



TUGAS AKHIR – RC184803

**ALTERNATIF PERENCANAAN TUBUH
BENDUNGAN UNTUK MEMINIMALISIR LAJU
REMBENSAN (*SEEPAGE*) PADA BENDUNGAN
BENDO, KABUPATEN PONOROGO**

ARIA KHOIRUN NISA'
NRP. 03111745000026

Dosen Pembimbing I
Dr. Ir. Wasis Wardoyo ,MSc

Dosen Pembimbing II
Dr. Trihanyndio Rendy S.,ST. MT

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2019



TUGAS AKHIR – RC184803

**ALTERNATIF PERENCANAAN TUBUH
BENDUNGAN UNTUK MEMINIMALISIR LAJU
REMBESAN (*SEEPAGE*) PADA BENDUNGAN
BENDO, KABUPATEN PONOROGO**

ARIA KHOIRUN NISA'

NRP. 03111745000026

Dosen Pembimbing I

Dr. Ir. Wasis Wardoyo, MSc

Dosen Pembimbing II

Dr. Trihanyndio Rendy S., ST. MT

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2019



FINAL PROJECT – RC184803

**ALTERNATIVE DESIGN OF MAINDAM TO
MINIMIZE SEEPAGE ON BENDO DAMS,
PONOROGO**

ARIA KHOIRUN NISA'
NRP. 03111745000026

Supervisor
Dr. Ir. Wasis Wardoyo, MSc
Dr. Trihanyndio Rendy S., ST. MT

DEPARTEMENT OF CIVIL ENGINEERING
Fakulty of Civil, Environmental and Geo Engineering
Sepuluh Nopember Institut of Technology
Surabaya
2019

**ALTERNATIF PERENCANAAN TUBUH BENDUNGAN
UNTUK MEMINIMALISIR LAJU REMBESAN
(SEEPAGE) PADA BENDUNGAN BENDO, KABUPATEN
PONOROGO**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Lintas Jalur Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

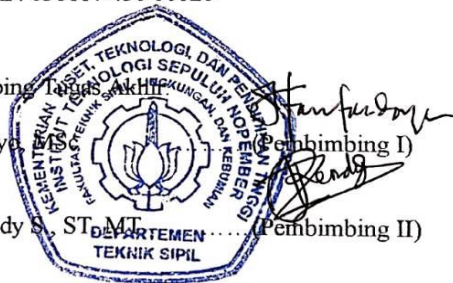
ARIA KHOIRUN NISA'

NRP. 031117 450 00026

Disetujui oleh Pembimbing

1. Dr. Ir. Wasis Wardoyo

2. Dr. Trihanyndio Rendy S.



**SURABAYA
JULI, 2019**

**ALTERNATIF PERENCANAAN TUBUH BENDUNGAN
UNTUK MEMINIMALISIR LAJU REMBESAN
(SEEPAGE) PADA BENDUNGAN BENDO, KABUPATEN
PONOROGO**

Nama : Aria Khoirun Nisa'

NRP : 03111745000026

Departemen : Teknik Sipil FTSLK ITS

Dosen Pembimbing:

1. Dr. Ir. Wasis Wardoyo, M.Sc

2. Dr. Trihanyndio Rendy S., ST., MT

Abstrak

Tingginya kebutuhan air di wilayah Kabupaten Ponorogo, mendorong pemerintah untuk merencanakan bendungan guna menjaga ketersediaan air sepanjang tahun. Pentingnya keberadaan bendungan sehingga perlu dilakukan analisa lebih lanjut mengenai penyebab stabilitas tubuh bendungan. Salah satu penyebab kelongsoran pada tubuh bendungan adalah adanya aliran rembesan pada tubuh bendungan yang menyebabkan erosi pada tubuh bendungan. Analisa dilakukan dengan membandingkan dua tipe bendungan yaitu tipe urugan zonal dan tipe urugan membran melalui pendekatan analitik dengan Hukum Darcy serta melalui pendekatan numerik dengan Geo Studio SEEP/W. Kedua tipe tersebut akan diuji melalui variasi pemilihan material penyusun tubuh bendungan dan pengaruh tebal inti terhadap laju rembesan.

