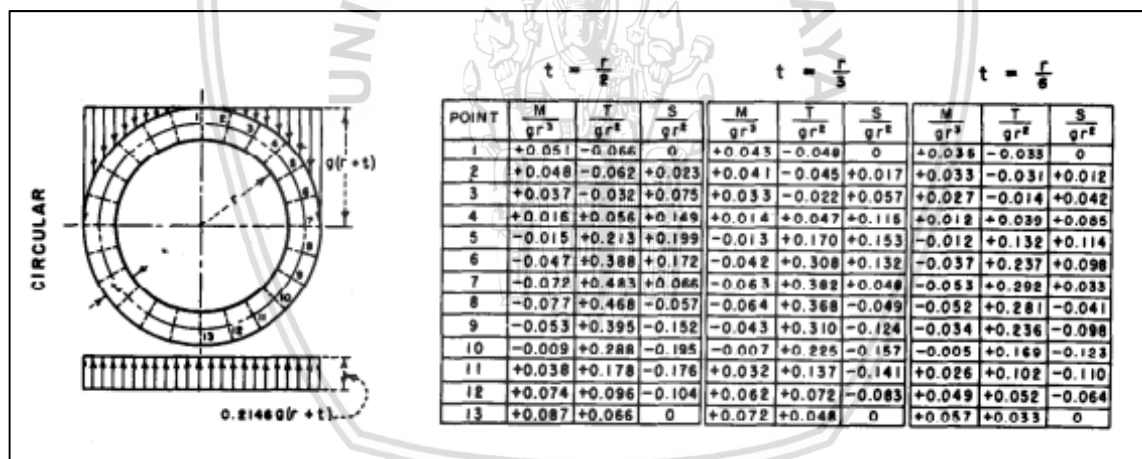
Nilai Momen Maksimum Terjadi pada Titik 13 dengan nilai Momen = 43.438tm, Normal = 309.792 t, Lintang = 29.985 t

4.6.5. Kondisi Pengisian Normal

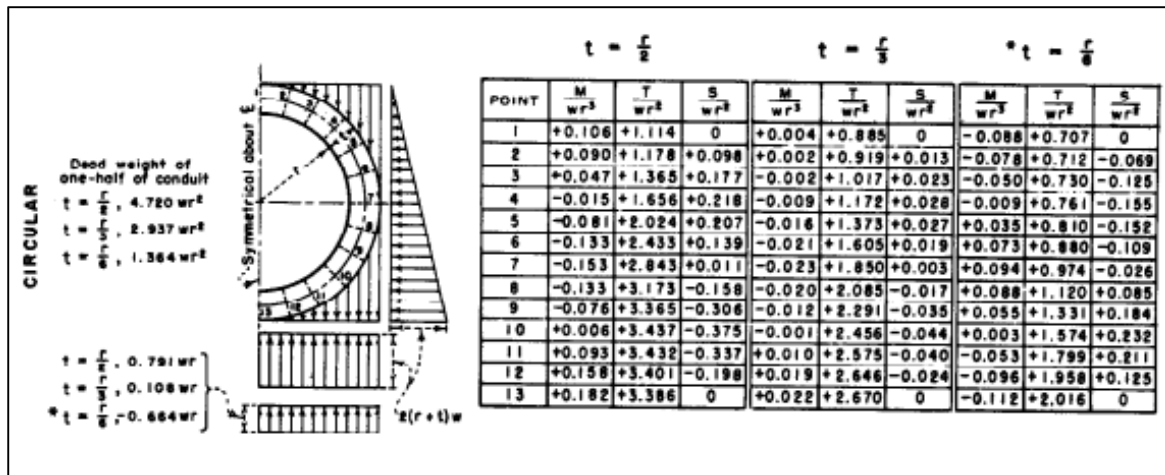
Pada Kondisi Pengisian Normal ini ada beberapa tekanan yang bekerja, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.18. dan pada perhitungan momen, normal, dan lintang menggunakan koefisien dari pada gambar berikut:



Gambar 4.39. Beban Vertikal Merata
Sumber: Philips., & Allen., 1986:2

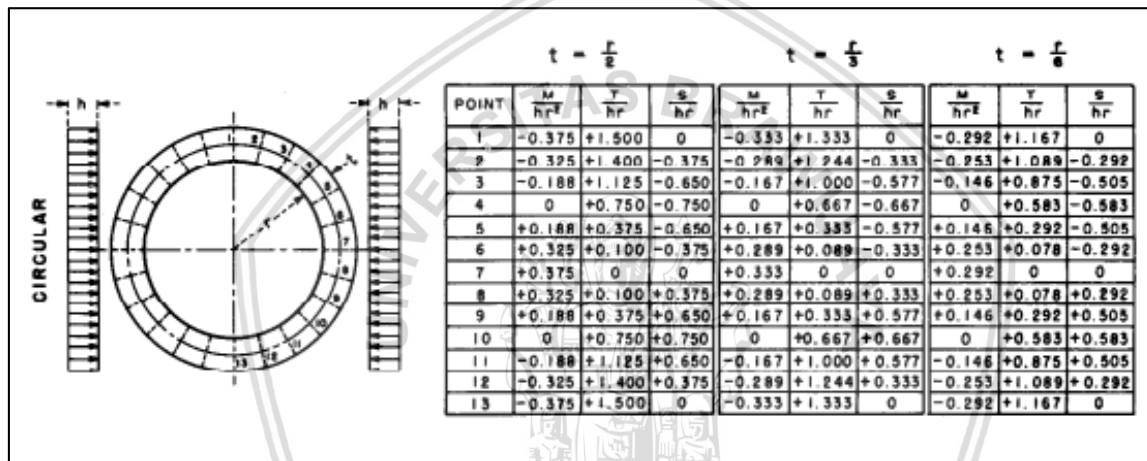


Gambar 4.40. Beban Batuan
Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



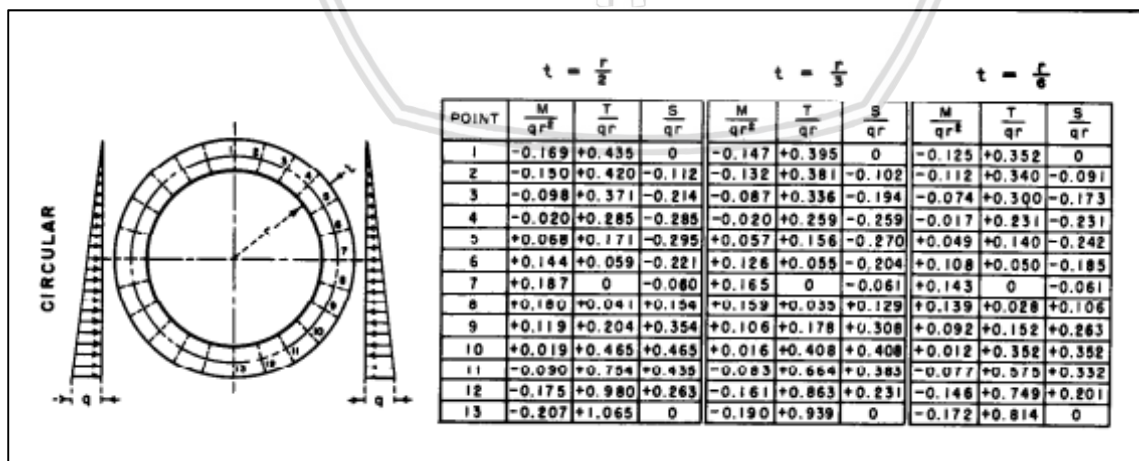
Gambar 4.41. Berat Sediri

Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.42. Beban Merata Horizontal

Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.43. Beban Segitiga Horizontal

Sumber: Philips., & Allen., 1986:2

Tabel 4.16.
Kondisi Pengisian Normal

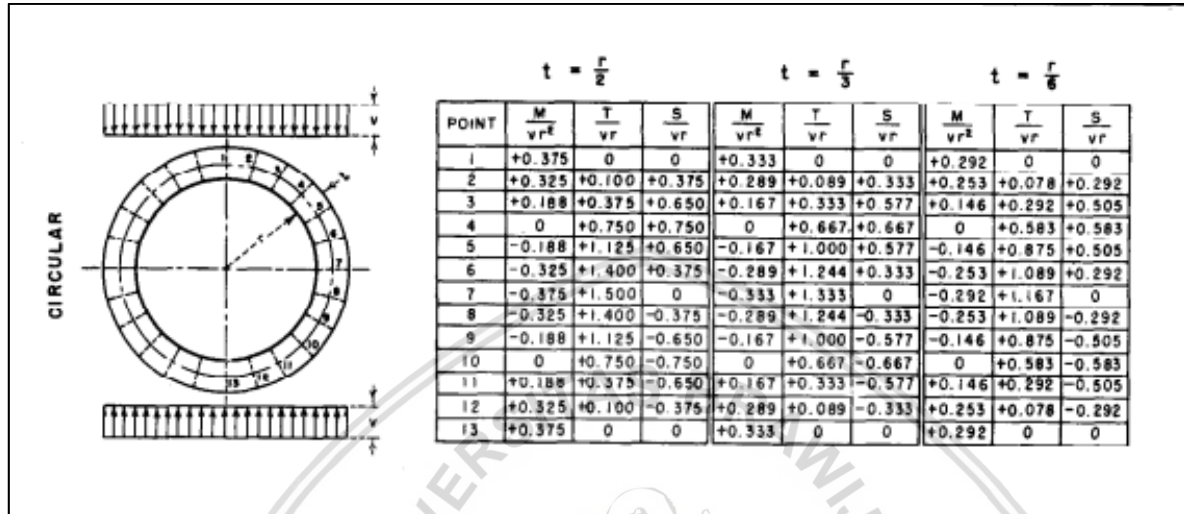
Point	Tekanan Vertikal									Tekanan Horizontal						Total		
	Batuan			Air Tanah			Berat Sendiri			Air Tanah Horizontal			Batuan Horizontal N			Momen	Normal	Lintang
	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang			
1	3.378097	-3.7709	0	38.21175	0	0	0.09072	20.0718	0	-4.24575	16.99575	0	-154.07	616.7418	0	-116.635	-120.773	0
2	3.312301	-3.63545	1.373393	33.16275	10.21275	38.21175	0.15876	20.84292	0.29484	-3.70158	15.90958	-4.25876	-133.712	575.564	-154.069776	-100.78	-90.3824	-118.449
3	2.88218	-1.92145	4.97831	19.16325	38.21175	66.21075	-0.15876	23.06556	0.52164	-2.17362	12.92136	-7.45569	-77.2662	462.672	-266.961744	-57.5532	-4.98901	-202.707
4	1.369684	4.598225	11.25098	0	76.53825	76.53825	-0.20412	26.71704	0.63504	-0.02533	8.832274	-8.83227	0	308.6022	-308.602224	1.140234	116.6858	-229.01
5	-1.45164	18.98297	17.08467	-19.1633	114.75	66.21075	-0.36288	31.13964	0.61236	2.25396	4.587062	-7.94748	77.26622	154.0698	-266.961744	58.54242	246.7259	-191.001
6	-0.53764	3.942708	1.689732	-33.1628	142.749	38.21175	-0.47628	36.4014	0.43092	4.097835	1.315065	-4.91455	133.7122	41.17781	-154.069776	103.6334	318.1204	-118.652
7	-16.5174	100.1531	12.58468	-38.2118	152.9618	0	-0.52164	41.958	0.06804	4.984026	0	-0.27294	154.0698	0	0	103.803	449.1426	12.37978
8	-6.03914	34.72507	-4.62372	-59.693	256.9482	-77.8694	-4.131	47.2878	-0.38556	4.532681	1.321402	4.933694	133.7122	41.17781	154.069776	68.3818	473.9947	76.12484
9	-4.05755	29.2521	-11.7008	-34.4939	206.55	-119.179	-2.7216	51.95988	-0.7938	2.860952	5.474457	9.482828	77.26622	154.0698	266.961744	38.85418	370.5027	144.7706
10	-0.66053	21.23136	-14.8148	0	137.7689	-137.769	-0.02268	55.70208	-0.99792	0.125174	11.6962	11.6962	0	308.6022	308.602224	-0.55804	226.3985	166.7169
11	3.019571	12.92754	-13.305	34.49385	68.78115	-119.179	0.2268	58.401	-0.9072	-1.38932	18.66943	10.77112	-77.2662	462.672	266.961744	-40.9153	81.51289	144.3413
12	5.850419	6.794035	-7.83201	59.69295	18.38295	-68.7812	0.43092	60.01128	-1.90512	-2.1341	24.17286	6.470592	-133.712	575.564	154.069776	-69.872	-24.3511	82.02208
13	6.794035	4.529357	0	68.78115	0	0	0.49896	60.5556	0	-2.30775	26.57355	0	-154.07	616.7418	0	-80.3034	-62.4113	0
													Maksimum			103.803	473.9947	166.7169

Sumber : Perhitungan

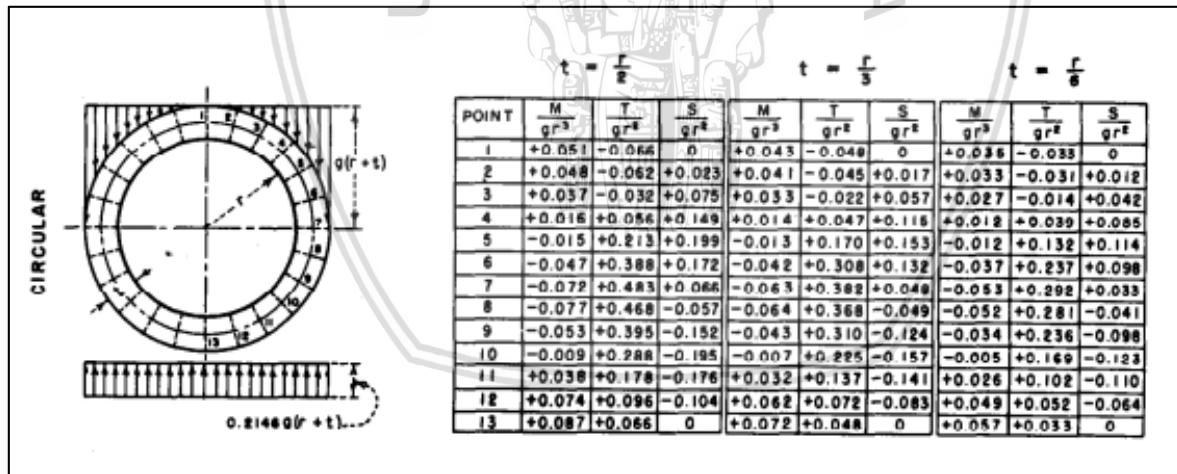
Nilai Momen Maksimum Terjadi pada Titik 6 dengan nilai Momen = 103.803 tm, Normal = 473.994 t, Lintang = 166.716 t