Perhitungan secara numerik menggunakan Geo Studio SEEP/W ditinjau dari pengaruh susunan material terhadap laju rembesan dan variasi tebal inti kedap air. Material yang digunakan berdasarkan pada data saturated water characteristic curve (SWCC) dari penelitian yang dilakukan sebelumnya. Perhitungan secara numerik dilakukan pada bendungan tipe urugan zonal. Perhitungan juga dilakukan secara analitik dengan

rumus Darcy sehingga diketahui perbedaan hasil laju rembesan pada kedua perhitungan tersebut.

Hasil yang diperoleh dari analisa laju rembesan berdasarkan pendekatan secara numerik dan secara analitik menunjukkan bahwa pemilihan material dan desain inti kedap air mempengaruhi jumlah debit yang keluar akibat rembesan. Dari pendekatan yang sudah dilakukan didapatkan bahwa desain bendungan urugan zonal inti tegak, inti miring dan inti tirai yang dihitung dengan program bantu Geo Studio SEEP/W dengan bahan inti berupa lempung (clay) menghasilkan rembesan paling kecil. Hasil serupa juga didapatkan ketika ketiga variasi bendungan tipe urugan zonal dihitung dengan rumus Darcy. Sementara bendungan tipe urugan membran menunjukkan angka yang cukup besar dalam meluluskan rembesan, yaitu $1.77 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pada bendungan membran beton aspal dan $3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pada bendungan membran beton. Untuk memaksimalkan desain dan fungsi tubuh bendungan, modifikasi lain terhadap tubuh bendungan bisa dilakukan untuk mendapatkan keuntungan secara desain maupun secara ekonomi.

Kata kunci: Bendungan Bendo Tipe Urugan, Maindam, Analisa Rembesan, Geo Studio SEEP/W

**ALTERNATIVE DESIGN OF MAINDAM TO MINIMIZE
SEEPAGE ON BENDO DAMS, PONOROGO**

Name : Aria Khoirun Nisa'
NRP : 03111745000026
Departement : Civil Engineering-FTSLK ITS
Supervisors :
1. Dr. Ir. Wasis Wardoyo, M.Sc
2. Dr. Trihanyndio Rendy S., ST., MT

Abstract

The highest water demand in Ponorogo, encourages the government to build dams to maintain water availability throughout the year. The existence of dams is very important, so it is necessary to further analysis causes that interfere with the stability of the dam body. One of the causes of landslide in the dam body is seepage flow that causes erosion of the dam body. The analysis is conducted by comparing the two types of dams, namely the zonal type and membrane type through an analytical approach with Darcy law and through a numerical approach with the Geo Studio SEEP/W. Both types will be tested through the variations Dam body materials and the core thickness effect of the seepage rate.

Numerical calculation using Geo Studio SEEP/W is reviewed from the material arrangement to the rate of seepage and the thickness variation of the waterproof core. The material used is based on the soil water characteristic curve (SWCC) data of the previous study. Numerical calculation are done on a zonal type dam. Calculation are also done with Darcy law so that the results are known differences in the rate of the two calculations.

The results from seepage rate analysis based on a numerical and analytical approach indicate that the choice of material and the core design affect the amount of discharge due to seepage. From the approach, it was found that the design of the

upright zonal core dam, sloping core and curtain core was calculated by the Geo Studio SEEP/W with core material of clay to produce the smallest seepage. Similar results were obtained when the third variation of the zonal type dam is calculated by the Darcy law. While membrane-type dams show quite large numbers in passing seepage, namely $1.77 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ on asphalt concrete membrane dams and $3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ on concrete membrane dams. To optimize the design and function of the body of the dam, other modifications to the dam body can do to gain an advantage in the design and economically.