4.6.6. Kondisi Pengisian Gempa

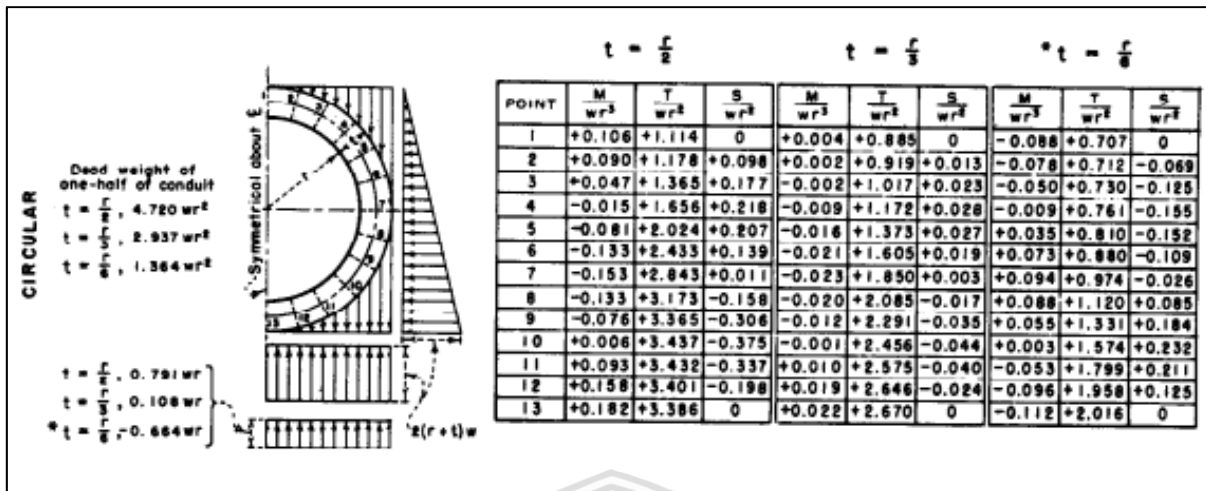
Pada Kondisi Pengisian Gempa ini ada beberapa tekanan yang bekerja, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.19. dan pada perhitungan momen, normal, dan lintang menggunakan koefisien dari pada gambar berikut:



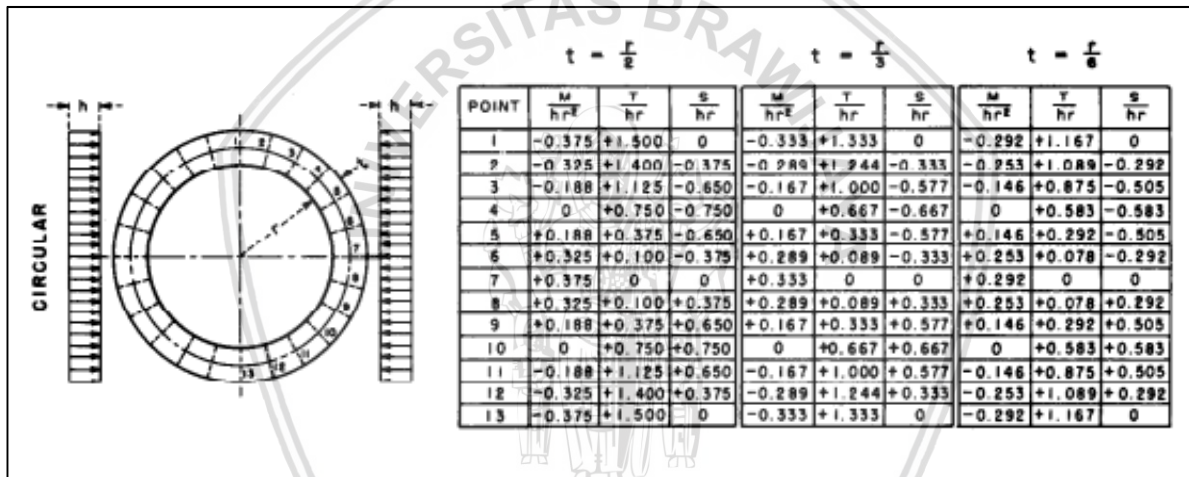
Gambar 4.44. Beban Vertikal Merata
Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



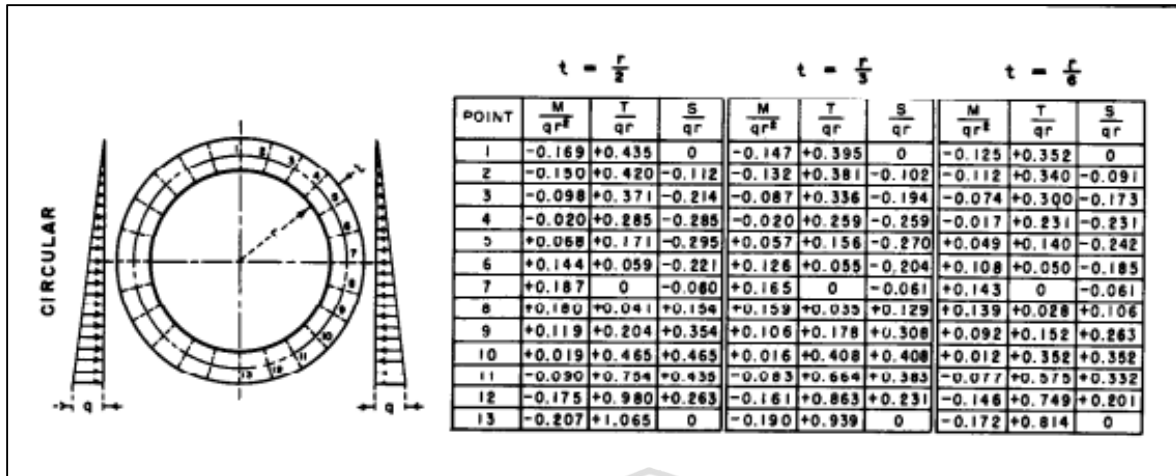
Gambar 4.45. Beban Batuan
Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.46. Berat Sediri
 Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.47. Beban Merata Horizontal
 Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.48. Beban Segitiga Horizontal
Sumber: Philips., & Allen,. 1986:2



Tabel 4.17.
Kondisi Pengisian Gempa

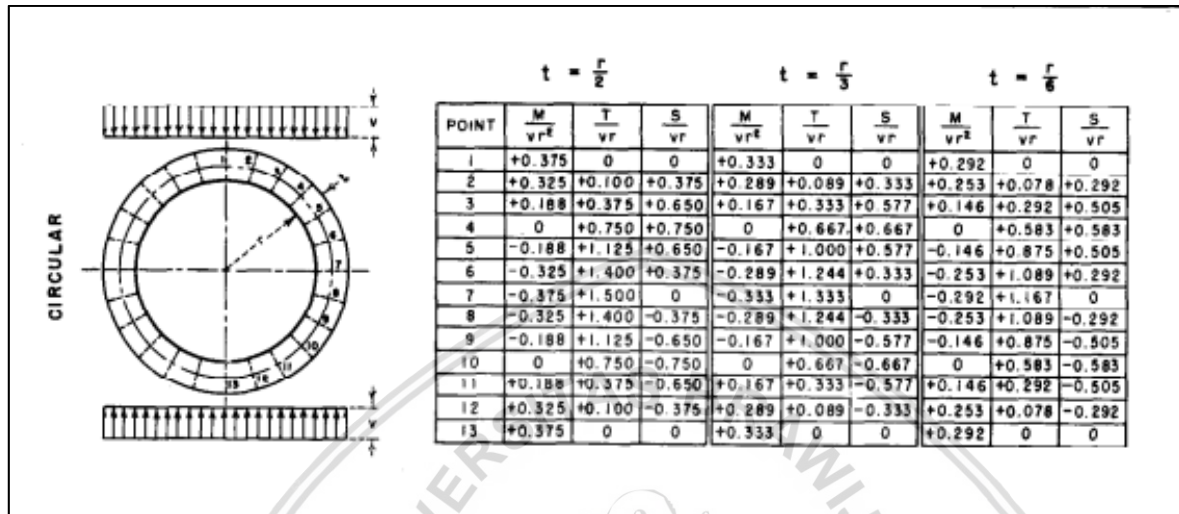
Point	Tekanan Vertikal									Tekanan Horizontal						Total		
	Batuan			Air Tanah			Berat Sendiri			Air Tanah Horizontal			Batuan Horizontal G			Momen	Normal	Lintang
	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang			
1	2.533573	-2.82817	0	28.65881	0	0	0.06804	15.05385	0	-28.6588	114.7213	0	-17.3092	69.28867	0	-14.7076	109.6378	0
2	2.415732	-2.65141	1.001645	24.87206	7.659563	28.65881	0.11907	15.63219	0.22113	-24.9857	107.3896	-28.7466	-15.0221	64.6625	-17.3091735	-12.6009	113.0079	-16.1742
3	1.94437	-1.29625	3.358457	14.37244	28.65881	49.65806	-0.11907	17.29917	0.39123	-14.6719	87.21918	-50.3259	-8.68058	51.9795	-29.9921715	-7.15477	123.2003	-26.9103
4	0.824884	2.769254	6.775835	0	57.40369	57.40369	-0.15309	20.03778	0.47628	-0.17098	59.61785	-59.6178	0	34.67033	-34.6703265	0.500817	139.8286	-29.6324
5	-0.76596	10.01645	9.014806	-14.3724	86.0625	49.65806	-0.27216	23.35473	0.45927	15.21423	30.96267	-53.6455	8.680577	17.30917	-29.9921715	8.484247	159.0769	-24.5055
6	-2.47465	18.14745	7.77748	-24.8721	107.0618	28.65881	-0.35721	27.30105	0.32319	27.66038	8.876687	-33.1732	15.02208	4.626176	-17.3091735	14.97853	176.409	-13.7229
7	-3.71198	22.50755	2.828174	-28.6588	114.7213	0	-0.39123	31.4685	0.05103	33.64218	0	-1.84233	17.30917	0	0	18.18933	186.0065	1.03687
8	-7.69991	44.27446	-5.89524	-44.7697	192.7112	-58.402	-4.131	47.2878	-0.38556	30.5956	8.91946	33.30244	15.02208	4.626176	17.3091735	-10.9829	308.2149	-14.0712
9	-5.17337	37.29642	-14.9186	-25.8704	154.9125	-89.3845	-2.7216	51.95988	-0.7938	19.31143	36.95259	64.00909	8.680577	17.30917	29.9921715	-5.77336	289.802	-11.0956
10	-0.84218	27.06998	-18.8888	0	103.3266	-103.327	-0.02268	55.70208	-0.99792	0.844927	78.94933	78.94933	0	34.67033	34.6703265	-0.01993	265.048	-9.59373
11	3.849953	16.48261	-16.9639	25.87039	51.58586	-89.3845	0.2268	58.401	-0.9072	-9.37792	126.0186	72.70505	-8.68058	51.9795	29.9921715	11.88864	243.8075	-4.55835
12	7.459285	8.662395	-9.98582	44.76971	13.78721	-51.5859	0.43092	60.01128	-1.90512	-14.4052	163.1668	43.67649	-15.0221	64.6625	17.3091735	23.23265	230.6056	-2.49113
13	8.662395	5.77493	0	51.58586	0	0	0.49896	60.5556	0	-15.5773	179.3715	0	-17.3092	69.28867	0	27.86073	228.3928	0
														Maksimum		27.86073	308.2149	1.03687

Sumber : Perhitungan

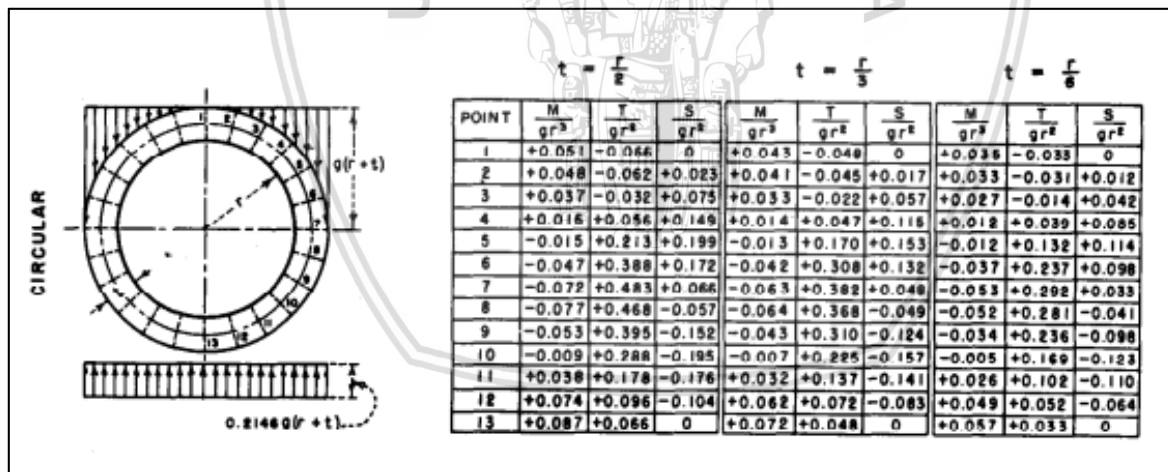
Nilai Momen Maksimum Terjadi pada Titik 13 dengan nilai Momen = 27.860 tm, Normal = 308.214 t, Lintang = 1.0368 t

4.6.7. Kondisi Pengoperasian Normal

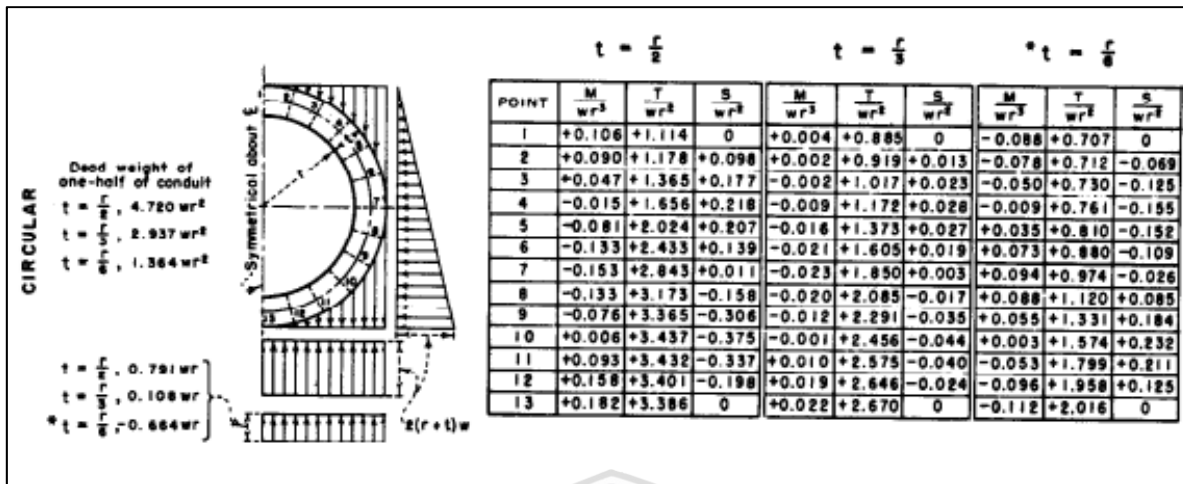
Pada Kondisi Pengoperasian Normal ini ada beberapa tekanan yang bekerja, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.20. dan pada perhitungan momen, normal, dan lintang menggunakan koefisien dari pada gambar berikut:



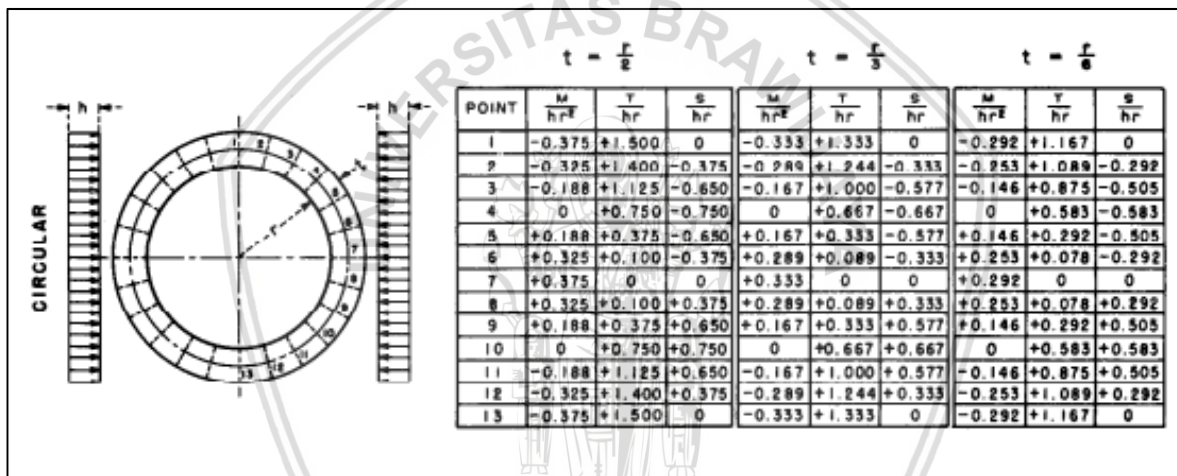
Gambar 4.49. Beban Vertikal Merata
Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



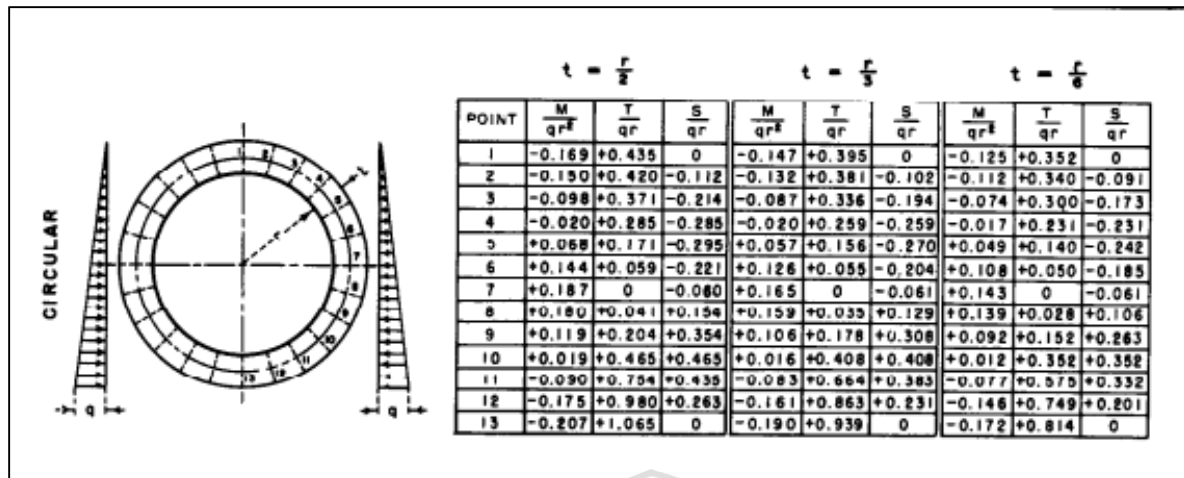
Gambar 4.50. Beban Batuan
Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



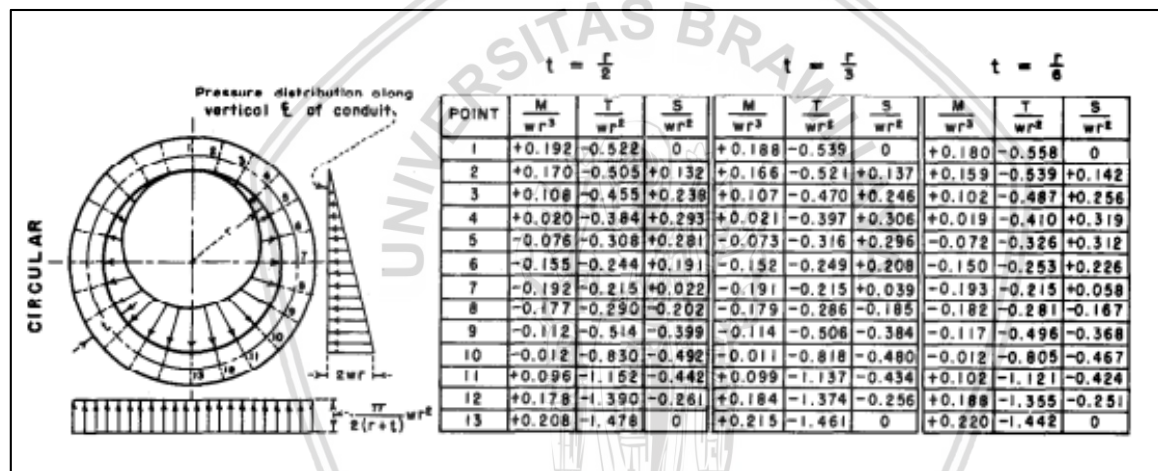
Gambar 4.51. Berat Sediri
 Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.52. Beban Merata Horizontal
 Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.53. Beban Segitiga Horizontal
Sumber: Philips., & Allen,. 1986:2



Gambar 4.54. Tekanan Air dari Dalam
Sumber: Philips., & Allen,. 1986:2

Tabel 4.18.
Kondisi Pengoperasian Normal

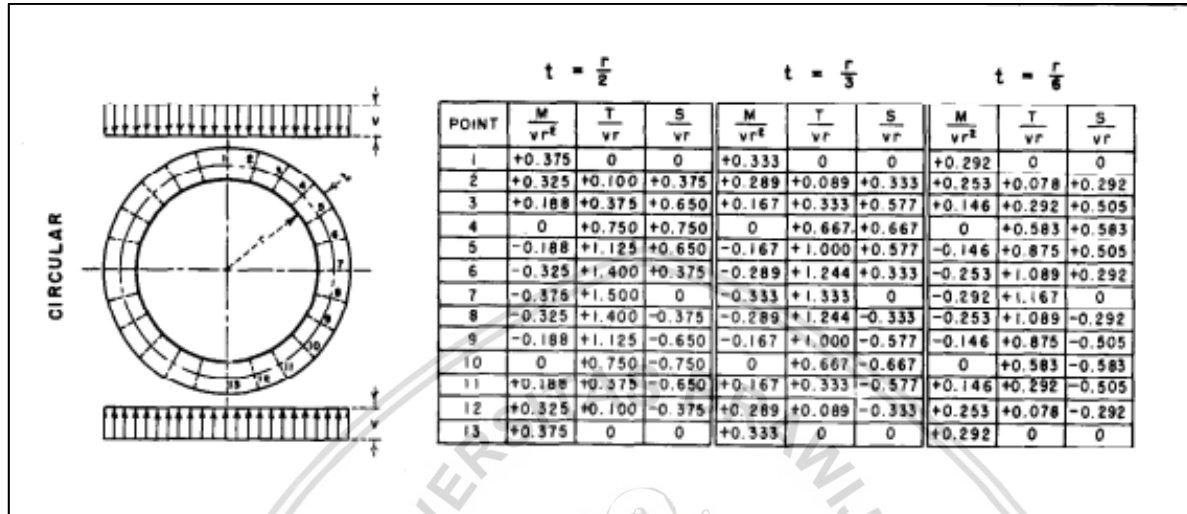
Point	Tekanan Vertikal												Tekanan Horizontal						Total		
	Batuan			Air Tanah			Berat Sendiri			Tekanan Air Dari Dalam			Air Tanah Horizontal			Batuan Horizontal N			Momen	Normal	Lintang
	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang			
1	3.378097	-3.7709	0	38.21175	0	0	0.09072	20.0718	0	15.38874	-43.8743	11.21414	-4.24575	16.99575	0	-154.07	616.7418	0	-101.246	-164.647	11.21414
2	3.312301	-3.63545	1.373393	33.16275	10.21275	38.21175	0.15876	20.84292	0.29484	13.58793	-42.6465	20.13633	-3.70158	15.90958	-4.25876	-133.712	575.564	-154.069776	-87.192	-133.029	-98.3122
3	2.88218	-1.92145	4.97831	19.16325	38.21175	66.21075	-0.15876	23.06556	0.52164	8.758485	-38.4719	25.04763	-2.17362	12.92136	-7.45569	-77.2662	462.672	-266.961744	-48.7947	-43.4609	-177.659
4	1.369684	4.598225	11.25098	0	76.53825	76.53825	-0.20412	26.71704	0.63504	1.718955	-32.4964	24.22908	-0.02533	8.832274	-8.83227	0	308.6022	-308.602224	2.859189	84.18935	-204.781
5	-1.45164	18.98297	17.08467	-19.1633	114.75	66.21075	-0.36288	31.13964	0.61236	-5.97542	-25.8662	17.02584	2.25396	4.587062	-7.94748	77.26622	154.0698	-266.961744	52.567	220.8597	-173.976
6	-0.53764	3.942708	1.689732	-33.1628	142.749	38.21175	-0.47628	36.4014	0.43092	-12.442	-20.3819	3.192345	4.097835	1.315065	-4.91455	133.7122	41.17781	-154.069776	91.19141	297.7385	-115.46
7	-16.5174	100.1531	12.58468	-38.2118	152.9618	0	-0.52164	41.958	0.06804	-15.6343	-17.5988	-15.1432	4.984026	0	-0.27294	154.0698	0	0	88.16872	431.5438	-2.7634
8	-6.03914	34.72507	-4.62372	-59.693	256.9482	-77.8694	-4.131	47.2878	-0.38556	-4.10446	-6.55796	-4.24204	4.532681	1.321402	4.933694	133.7122	41.17781	154.069776	64.27734	467.4367	71.8828
9	-4.05755	29.2521	-11.7008	-34.4939	206.55	-119.179	-2.7216	51.95988	-0.7938	-2.61401	-11.6025	-8.8051	2.860952	5.474457	9.482828	77.26622	154.0698	266.961744	36.24016	358.9001	135.9655
10	-0.66053	21.23136	-14.8148	0	137.7689	-137.769	-0.02268	55.70208	-0.99792	-0.25223	-18.7567	-11.0064	0.125174	11.6962	11.6962	0	308.6022	308.602224	-0.81027	207.6418	155.7105
11	3.019571	12.92754	-13.305	34.49385	68.78115	-119.179	0.2268	58.401	-0.9072	2.270064	-26.0713	-9.95159	-1.38932	18.66943	10.77112	-77.2662	462.672	266.961744	-38.6453	55.44156	134.3897
12	5.850419	6.794035	-7.83201	59.69295	18.38295	-68.7812	0.43092	60.01128	-1.90512	4.219108	-31.5057	-5.73248	-2.1341	24.17286	6.470592	-133.712	575.564	154.069776	-65.6529	-55.8568	76.2896
13	6.794035	4.529357	0	68.78115	0	0	0.49896	60.5556	0	4.929936	-33.5006	0	-2.30775	26.57355	0	-154.07	616.7418	0	-75.3734	-95.9119	0
																		Maksimum	91.19141	467.4367	155.7105