Keyword: *Earthfill Dam of Bendo, Maindam, Seepage Analysis, Geo Studio SEEP/W*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat serta hidayahnya sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “**Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan Untuk Meminimalisir Laju Rembesan (Seepage) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo**”. Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat kelulusan bagi seluruh mahasiswa dalam menempuh pendidikan pada program studi S1 Teknik Sipil FTSLK ITS.

Di dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis merasa bahwa banyak hambatan yang penulis hadapi. Namun, berkat bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak, hambatan-hambatan tersebut dapat penulis atasi sedikit demi sedikit. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Tri Joko Wahyu Adi, ST., MT., Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Sipil FTSLK ITS,
2. Bapak Dr. Techn. Umboro Lasminto, ST., M.Sc., selaku Kepala Program Studi S-1 Teknik Sipil FTSLK ITS,
3. Bapak Dr.Ir. Wasis Wardoyo,M.Sc dan Dr. Trihanyndio Rendy Satrya, ST., MT selaku dosen pembimbing tugas akhir,
4. Bapak Ir. Heppy Kristijanto, MS selaku dosen wali,
5. Kedua orang tua penulis yang selalu memberikan motivasi dan doa,
6. Rekan – rekan Lintas Jalur Teknik Sipil FTSLK ITS serta semua pihak yang membantu dalam meyelesaikan proposal tugas akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun demi terciptanya hasil yang lebih baik.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

Abstrak	i
Abstract	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	3
1.6 Peta Lokasi	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Tinjauan Lokasi	5
2.2 Analisa Geologi.....	6
2.3 Kapasitas Tampung.....	7
2.4 Dimensi bendungan.....	8
2.5 Tipe-Tipe Bendungan.....	9
2.5.1 Bendungan tipe urugan tanah	10
2.5.2 Bendungan tipe urugan batu	11
2.5.3 Bendungan beton.....	12
2.5.4 Bendungan tipe urugan membran.....	12
2.6 Desain Bendungan.....	13
2.6.1 Tipe urugan tanah.....	13
2.6.2 Tipe urugan zonal.....	14
2.6.3 Tipe urugan membran	15
2.6.4 Pertimbangan pemilihan tipe bendungan	16
2.7 Perencanaan Bahan Urugan.....	19
2.7.1 Bahan untuk penimbunan tubuh bendungan dan metode pemilihannya	19
2.7.2 Pemilihan lokasi zona random.....	24

2.7.3	Desain kemiringan <i>maindam</i> berdasarkan material penyusunnya.....	24
2.7.4	Klasifikasi Bahan Urugan.....	25
2.8	Sistem Pengendalian Rembesan Pada Urugan	39
2.8.1	Zona urugan.....	39
2.8.2	Selimut drainase	39
2.9	Sistem Pengendalian Rembesan Pada Pondasi.....	40
2.9.1	Parit drainase hilir.....	40
2.9.2	Sumur pelepas tekanan	41
2.9.3	Selimut kedap air	41
2.9.4	Dinding halang slari (slurry).....	41
2.9.5	Dinding diafragma.....	41
2.9.6	Injeksi (grouting) tirai.....	41
2.9.7	Perbaikan bidang kontak	42
2.9.8	Berm rembesan air di hilir	42
2.9.9	Galeri (terowongan drainase)	42
2.9.10	Pengeboran drainase semi horizontal	42
2.10	Perencanaan Pengendali Rembesan Air	42
2.10.1	Dinding halang rembesan air	42
2.10.2	Selimut kedap air horizontal sebelah udik.....	44
2.10.3	Desain Lapisan Drainase	44
2.10.4	Sumur Pelepas Tekanan (Pressure Relief Wells) ...	44
2.10.5	Drainase Kaki Lereng.....	45
2.10.6	Drainase galeri.....	45
2.11	Stabilitas Bendungan Terhadap Aliran Filtrasi.....	45
2.11.1	Formasi garis depresi.....	45
2.11.2	Jaringan aliran.....	50
2.11.3	Perhitungan rembesan dari suatu jaringan aliran	51
2.11.4	Koefisien rembesan	52
2.11.5	Pembuatan jaringan trayektori aliran rembesan (seepage flow-net)	52
2.11.6	Jaringan filtrasi pada saat terjadinya penurunan tiba-tiba (<i>rapid draw down</i>).....	54
2.11.7	Penentuan kapasitas aliran rembesan.....	56
2.11.8	Penentuan kecepatan aliran rembesan	58