Sumber : Perhitungan

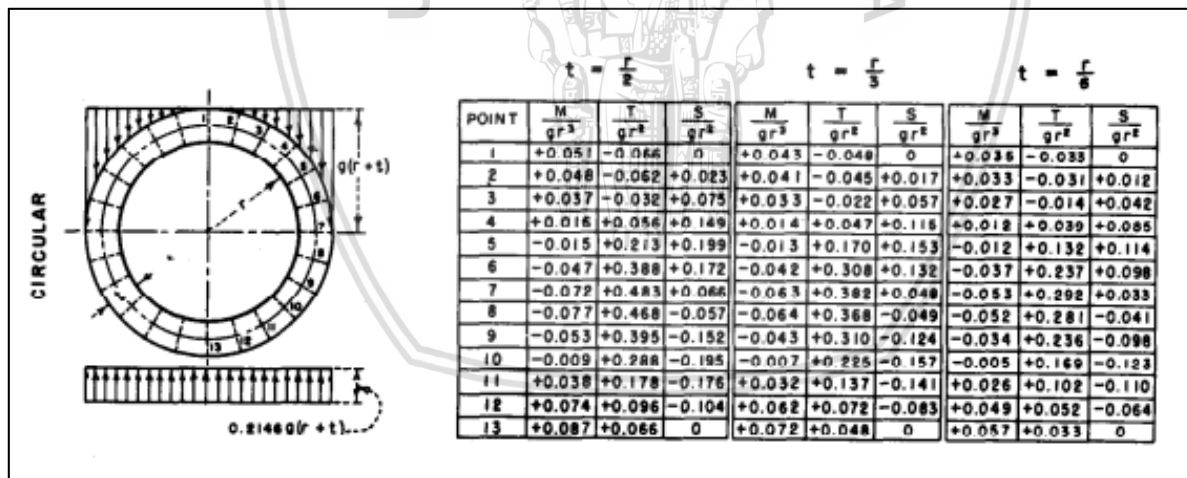
Nilai Momen Maksimum Terjadi pada Titik 6 dengan nilai Momen = 91.191 tm, Normal = 467.436 t, Lintang = 155.71 t

4.6.8. Kondisi Pengoperasian Gempa

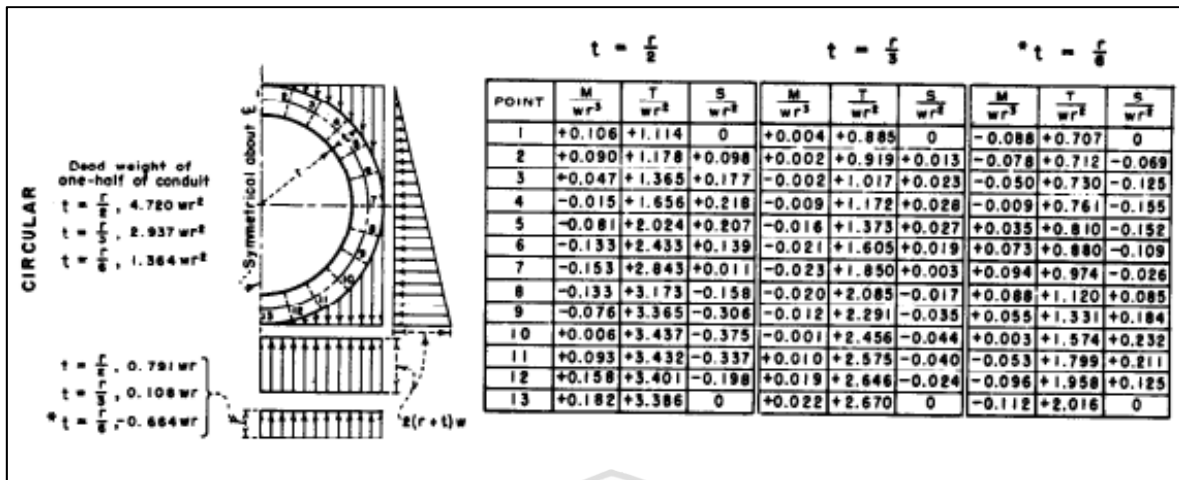
Pada Kondisi Pengoperasian Gempa ini ada beberapa tekanan yang bekerja, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.21. dan pada perhitungan momen, normal, dan lintang menggunakan koefisien dari pada gambar berikut:



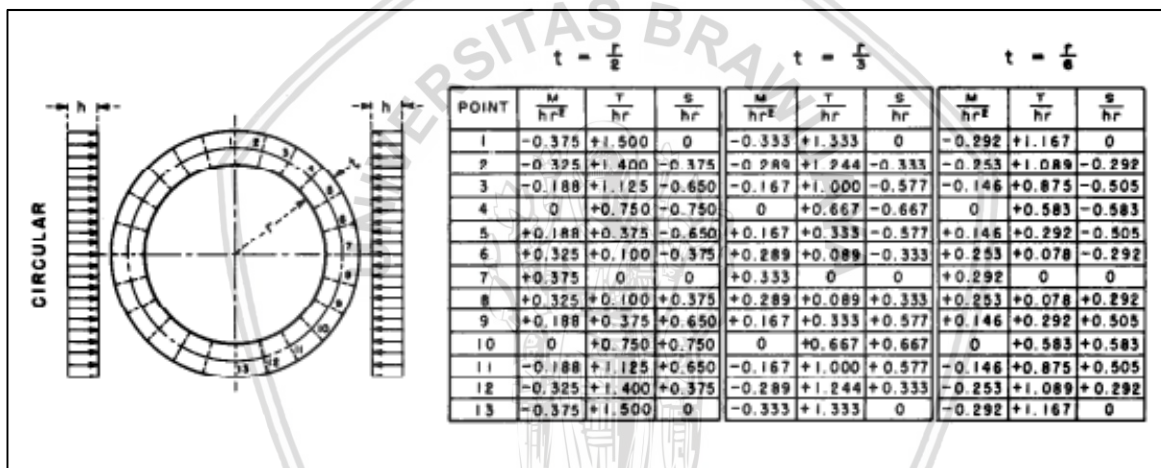
Gambar 4.55. Beban Vertikal Merata
Sumber: Philips., & Allen,. 1986:2



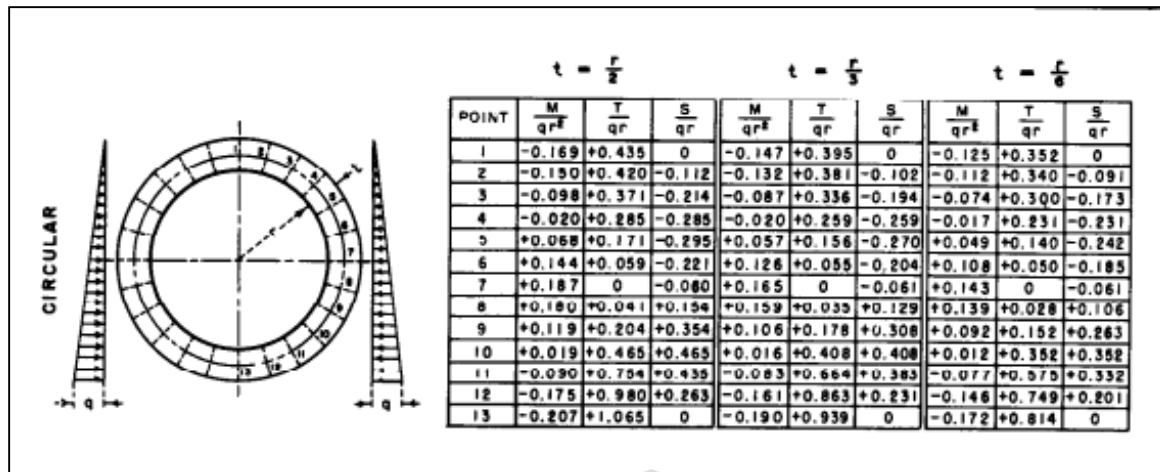
Gambar 4.56. Beban Batuan
Sumber: Philips., & Allen,. 1986:2



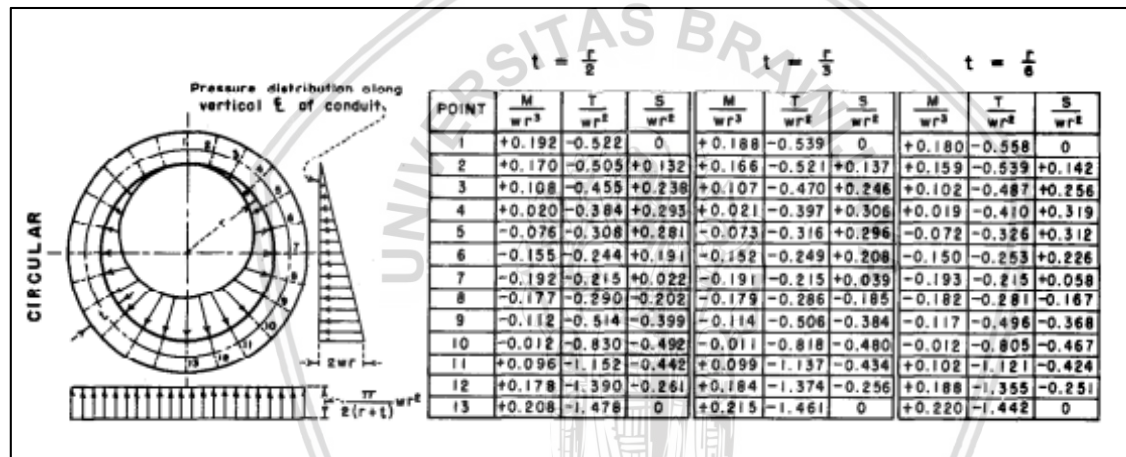
Gambar 4.57. Berat Sediri
 Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.58. Beban Merata Horizontal
 Sumber: Philips., & Allen., 1986:2



Gambar 4.59. Beban Segitiga Horizontal
Sumber: Philips., & Allen,. 1986:2



Gambar 4.60. Tekanan Air dari Dalam
Sumber: Philips., & Allen,. 1986:2

Tabel 4.19.
Kondisi Pengoperasian Gempa

Point	Tekanan Vertikal										Tekanan Horizontal										Total		
	Batuan			Air Tanah			Berat Sendiri			Tekanan Air Dari Dalam			Air Tanah Horizontal			Batuan Horizontal G			Momen	Normal	Lintang		
	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang	Momen	Normal	Lintang					
1	2.533573	-2.82817	0	28.65881	0	0	0.06804	15.05385	0	11.54156	-32.9057	8.410601	-28.6588	114.7213	0	-17.3092	69.28867	0	-3.16601	76.7321	8.410601		
2	2.415732	-2.65141	1.001645	24.87206	7.659563	28.65881	0.11907	15.63219	0.22113	10.19095	-31.9848	15.10225	-24.9857	107.3896	-28.7466	-15.0221	64.6625	-17.3091735	-2.40993	81.02307	-1.07193		
3	1.94437	-1.29625	3.358457	14.37244	28.65881	49.65806	-0.11907	17.29917	0.39123	6.568864	-28.8539	18.78572	-14.6719	87.21918	-50.3259	-8.68058	51.9795	-29.9921715	-0.58591	94.34645	-8.12461		
4	0.824884	2.769254	6.775835	0	57.40369	57.40369	-0.15309	20.03778	0.47628	1.289216	-24.3723	18.17181	-0.17098	59.61785	-59.6178	0	34.67033	-34.6703265	1.790033	115.4562	-11.4606		
5	-0.76596	10.01645	9.014806	-14.3724	86.0625	49.65806	-0.27216	23.35473	0.45927	-4.48156	-19.3996	12.76938	15.21423	30.96267	-53.6455	8.680577	17.30917	-29.9921715	4.002686	139.6773	-11.7362		
6	-2.47465	18.14745	7.77748	-24.8721	107.0618	28.65881	-0.35721	27.30105	0.32319	-9.33147	-15.2864	2.394259	27.66038	8.876687	-33.1732	15.02208	4.626176	-17.3091735	5.647065	161.1226	-11.3287		
7	-3.71198	22.50755	2.828174	-28.6588	114.7213	0	-0.39123	31.4685	0.05103	-11.7257	-13.1991	-11.3574	33.64218	0	-1.84233	17.30917	0	0	6.463599	172.8074	-10.3205		
8	-7.69991	44.27446	-5.89524	-44.7697	192.7112	-58.402	-4.131	47.2878	-0.38556	-5.23318	-8.3614	-5.4086	30.5956	8.91946	33.30244	15.02208	4.626176	17.3091735	-16.2161	299.8535	-19.4798		
9	-5.17337	37.29642	-14.9186	-25.8704	154.9125	-89.3845	-2.7216	51.95988	-0.7938	-3.33287	-14.7932	-11.2265	19.31143	36.95259	64.00909	8.680577	17.30917	29.9921715	-9.10623	275.0087	-22.3221		
10	-0.84218	27.06998	-18.8888	0	103.3266	-103.327	-0.02268	55.70208	-0.99792	-0.32159	-23.9148	-14.0331	0.844927	78.94933	78.94933	0	34.67033	34.6703265	-0.34152	241.1333	-23.6269		
11	3.849953	16.48261	-16.9639	25.87039	51.58586	-89.3845	0.2268	58.401	-0.9072	2.894331	-33.241	-12.6883	-9.37792	126.0186	72.70505	-8.68058	51.9795	29.9921715	14.78297	210.5666	-17.2466		
12	7.459285	8.662395	-9.98582	44.76971	13.78721	-51.5859	0.43092	60.01128	-1.90512	5.379363	-40.1698	-7.30892	-14.4052	163.1668	43.67649	-15.0221	64.6625	17.3091735	28.61201	190.4358	-9.80005		
13	8.662395	5.77493	0	51.58586	0	0	0.49896	60.5556	0	6.285669	-42.7133	0	-15.5773	179.3715	0	-17.3092	69.28867	0	34.1464	185.6795	0		
																			Maksimum	34.1464	299.8535	8.410601	

Sumber : Perhitungan

Nilai Momen Maksimum Terjadi pada Titik 13 dengan nilai Momen = 34.146 tm, Normal = 299.853 t, Lintang = 8.410 t

4.6.9. Rekapitulasi Momen, Normal, dan Lintang Maksimum

Dari perhitungan oleh tabel *Beegs Deformation Analysis of Single Barrel Conduit* maka diperoleh hasil maksimum seperti pada Tabel 4.20. dibawah ini

Tabel 4.20.

Ringkasan Maksimum Momen, Normal, dan Lintang

No	Kondisi	Momen	Normal	Lintang
		t/m	t/m	t/m
1	Kondisi Normal	99.5355	472.6733	155.0207
2	Kondisi Gempa	82.7903	384.5576	108.2383
3	Kondisi Grouting Normal	137.2805	496.9493	232.0592
4	Kondisi Grouting Gempa	43.4380	309.7929	29.9855
5	Kondisi Pengisian Normal	103.8030	473.9947	166.7169
6	Kondisi Pengisian Gempa	27.8607	308.2149	1.0369
7	Kondisi Pengoperasian Normal	91.1914	467.4367	155.7105
8	Kondisi Pengoperasian Gempa	34.1464	299.8535	8.4106
MAX		137.2805	496.9493	232.0592

Sumber : Perhitungan

4.6.10. Perhitungan Menggunakan Software STAAD PRO

Untuk penentuan gaya maksimum dan minimum yang meliputi Gaya Geser, Gaya Normal, dan Momen Terowongan Pelimpah pada laporan skripsi ini dibantu oleh software Staad Pro yang mana digunakan untuk menghitung penulangan terowongan pelengkap. Dan gaya-gaya tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.12. dan 4.13. berikut:

Tabel 4.21.

Ringkasan Maksimum dan Minimum Gaya Geser, Gaya Normal, dan Momen Terowongan Pelengkap

	Plate	L/C	Shear		Membrane			Bending Moment		
			SQX (local) psi	SQY (local) psi	SX (local) psi	SY (local) psi	SXY (local) psi	Mx lb-in/in	My lb-in/in	Mxy lb-in/in
Max Qx	50	13 KONDISI PENGISIAN NORMAL	109.898	0.093	-518.117	190.421	0.061	-24297.932	-61512.589	-56.965
Min Qx	72	13 KONDISI PENGISIAN NORMAL	-163.972	-0.111	-144.028	518.906	-0.133	-56101.879	-42567.692	76.356
Max Qy	49	12 KONDISI GROUTING GEMPA	-0.000	93.980	-517.596	-639.199	0.000	5285.560	-25004.543	0.000
Min Qy	49	6 TEKanan BATUAN HORIZONTAL NORMAL	0.000	-103.991	14.215	27.958	-0.000	19226.301	-25936.979	-0.000
Max Sx	49	8 REAKSI PONDASI	0.000	1.119	107.983	-0.753	-0.000	-14225.245	639.878	-0.000
Min Sx	60	11 KONDISI GROUTING NORMAL	-40.308	0.000	-870.947	-143.115	-0.000	48852.001	12373.374	-0.000
Max Sy	72	15 KONDISI PENGOPERASIAN NORMAL	-154.419	-0.111	-69.566	602.312	-0.133	-48134.411	-50127.377	76.356
Min Sy	49	11 KONDISI GROUTING NORMAL	-0.000	-30.070	-668.807	-807.652	0.000	36131.355	-73252.937	0.000
Max Sxy	61	13 KONDISI PENGISIAN NORMAL	-119.770	-0.086	-181.664	-18.571	0.133	17608.299	16624.170	88.956
Min Sxy	67	13 KONDISI PENGISIAN NORMAL	38.605	-0.006	-297.846	-17.347	-0.133	-20199.701	-10078.835	-12.895
Max Mx	49	15 KONDISI PENGOPERASIAN NORMAL	-0.193	-71.293	-713.279	-683.302	-0.061	55854.923	-67364.578	41.467
Min Mx	72	13 KONDISI PENGISIAN NORMAL	-163.972	-0.111	-144.028	518.906	-0.133	-56101.879	-42567.692	76.356
Max My	62	13 KONDISI PENGISIAN NORMAL	-51.501	-0.104	-155.108	22.903	0.133	-21999.594	28056.925	42.587
Min My	49	11 KONDISI GROUTING NORMAL	-0.000	-30.070	-668.807	-807.652	0.000	36131.355	-73252.937	0.000
Max Mxy	61	13 KONDISI PENGISIAN NORMAL	-119.770	-0.086	-181.664	-18.571	0.133	17608.299	16624.170	88.956
Min Mxy	50	13 KONDISI PENGISIAN NORMAL	109.898	0.093	-518.117	190.421	0.061	-24297.932	-61512.589	-56.965

Sumber: Hasil Perhitungan

Menurut Perhitungan Momen menggunakan Tabel *Beegs Deformation Analysis of Single Barrel Conduit* dan Menggunakan STAADPRO, maka diperoleh rekapitulasi momen maksimum pada arah atas, bawah, dan samping seperti pada Tabel 4.22. dan 4.23. sebagai berikut:

Tabel 4.22.

Rekapitulasi Momen Maksimum menggunakan tabel *Beegs Deformation Analysis of Single Barrel Conduit*

Momen Maksimum Tabel Beegs	Atas tm	Bawah tm	Samping tm
Kondisi Normal	41.6805672	76.074145	154.0698
Kondisi Gempa	31.2604254	60.747218	115.5523
Kondisi Grouting Normal	3.25431083	37.612645	192.5313
Kondisi Grouting Gempa	31.2604254	60.747218	17.30917
Kondisi Pengisian Normal	41.6805672	76.074145	159.0538
Kondisi Pengisian Gempa	31.2604254	60.747218	50.95135
Kondisi Pengoperasian Normal	57.0693072	81.004082	143.4195
Kondisi Pengoperasian Gempa	42.8019804	67.032886	40.38449
MAX	57.0693072	81.004082	192.5313

Sumber : Perhitungan

Tabel 4.23.

Rekapitulasi Momen Maksimum menggunakan STAADPRO

Momen Maksimum STAADPRO	Atas tm	Bawah tm	Samping tm
Kondisi Normal	0.160146022	0.270046374	0.27004637
Kondisi Gempa	0.024276075	0.130783394	0.13078339
Kondisi Grouting Normal	0.15714185	0.301792551	0.30179255
Kondisi Grouting Gempa	0.022022956	0.127951992	0.12795199
Kondisi Pengisian Normal	0.216563499	0.356322948	0.35632295
Kondisi Pengisian Gempa	0.066589173	0.125827346	0.12582735
Kondisi Pengoperasian Normal	0.185535176	0.296746816	0.29674682
Kondisi Pengoperasian Gempa	0.043317947	0.155737103	0.1557371
MAX	0.216563499	0.356322948	0.35632295

Sumber : Perhitungan

Didapatkan perbedaan hasil dari perhitungan momen maksimum dari perhitungan tabel *Beegs Deformation Analysis of Single Barrel Conduit* yang menggunakan perhitungan 2D dan perhitungan STAADPRO yang menggunakan 3D. Untuk perhitungan penulangan menggunakan hasil momen dari STAADPRO karena pada rumusan masalah studi ini dijelaskan bahwa hasil perhitungan yang dilakukan pada terowongan ini dianalisa dengan program StaadPro yang berupa gaya-gaya dalam pada struktur terowongan.

4.7. Penulangan Terowongan

Beton bertulang adalah beton yang terdiri dari beton dan baja. Sifat kedua bahan ini dapat diketahui dari teknologi beton. Pada sebuah bangunan seperti dalam studi ini yaitu

terowongan, juga diperlukan adanya tulangan untuk menahan tegangan Tarik yang mana tidak dapat ditahan oleh beton.

$$\text{Mu Max Atas} = 0.216 \text{ tm} = 2.16 \text{ KNm}$$

$$\text{Mu Max Bawah} = 0.356 \text{ tm} = 3.56 \text{ KNm}$$

$$\text{Mu Max Samping} = 0.356 \text{ tm} = 3.56 \text{ KNm}$$

4.7.1. Penulangan Utama

4.7.1.1. Penulangan Utama Atas

Plat/cangkang yang menerima aksial dan lentur didesain menggunakan desain analogi balok.

$$\text{Mu Max Atas} = 2.16 \text{ KNm}$$

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

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

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

$$h = 1500 \text{ mm}$$

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

$$d = 1400 \text{ mm}$$

Direncana dengan tulangan D – 25

Batas rasio tulangan maksimum balok adalah $\rho > \rho_{min}$ dimana :

$$\rho_{min} = 1.4/f_y$$

$$= 1.4/400$$

$$= 0.00350$$

$$\rho_{max} = 0.75 \cdot \rho_b$$

$$= 0.75 \cdot \frac{0.85 \cdot \beta \cdot f'_c}{f_y} \cdot \beta \cdot \frac{600}{600 + f_y}$$

$$= 0.75 \cdot \frac{0.85 \cdot 0.85 \cdot 30}{400} \cdot 0.85 \cdot \frac{600}{600 + 400}$$

$$= 0.0207$$

$$R_n = \text{Mu} \cdot 10^6 / \phi \cdot b \cdot d^2$$

$$= 2.16 \cdot 10^6 / 0.6 \cdot 1000 \cdot 1400^2$$

$$= 0.0018 \text{ MPa}$$

$$\omega = 0.85 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2.353 \cdot R_n}{f'_c}} \right)$$

$$= 0.85 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2.353 \cdot 0.0018}{30}} \right)$$

$$= 6.122 \cdot 10^{-5}$$

$$\rho = \omega \cdot \frac{f'c}{f_y}$$

$$= 4.592 \cdot 10^{-6} < \rho_{\min}, \text{ maka dipakai } \rho_{\min}$$

$$\text{As perlu} = \rho_{\min} \cdot b \cdot d$$

$$= 4900 \text{ mm}^2$$

Coba-coba besi tulangan D25, D29, dan D32

$$\text{Luas penampang D25} = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 25^2$$

$$= 490.625 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas penampang D29} = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 29^2$$

$$= 660.185 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas penampang D32} = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 32^2$$

$$= 803.84 \text{ mm}^2$$

Jadi:

1. Memakai D25 membutuhkan jumlah = $\text{As}/490.625$
 $= 9.98 \text{ buah} = 10 \text{ buah}$
 Jarak bersih antar tulangan (Sn) = $b/(\text{As}/490.625) = 100.12 \text{ mm}$
 As ada = $\frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 25^2 \cdot b/\text{Sn}$
 $= 4900 \text{ mm}^2 \geq \text{As perlu (memenuhi)}$
2. Memakai D29 membutuhkan jumlah = $\text{As}/660.185$
 $= 7.422 \text{ buah} = 8 \text{ buah}$
 Jarak bersih antar tulangan (Sn) = $b/(\text{As}/660.185) = 134.73 \text{ mm}$
 As ada = $\frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 29^2 \cdot b/\text{Sn}$
 $= 4900 \text{ mm}^2 \geq \text{As perlu (memenuhi)}$
3. Memakai D32 membutuhkan jumlah = $\text{As}/803.84$
 $= 6.095 \text{ buah} = 7 \text{ buah}$
 Jarak bersih antar tulangan (Sn) = $b/(\text{As}/803.84) = 164 \text{ mm}$
 As ada = $\frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 32^2 \cdot b/\text{Sn}$
 $= 4900 \text{ mm}^2 \geq \text{As perlu (memenuhi)}$

Maka dipakai tulangan : **D25 - 100**

4.7.1.2. Penulangan Utama Bawah

Plat/cangkang yang menerima aksial dan lentur didesain menggunakan desain analogi balok.

Mu Max Bawah = 3.56 KNm

$$f'c = 30 \text{ MPa}$$

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

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

$$h = 1500 \text{ mm}$$

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

$$d = 1400 \text{ mm}$$

Direncana dengan tulangan D – 25

Batas rasio tulangan maksimum balok adalah $\rho > \rho_{\min}$ dimana :

$$\rho_{\min} = 1.4/f_y$$

$$= 1.4/400$$

$$= 0.00350$$

$$\rho_{\max} = 0.75 \cdot \rho_b$$

$$= 0.75 \cdot \frac{0.85 \cdot \beta \cdot f'_c}{f_y} \cdot \beta \cdot \frac{600}{600 + f_y}$$

$$= 0.75 \cdot \frac{0.85 \cdot 0.85 \cdot 30}{400} \cdot 0.85 \cdot \frac{600}{600 + 400}$$

$$= 0.0207$$

$$R_n = M_u \cdot 10^6 / \phi \cdot b \cdot d^2$$

$$= 3.56 \cdot 10^6 / 0.6 \cdot 1000 \cdot 1400^2$$

$$= 0.00302 \text{ MPa}$$

$$\omega = 0.85 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2.353 \cdot R_n}{f'_c}} \right)$$

$$= 0.85 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2.353 \cdot 0.00302}{30}} \right)$$

$$= 1009 \cdot 10^{-4}$$

$$\rho = \omega \cdot \frac{f'_c}{f_y}$$

$$= 7.56 \cdot 10^{-6} < \rho_{\min}, \text{ maka dipakai } \rho_{\min}$$

$$A_s \text{ perlu} = \rho_{\min} \cdot b \cdot d$$

$$= 4900 \text{ mm}^2$$

Coba-coba besi tulangan D25, D29, dan D32

$$\text{Luas penampang D25} = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 25^2$$

$$= 490.625 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas penampang D29} = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 29^2$$

$$= 660.185 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas penampang D32} = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 32^2$$

$$= 803.84 \text{ mm}^2$$

Jadi:

1. Memakai D25 membutuhkan jumlah = $A_s/490.625$
 $= 9.98 \text{ buah} = 10 \text{ buah}$
 Jarak bersih antar tulangan (Sn) = $b/(A_s/490.625) = 100.12 \text{ mm}$
 As ada = $\frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 25^2 \cdot b/S_n$
 $= 4900 \text{ mm}^2 \geq A_s \text{ perlu (memenuhi)}$
2. Memakai D29 membutuhkan jumlah = $A_s/660.185$
 $= 7.422 \text{ buah} = 8 \text{ buah}$
 Jarak bersih antar tulangan (Sn) = $b/(A_s/660.185) = 134.73 \text{ mm}$
 As ada = $\frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 29^2 \cdot b/S_n$
 $= 4900 \text{ mm}^2 \geq A_s \text{ perlu (memenuhi)}$
3. Memakai D32 membutuhkan jumlah = $A_s/803.84$
 $= 6.095 \text{ buah} = 7 \text{ buah}$
 Jarak bersih antar tulangan (Sn) = $b/(A_s/803.84) = 164 \text{ mm}$
 As ada = $\frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 32^2 \cdot b/S_n$
 $= 4900 \text{ mm}^2 \geq A_s \text{ perlu (memenuhi)}$

Maka dipakai tulangan : **D25 - 100**

4.7.1.3. Penulangan Utama Samping

Plat/cangkang yang menerima aksial dan lentur didesain menggunakan desain analogi balok.