2.12	Analisa Teknis Tubuh Bendung Dengan Lapisan <i>Waterproof</i> Pada <i>Upstream</i>	59
2.11.1	Zona I	59
2.11.2	Zona II.....	60
2.11.3	Zona III.....	60
2.13	Geo Studio SEEP/W.....	61
BAB III METODOLOGI		63
3.1	Tahapan Perencanaan	63
3.2	Studi Literatur.....	63
3.3	Pengumpulan Data	63
3.4	Analisa Kondisi	64
3.5	Analisis Data	64
3.6	Flow Chart.....	66
BAB IV MATERIAL PENYUSUN TUBUH BENDUNGAN...67		
4.1	Analisa Material Penyusun Tubuh Bendungan Berdasarkan <i>Soil Water Characteristic Curve</i> (SWCC)	67
4.2	Material Inti Kedap Air	70
4.3	Material Filter.....	71
4.4	Material Random.....	71
4.5	Material Batu.....	72
4.6	Variasi Kombinasi Material Penyusun Tubuh Bendungan	73
BAB V PERHITUNGAN LAJU REMBESAN (<i>SEEPAGE</i>)75		
5.1	Pemodelan Dengan Geo Studio SEEP/W.....	75
5.1.1	Pemodelan Bendungan Tipe Urugan Zonal dengan Variasi Material.....	75
5.1.1.2	Bendungan tipe urugan zonal dengan inti miring.....	79
5.1.2	Pemodelan Bendungan Tipe Urugan Zonal dengan Variasi Tebal Inti Ditinjau dari Bendungan Inti Tegak.....	85
5.1.2.1	Tebal inti 1 (43.8 m).....	86
5.1.2.2	Tebal inti 2 (63.8 m).....	89
5.1.2.3	Tebal inti 3 (34.04 m).....	91
5.2	Penggambaran Garis Depresi	94
5.2.1	Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tegak.....	95
5.2.1.2	Kondisi muka air banjir	97

5.2.1.3	Kondisi air surut tiba-tiba	99
5.2.2	Bendungan tipe urugan zonal dengan inti miring..	101
5.2.3	Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tirai	106
5.3	Perhitungan Laju Rembesan.....	112
5.3.1	Bendungan tipe urugan zonal	112
5.3.2	Bendungan tipe urugan membran.....	120
5.4	Perbandingan Hasil Perhitungan Secara Analitik dan Numerik.....	133
BAB VI PENUTUP.....		135
6.1	Kesimpulan.....	135
6.2	Saran	137
Daftar Pustaka		139
LAMPIRAN		141

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Denah bendungan utama (Laporan Akhir Pekerjaan Detail Design Bendungan Bendo Kabupaten Ponorogo, 2010)	4
Gambar 1. 2 Denah lokasi rencana Bendungan Bendo Ponorogo (Laporan Akhir Pekerjaan Detail Design Bendungan Bendo Kabupaten Ponorogo, 2010).....	4
Gambar 2. 1 Tampak atas lokasi Bendungan Bendo (<i>sumber: dokumen pribadi</i>)	5
Gambar 2. 2 Bendungan tipe urugan (Design of Small Dam, 1987).....	10
Gambar 2. 3 Lokasi pengisian material zona random pada potongan melintang maindam. (Design of Small Dam, 1987)	25
Gambar 2. 4 Macam sistem pengendali rembesan pada pondasi (SNI 8065:2016).....	40
Gambar 2. 5 Garis depresi pada bendungan homogen (sesuai garis parabola yang mengalami modifikasi)	46
Gambar 2. 6 Beberapa cara untuk memperoleh harga “ a ” sesuai dengan sudut bidang singgungnya (α).....	47
Gambar 2. 7 Hubungan anatara sudut bidang singgung (α) dengan $aa + \Delta a$	48
Gambar 2. 8 Skema formasi garis depresi bendungan inti vertikal	48
Gambar 2. 9 Skema formasi garis depresi pada bendungan tirai	50
Gambar 2. 10 Rembesan melalui suatu saluran aliran	51
Gambar 2. 11 Jaringan trayektori aliran filtrasi dalam tubuh bendungan (Sosrodarsono, 2002)	53
Gambar 2. 12 Jaringan trayektori aliran filtrasi dalam tubuh bendungan (dimana $K_x = 5 K_s$) (Sosrodarsono, 2002)	54
Gambar 2. 13 Gradian rembesan (Sosrodarsono, 2002).....	54