Mu Max Bawah = 3.56 KNm

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

$f_y = 400 \text{ MPa}$

$b = 1000 \text{ mm}$

$h = 1500 \text{ mm}$

$d' = 100 \text{ mm}$

$d = 1400 \text{ mm}$

Direncana dengan tulangan D – 25

Batas rasio tulangan maksimum balok adalah $\rho > \rho_{min}$ dimana :

$\rho_{min} = 1.4/f_y$

$= 1.4/400$

$= 0.00350$

$$\begin{aligned}
 \rho_{\max} &= 0.75 \cdot \rho_b \\
 &= 0.75 \cdot \frac{0.85 \cdot \beta \cdot f'c}{f_y} \cdot \beta \cdot \frac{600}{600 + f_y} \\
 &= 0.75 \cdot \frac{0.85 \cdot 0.85 \cdot 30}{400} \cdot 0.85 \cdot \frac{600}{600 + 400} \\
 &= 0.0207
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_n &= M_u \cdot 10^6 / \phi \cdot b \cdot d^2 \\
 &= 3.56 \cdot 10^6 / 0.6 \cdot 1000 \cdot 1400^2 \\
 &= 0.00302 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega &= 0.85 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2.353 \cdot R_n}{f'c}} \right) \\
 &= 0.85 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2.353 \cdot 0.00302}{30}} \right) \\
 &= 1009 \cdot 10^{-4}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho &= \omega \cdot \frac{f'c}{f_y} \\
 &= 7.56 \cdot 10^{-6} < \rho_{\min}, \text{ maka dipakai } \rho_{\min}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{As perlu} &= \rho_{\min} \cdot b \cdot d \\
 &= 4900 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Coba-coba besi tulangan D25, D29, dan D32

$$\begin{aligned}
 \text{Luas penampang D25} &= \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 25^2 \\
 &= 490.625 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Luas penampang D29} &= \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 29^2 \\
 &= 660.185 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Luas penampang D32} &= \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 32^2 \\
 &= 803.84 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Jadi:

- Memakai D25 membutuhkan jumlah = $As / 490.625$
 $= 9.98 \text{ buah} = 10 \text{ buah}$
 Jarak bersih antar tulangan (Sn) = $b / (As / 490.625) = 100.12 \text{ mm}$
 As ada = $\frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 25^2 \cdot b / Sn$
 $= 4900 \text{ mm}^2 \geq As \text{ perlu (memenuhi)}$
- Memakai D29 membutuhkan jumlah = $As / 660.185$
 $= 7.422 \text{ buah} = 8 \text{ buah}$
 Jarak bersih antar tulangan (Sn) = $b / (As / 660.185) = 134.73 \text{ mm}$
 As ada = $\frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 29^2 \cdot b / Sn$

$$= 4900 \text{ mm}^2 \geq \text{As perlu (memenuhi)}$$

3. Memakai D32 membutuhkan jumlah = $\text{As}/803.84$

$$= 6.095 \text{ buah} = 7 \text{ buah}$$

$$\text{Jarak bersih antar tulangan (Sn)} = b/(\text{As}/490.625) = 164 \text{ mm}$$

$$\text{As ada} = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 32^2 \cdot b/\text{Sn}$$

$$= 4900 \text{ mm}^2 \geq \text{As perlu (memenuhi)}$$

Maka dipakai tulangan : **D25 - 100**

4.7.2. Penulangan Bagi

Direncana dengan tulangan D – 19

$$\text{As perlu} = (0.18 \cdot b \cdot h)/100$$

$$= 2700 \text{ mm}^2$$

Coba-coba besi tulangan D16,D19,dan D22

$$\text{Luas penampang D16} = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 16^2$$

$$= 200.96 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas penampang D19} = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 19^2$$

$$= 283.385 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas penampang D22} = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 22^2$$

$$= 379.94 \text{ mm}^2$$

Jadi:

Memakai D16 membutuhkan jumlah = $\text{As}/200.96$

$$= 13.43 \text{ buah} = 14 \text{ buah}$$

$$\text{Jarak bersih antar tulangan (Sn)} = b/(\text{As}/200.96) = 74.42 \text{ mm}$$

$$\text{As ada} = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 16^2 \cdot b/\text{Sn}$$

$$= 2700 \text{ mm}^2 \geq \text{As perlu (memenuhi)}$$

Memakai D19 membutuhkan jumlah = $\text{As}/283.385$

$$= 9.52 \text{ buah} = 10 \text{ buah}$$

$$\text{Jarak bersih antar tulangan (Sn)} = b/(\text{As}/283.385) = 104.95 \text{ mm}$$

$$\text{As ada} = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 19^2 \cdot b/\text{Sn}$$

$$= 2700 \text{ mm}^2 \geq \text{As perlu (memenuhi)}$$

Memakai D22 membutuhkan jumlah = $\text{As}/379.94$

$$= 7.106 \text{ buah} = 8 \text{ buah}$$

$$\text{Jarak bersih antar tulangan (Sn)} = b/(\text{As}/379.94) = 140.71 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{As ada} &= \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 22^2 \cdot b/S_n \\ &= 2700 \text{ mm}^2 \geq \text{As perlu (memenuhi)} \end{aligned}$$

Untuk mempermudah pengerjaan maka dipakai tulangan : **D19 - 100**

4.7.3. Penulangan Geser

Data :

$$\begin{aligned} f'_c &= 30 \text{ MPa} \\ f_y &= 400 \text{ MPa} \\ b &= 1000 \text{ mm} \\ h &= 1500 \text{ mm} \\ d' &= 100 \text{ mm} \\ d &= 1400 \text{ mm} \end{aligned}$$

Untuk mudahnya sebagai pendekatan yang aman boleh berdasarkan rumus berikut: (Vis dan Kusuma,1994) (11-3)

$$\begin{aligned} V_{\text{umax}} &= 163972 \text{ kg} \\ V_c &= \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \\ V_c &= 1369.306 \text{ kN} \\ V_c &= 139628.2 \text{ kg} \end{aligned}$$

Menurut SK SNI '13 pers.11.4.7.1 , apabila $V_u > \Phi \cdot V_c = 0.6 \cdot 139628.2 = 83776.92$ Maka diperlukan tulangan geser. Dikarenakan $V_u / \Phi < V_c$, maka perlu ditambah dengan V_s sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_u / \Phi &= V_c + V_s \\ V_s &= 133658.5 \end{aligned}$$

Direncana menggunakan $\phi 12$

Coba-coba besi tulangan $\phi 10, \phi 12$, dan $\phi 14$

$$\begin{aligned} \text{Luas penampang } \phi 10 &= \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 10^2 \\ &= 78.5 \text{ mm}^2 \\ \text{Luas penampang } \phi 12 &= \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 12^2 \\ &= 113.665 \text{ mm}^2 \\ \text{Luas penampang } \phi 16 &= \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 14^2 \\ &= 153.86 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Apabila menggunakan tulangan geser tegak lurus terhadap sumbu komponen struktur maka menggunakan rumus sebagai berikut:

$$V_s = (A_v \cdot f_y \cdot d) / s$$

- Perhitungan jarak antar tulangan geser $\phi 10$:

$$V_s = (A_v \cdot f_y \cdot d)/s$$

$$133658.5 = (78.5 \cdot 400 \cdot 1400)/s$$

$$s = 328.89$$

- Perhitungan jarak antar tulangan geser $\phi 12$

$$V_s = (A_v \cdot f_y \cdot d)/s$$

$$133658.5 = (113.665 \cdot 400 \cdot 1400)/s$$

$$s = 476.23$$

- Perhitungan jarak antar tulangan geser $\phi 14$:

$$V_s = (A_v \cdot f_y \cdot d)/s$$

$$133658.5 = (153.86 \cdot 400 \cdot 1400)/s$$

$$s = 644.6$$

Untuk mempermudah pengerjaan maka digunakan $\phi 14 - 600$

Tulangan yang sudah dihitung melalui Momen Tabel Beegs dan STAADPRO direkapitulasi kedalam Tabel 4.24. berikut:

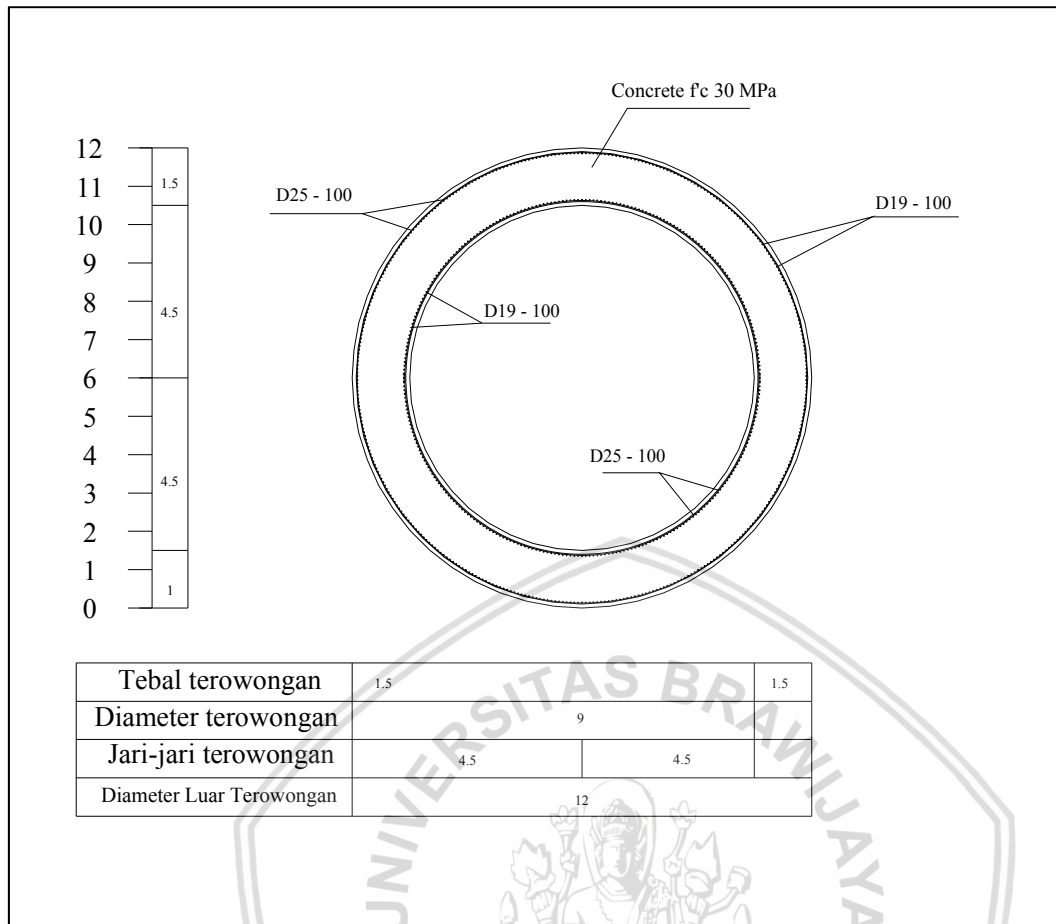
Tabel 4.24.

Rekapitulasi Perhitungan Penulangan Menggunakan Tabel Beegs dan Software STAADPRO

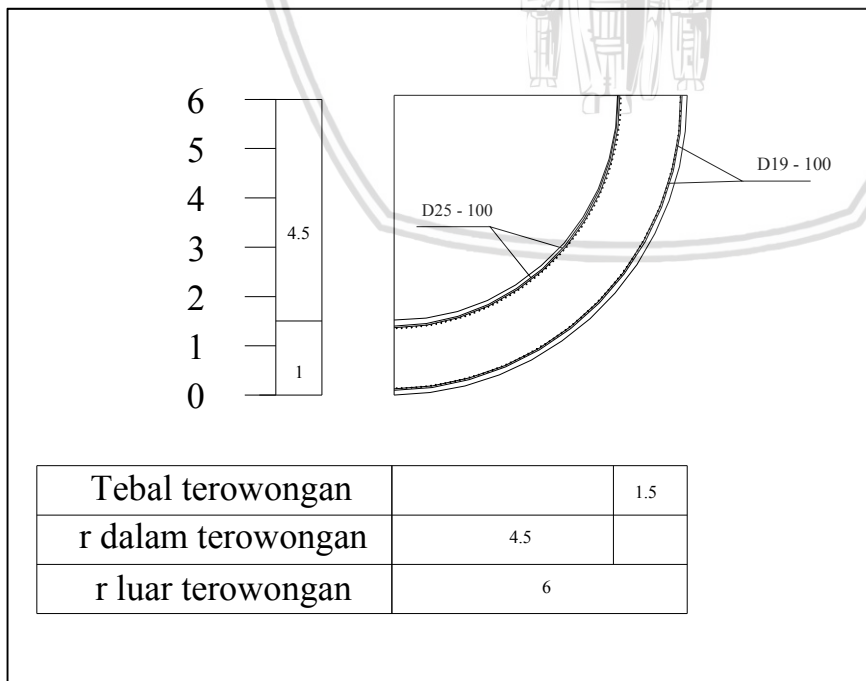
STAADPRO	Tulangan Utama	Tulangan Bagi
Atas	D25-100	D19-100
Bawah	D25-100	D19-100
Samping	D25-100	D19-100
Tabel Beegs	Tulangan Utama	Tulangan Bagi
Atas	D25-100	D19-100
Bawah	D25-100	D19-100
Samping	D29-100	D19-100

Sumber : Perhitungan

Dari Tabel Tersebut Maka dalam perencanaan ini menggunakan Tulangan Utama D29-100 dan Tulangan Bagi D19-100. Untuk gambar dari penulangan dapat dilihat pada Gambar 4.61. berikut:



Gambar 4.61. Gambar Tulangan Terowongan Pengelak
Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 4.62. Gambar Detail Tulangan Terowongan Pengelak
Sumber : Hasil Perhitungan

4.8. *Treatment* Terowongan

4.8.1. Pelaksanaan Pengerjaan Terowongan

Dalam Pelaksanaan pengerjaan terowongan hal mendasarnya yaitu:

- a. Persiapan
- b. Penggalian
- c. Pembetonan

4.8.1.1. Pengerjaan persiapan

Dalam pengerjaan persiapan ini meliputi fasilitas untuk pekerjaan-pekerjaan sementara seperti:

- a. Penyediaan Air (*Water Supply*)
- b. Penyediaan Udara (*Air Supply*)
- c. Penyediaan Tenaga Listrik (*Power Supply*)
- d. Pembuatan Saluran Pembuang (*Drainage*)
- e. Pembuatan Ventilasi (*Ventilation*)

4.8.1.2. Pengerjaan Penggalian

Pekerjaan Penggalian Terowongan meliputi

- a. Pekerjaan Persiapan/*Surveying*
Meliputi pekerjaan yang mana diperlukan saat persiapan seperti pengukuran, pemanasan alat-alat, pembagian tugas pekerja, dll.
- b. *Drilling*
Pembuatan lubang dengan alat bor untuk tempat dinamit sesuai dengan perencanaan.
- c. *Charging*
Pengisian dinamit kedalam lubang bor dengan alat stik kayu
- d. *Blasting*
Peledakan dinamit sesuai dengan pola *drilling* yang ada.
- e. *Ventilating*
Penghembusan udara untuk menghilangkan debu, asap, atau gas lain dari bekas peledakan.
- f. *Mucking*
Pembuangan material-material tersisa yang masih ada dari sisa peledakan.
- g. *Stealling*
Pembuangan batu-batu pada permukaan terowongan yang mana bisa membahayakan pekerja pada saat melakukan pekerjaan.

h. Shotcreting

Konstruksi penyangga sementara terowongan. Biasanya menggunakan alat khusus yang disebut juga *Robot Shotcrete* atau *Alivia Shortcrete Placer*

i. Rock Bolting

Konstruksi penyangga sementara terowongan disamping *shotcrete*.

4.8.1.3. Pekerjaan Pembetonan

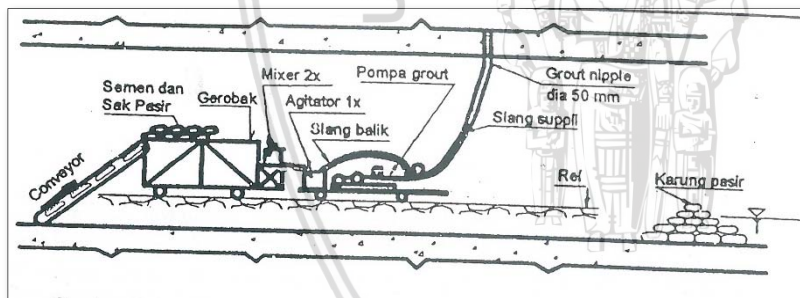
Setelah penggalian terowongan, pekerjaan selanjutnya yaitu pekerjaan pembetonan yang mana meliputi tahapan sebagai berikut:

- Pembesian
- Pemasangan Bekisting
- Pengecoran Beton

4.8.2. Grouting

4.8.2.1. Grouting Pengisi

- Grouting* pengisi atau *backfill grouting* dilaksanakan khusus dalam terowongan untuk mengisi rongga *overbreak* terowongan plus pembetonan lining terowongan, terutama terowongan pengelak, pelimpah, dan juga pengambilan



Gambar 4.63. Skematis Pelaksanaan *Backfill Grouting* didalam Terowongan
Sumber: Anonim, 2005

- Penempatan titik *grout* perlu disiapkan lebih dini dengan memasang *guide pipe (grout pipe)* ϕ 50 mm pada saat fabrikasi tulangan dan kemudian dibenam setelah selesai di *grout*. Hal ini akan mempermudah pelaksanaannya *backfill grouting* tanpa ada tulangan yang putus oleh pemboran lubang *grout*.
- Umur pembetonan *lining* untuk dilaksanakannya *backfill grouting* minimal 2 minggu dan lebih lama lebih baik.
- Perhitungan volume *backfill grouting* dapat dihitung dengan rumus:

$$V = 2\pi(R + r) \times t_{ob}$$

Dimana :

V = volume *backfill* persatuan panjang (m^3)

R = jari-jari jadi terowongan (m)

r = tebal *lining* beton (m)

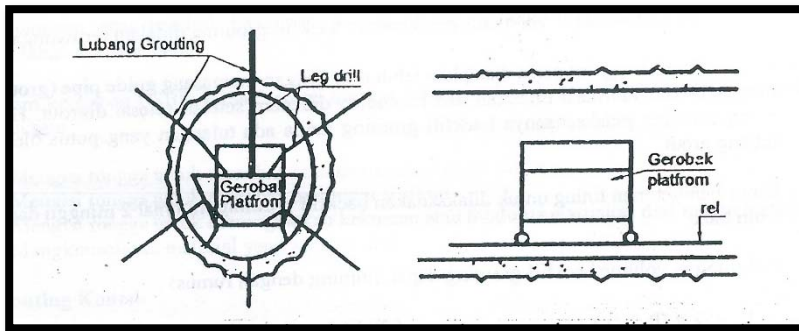
t_{ob} = tebal *overbreak* (m) sesuai spesifikasi 10% dari jari-jari terowongan atau diperhitungkan berdasarkan kondisi aktual.

- a. Campuran *grouting* perlu disiapkan dengan uji coba campuran (*trial mix*) dan pengujian viskositas mortar dengan *flow corie* atau *marsh cone*.
- b. Campuran grout untuk *backfill grouting* adalah mortar yang terdiri dari air : semen : pasir ayak = 1 : 1 : 4 hingga 1 : 1 : 2 dalam campuran berat, pasir ayak yang dipakai dengan ukuran maksimum 1,5 mm untuk menambah fluiditas diperlukan editif seperti bentonit ata bahan kimia.
- c. Dalam prakek campuran yang baik, mmiliki nilai rate yang berkisar 18 hingga 20 detik dengan uji *flow cone* dan campura diawali lebih encer.
- d. Penyiapan lubang *grout*, apabila sudah tersedia *grout ripple* tinggal membuka kembali dan dicek ulang kedalamannya dengan *leg drill*, kemudian disambung dengan slang suplai.
- e. Apabila belum tersedia lubang maka perlu disediakannya lubang bor dengan *leg drill*, *rotary drill* atau DTH (*down to hole*) *drill* dengan diameter 33 mm hingga 45 mm. Pemasangan packer pendek tipe *lever expantion packer* dengan panjang 25 cm pada mulut lubang grout menembus ketebalan *concrete lining*.
- f. Tekanan maksimum *grouting* yang diijinkan adalah 3kg/cm^2 , karena *backfill grouting* tergolong *grouting* bertekanan rendah.
- g. Disamping tekanan *grout*, penyebaran *grout* dapat dikontrol dengan membuka lubang *grout* selang satu lubang disekitarnya.

4.8.2.2. *Grouting* Konsolidasi

4.8.2.2.1. Pelaksanaan dalam terowongan

- a. Pengerjaan *grouting* konsolidasi pada bangunan penunjang bendungan yaitu didalam terowongan pengelak, pelimpah, maupun pengambilan secara skematis dapat digambarkan pada Gambar 4.64. berikut



Gambar 4.64. Skematik Pelaksanaan Pemboran untuk *Consolidation Grouting* dalam Terowongan

Sumber: Anonim, 2005

- b. Setelah selesai pengerjaan *backfill grouting* dan selang minimal 2 minggu baru dimulai pelaksanaan *consolidation grouting* pada blok tersebut.
- c. Pemasangan *guide pipe / grout pipe* Φ 50 mm sejak dini pada saat fabrikasi tulangan pada pembetonan perlu dilakukan sehingga bebas kemungkinan pemboran yang dilakukan memotong tulangan. Hal ini diupayakan agar memudahkan pemboran lubang grout dan mengurangi kekuatan beton.
- d. pemboran pada *grouting konsolidasi* untuk kedalaman sampai 3 m dapat dilakukan dengan *leg drill* seperti pada gambar 4.64., sedangkan yang lebih dalam dari 3 m perlu dengan DTH (*down to hole*) *percussion rotary drill* atau dengan *rotary drilling machine*.
- e. Diameter lubang *grout* berkisar 33 mm hingga 46 mm dan setiap *step/stage* dengan panjang 3 m hingga 5 m harus dilakukan test air.
- f. Pola perpindahan titik bor dan *grout* pada setiap blok mengacu pada acara *split-spacing* dan pada terowongan bertekanan, perpindahan pengROUTINGAN berpola spiral.
- g. Perlu dimulai dengan lubang pilot yang dilengkapi pengambilan contoh inti dan pengujian air bertekanan, umumnya dengan cara modifikasi lugeon tes. Kemudian diikuti pada lubang-lubang *grout* tanpa inti, tetapi selalu sebelumnya harus dilakukan pengujian air bertekanan untuk menguji nilai dari lugeon.
- h. Kriteria perlu dilanjutkan dengan *grouting* konsolidasi tergantung dengan nilai lugeon pada step tersebut dengan contoh spesifikasi sebagai berikut:
 - Nilai $Lu < 5$ tidak perlu digROUT
 - Nilai $10 > Lu > 5$, perlu digROUT dengan campuran 1/10, 1/5, 1/3 dan 1/1

-Nilai $Lu > 15$, campuran dimulai dari 1/3 dan 1/1 dan apabila perlu dilanjutkan 1/0,5.

- i. sesuai dengan panjang step, biasanya 3 m dan dapat dilakukan *grouting* step tunggal dengan tekanan maksimum yang diijinkan tidak lebih dari 5kg/cm^2
- j. Apabila terjadi kebocoran dibagian konstruksi lain perlu dilakukan penyumbatan.
- k. Lubang uji dengan diameter minimal 56 mm perlu dipilih di titik-titik yang dinilai injeksinya kurang baik dan diupayakan pemboran tidak menembus tulangan.

4.8.2.3. Perencanaan *Grouting*

a. Kedalaman lubang sementasi

Kedalaman dari lubang sementasi tirai dari suatu bendungan adalah berkisar 50% hingga 100% dari tinggi bendungan (H) atau lebih bila kondisi geologinya jelek.

Menurut USBE dapat ditetapkan dengan rumus:

$$D = 0.33 \cdot H + C$$

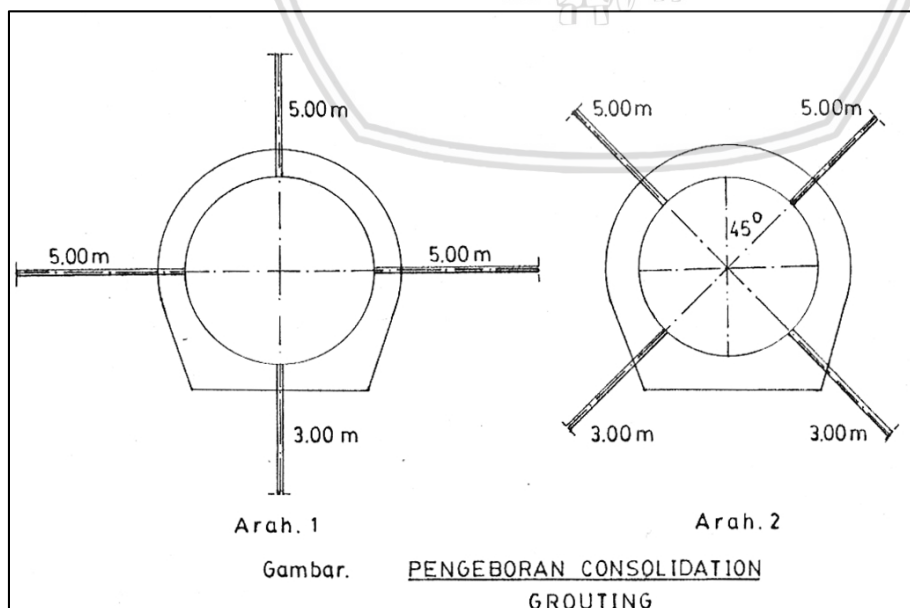
Dimana : D = Kedalaman lubang *grout* (m)

H = Ketinggian Bendungan (m)

C = Konstanta yang berkisar dari 7.5 m hingga 25 m, tergantung kondisi batuan.

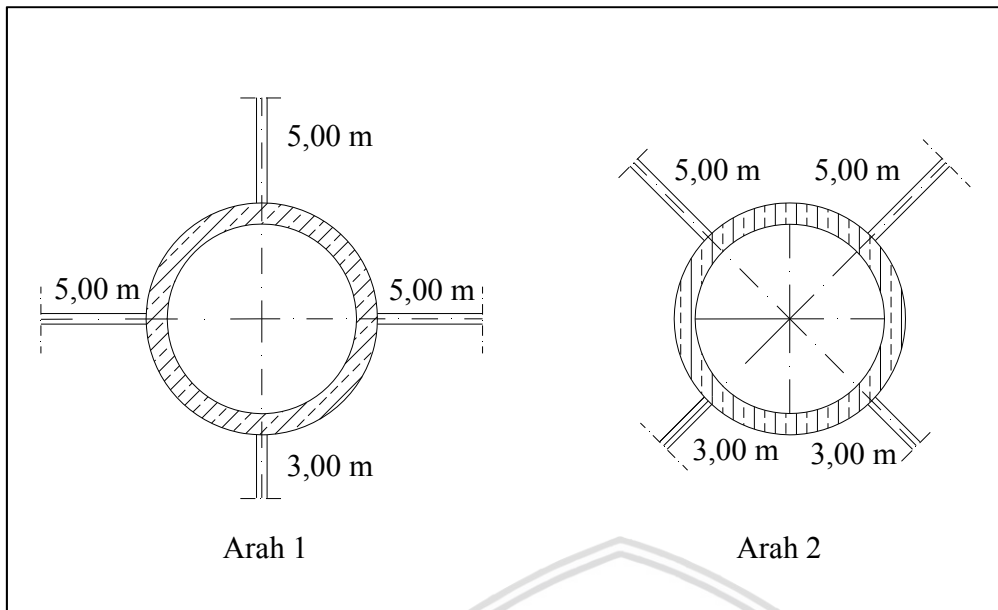
b. Pola dan jarak lubang *grout*

Pola dari jalur *grouting* sekurang-kurangnya 2 baris dengan lubang berselang-seling dalam bentuk yang paling efektif adalah segitiga.



Gambar 4.65. Pengeboran *Grouting* Konsolidasi

Sumber: Materi Kuliah Bendungan

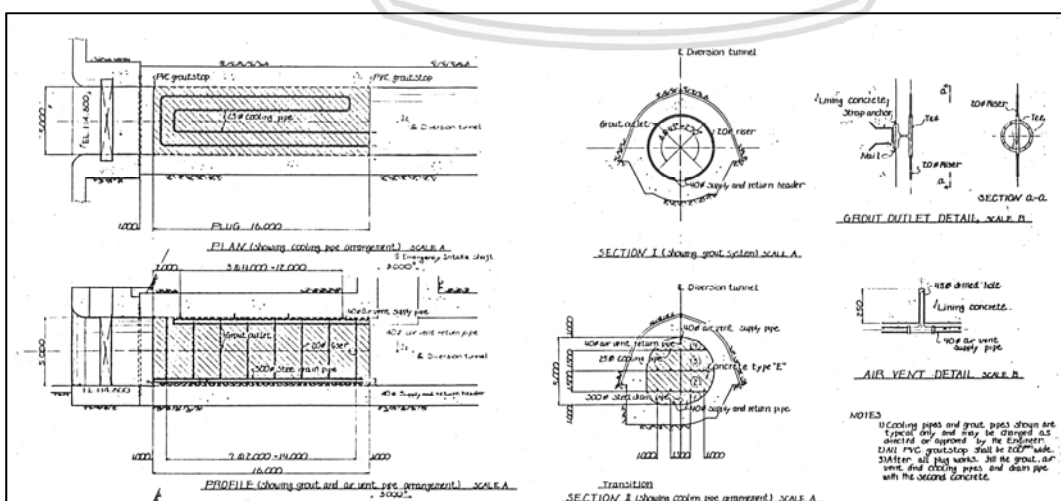


Gambar 4.66. Pengeboran *Grouting* Konsolidasi Pada Perencanaan
Sumber: Perhitungan

Penentuan jarak antara lubang di samping adalah dilakukannya percobaan *grouting*, yang biasanya dilakukan pada tahap desain detail.

4.9. Perhitungan Panjang *Plugging*

Untuk Terowongan Pengelak Bendungan Lubuk Ambacang ini pekerjaan ini difungsikan untuk penyumbatan penampang secara penuh dengan beton. Karena dalam pelaksanaan diperhitungkan ada kenaikan suhu beton akibat proses kimiawi, maka konstruksi beton *plug* ini dilengkapi dengan *air vent* yangmana difungsikan sebagai pendingin daripada suhu panas akibat proses kimiawai dari perkerasan beton. Untuk *plugging* dan *air vent* sendiri dapat dilihat pada Gambar 4.67. berikut:



Gambar 4.67. Perencanaan *Plugging* dan *Air vent*
Sumber: Materi Kuliah

Dan untuk perhitungan panjang *plugging* yang dibutuhkan dapat dihitung dengan rumus :

$$\frac{2(h+w)LU}{\rho g H w h} = 3$$

Dimana:

h = tinggi terowongan (m)

w = lebar terowongan (m)

U = kekuatan massa batuan (kPa), U tidak dimasukan ke rumus apabila $f_s < U$.

H = tinggi muka air diatas sumbatan (m)

ρ = massa jenis air (kg/m^3)

g = gravitasi (m/s^2)

Contoh Perhitungan:

h = 9 m

w = 9 m

U = 1500 kPa

H = 77 m

ρ = 1000 kg/m^3

g = 9.81 m/s^2

$f_s = 2 \cdot \sqrt{f_c}$

$$= 2 \cdot \sqrt{4351.14} = 131.92 \text{ psi} = 909.632 \text{ kPa}$$

$f_s < U$ maka dapat dihitung dengan rumus berikut:

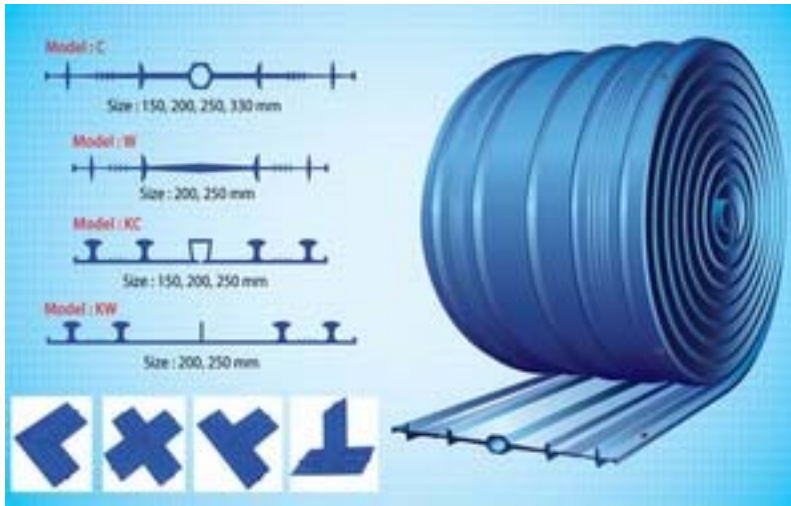
$$L = \frac{(1000 \cdot 9.81 \cdot 77 \cdot 9 \cdot 9)}{909632 \cdot 2 \cdot (9+9)}$$

L = 1.868 m

Untuk di Indonesia Faktor Keamanan mencapai 4, maka dari itu diperlukan *plugging* sepanjang 7.472 m.

4.10. Pemasangan *Waterstop*

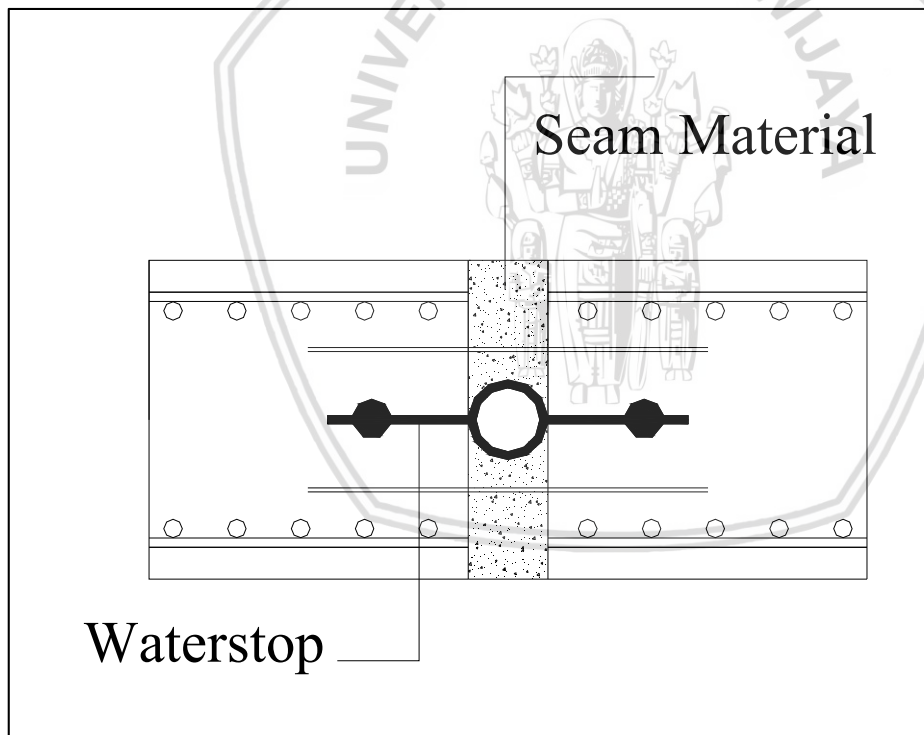
Pada pelaksanaan pekerjaan konstruksi beton bertulang terutama area sambungan sering ditemui adanya pemasangan *waterstop*. *Waterstop* sendiri adalah penyumbat aliran air pada celah antara dinding beton. Sistem *waterstop* ada dua yang umum yaitu menggunakan bahan pvc dan *swellable waterstop*. keberadaannya termasuk penting karena berfungsi untuk menahan jalannya air agar tidak terjadi kebocoran atau rembesan dari sebuah sambungan pada dinding terowongan, dinding penahan, area lantai bawah tanah, dll. Detail gambar dari *waterstop* sendiri adalah sebagai berikut:



Gambar 4.68. Jenis-jenis Waterstop PVC

Sumber: Anonim

Pada perencanaan terowongan pengelak kali ini, pembangunan daripada terowongan pengelak ini direncanakan pemasangan *waterstop* pada sambungan. Berikut gambar dari pemasangan *waterstop*.



Gambar 4.69. Pemasangan Waterstop pada Sambungan Beton

Sumber : Perhitungan

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

1. Terowongan pengelak Bendungan Lubuk Ambacang direncana berbentuk lingkaran. Dari data penulusuran banjir diperoleh debit banjir sebesar 4742.8 m³/detik. Sehingga dari hasil perhitungan didapatkan diameter terowongan sebesar 9 m dengan 2 buah terowongan pengelak. Berdasarkan dimensi terowongan yang sudah direncana, kemudian ditinjau terhadap kondisi hidrolis yang terjadi yaitu pada kondisi aliran bebas, aliran transisi dan aliran tertekan. Pada kondisi-kondisi tersebut terowongan pengelak masih mampu untuk menampungnya.
2. Berdasarkan kondisi pembebanan yang ada didapatkan kondisi yang paling membahayakan terhadap struktur terowongan yaitu pada saat pengoperasian pada saat kondisi gempa. Dari perhitungan maka didapatkan gaya-gaya dalam yang bekerja.
 - o Momen Maksimum Atas : 2.16 KNm
 - o Momen Maksimum Bawah : 3.56 KNm
 - o Momen Maksimum Samping : 3.56 KNm
3. Dari perhitungan penulangan pada terowongan dengan menggunakan Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SK SNI 2841 2013) diperoleh tulangan sebagai berikut:
 - o Diameter Tulangan Utama Atas : D25-100
 - o Diameter Tulangan Utama Bawah : D25-100
 - o Diameter Tulangan Utama Samping : D25-100
 - o Diameter Tulangan Bagi : D19-100

5.2. Saran

Dalam studi perencanaan terowongan pengelak Bendungan Lubuk Ambacang ini masih kurang dari kata sempurna, alangkah lebih baiknya diperbanyak untuk referensi ilmu tambahan mengenai perencanaan terowongan. Agar dapat menambah wawasan lebih untuk mahasiswa Teknik Pengairan dalam merencanakan konstruksi terowongan.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



DAFTAR PUSTAKA

- Alkaff, M Firdaus, 2005. *STAAD 2004 Untuk Orang Awam*, Penerbit Maxicom, Palembang
- Cahya, Indra, 1999,.*Beton Bertulang*,Universitas Brawijaya,Malang
- Chow, Ven Te, Phd., 1992. *Hidrolika Saluran Terbuka*. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Sumber Daya Air , 2005. *Pedoman Grouting untuk Bendungan*, Jakarta : tidak diterbitkan
- Lidya, 2017. *Pengenalan Software Analisa dan Design Struktur STAAD Pro*.https://www.academica.edu/9439684/Pengenalan_PENGENALAN_SOFTWARE_ANALISA_and_DESIGN_STRUKTUR_STAADPRO (diakses Juli 2017)
- Loebis, Joerson, Ir, M.Eng,1984. *Banjir Rencana Untuk Bangunan Air*, Badan Penerbit Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Philips, H.B., & I.E. Allen. 1986. *Beegs Deformeter Stress Analysis of Single Barrel Conduits*. Colorado: United States Bureau of Reclamation
- Singh, Bhawani., & Rajnish. K. Goel . 2006. *Tunneling in weak rock*. Bangalore:Elsevier.
- Sosrodarsono, Suryono dan Takeda, Kensaku, 1993. *Bendungan Type Urugan*, Penerbit PT Pradnya Paramitha, Jakarta.
- United States Department of Transportation Federal Highway Administration, 2009. *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Element*. Washington: United States Department of Transportation Federal Highway Administration
- Utomo, 2018. *Metode Pelaksanaan Pekerjaan Terowongan* <https://www.scribd.com/document/101808268/Metode-Pelaksanaan-Pekerjaan-Terowongan-teknik-Sipil> (diakses Juli 2017)
- Vis, W.C., & Gideon Kusuma,1993.. *Dasar-Dasar Perencanaan Beton Bertulang* Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Vis, W.C., Gideon Kusuma,1993. *Grafik dan Tabel Perhitungan Beton Bertulang*, Penerbit Erlangga, Jakarta.