Gambar 2. 14 Jaringan trayektori aliran filtrasi pada saat terjadinya penurunan tiba-tiba (Sosrodarsono, 2002).....	56
Gambar 2. 15 Pembagian zona dalam perhitungan matematis	60
Gambar 2. 16 konstanta C	61
Gambar 3. 2 Bagan alir.....	66
Gambar 4. 1 Soil water characteristic curve (SWCC) pada tanah lempung (Al-Taie, 2006)	68
Gambar 4. 2 soil water characteristic curve (SWCC) pada tanah lempung (clay) (Qian Zhai, 2011)	69
Gambar 5. 1 Pemodelan desain tubuh bendungan pada Geo Studio SEEP/W	76
Gambar 5. 2 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tegak kondisi muka air normal	77
Gambar 5. 3 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tegak kondisi muka air banjir	77
Gambar 5. 4 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tegak kondisi muka air surut tiba-tiba	77
Gambar 5. 5 Perbandingan tiga kondisi bendungan terhadap rembesan pada bendungan inti tegak	78
Gambar 5. 6 Pemodelan desain tubuh bendungan pada Geo Studio SEEP/W	79
Gambar 5. 7 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tegak kondisi muka air banjir	80
Gambar 5. 8 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tegak kondisi muka air normal	80
Gambar 5. 9 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tegak kondisi muka air surut tiba-tiba	80

Gambar 5. 10 Perbandingan tiga kondisi bendungan terhadap rembesan pada bendungan inti miring.....	81
Gambar 5. 11 Pemodelan desain tubuh bendungan pada Geo Studio SEEP/W	82
Gambar 5. 12 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tirai kondisi muka air banjir.....	83
Gambar 5. 13 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tirai kondisi muka air surut tiba-tiba.....	83
Gambar 5. 14 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tirai kondisi muka air normal.....	84
Gambar 5. 15 Perbandingan tiga kondisi bendungan terhadap rembesan pada bendungan inti miring.....	85
Gambar 5. 16 Pemodelan desain tubuh bendungan pada Geo Studio SEEP/W	86
Gambar 5. 17 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 43.8 m kondisi muka air normal	87
Gambar 5. 18 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 43.8 m kondisi muka air banjir	87
Gambar 5. 19 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 43.8 m kondisi muka air surut tiba-tiba	87
Gambar 5. 20 Perbandingan tiga kondisi muka air upstream terhadap rembesan pada bendungan dengan tebal inti 43.8 m. ...	88
Gambar 5. 21 Pemodelan desain tubuh bendungan pada Geo Studio SEEP/W	89
Gambar 5. 22 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 63.8 m kondisi muka air normal	89
Gambar 5. 23 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 63.8 m kondisi muka air banjir	90
Gambar 5. 24 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 63.8 m kondisi muka air surut tiba-tiba	90

Gambar 5. 25 Perbandingan tiga kondisi muka air upstream terhadap rembesan pada bendungan dengan tebal inti 43.8 m. ...	91
Gambar 5. 26 Pemodelan desain tubuh bendungan pada Geo Studio SEEP/W	92
Gambar 5. 27 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 34.04 m kondisi muka air banjir	92
Gambar 5. 28 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 34.04 m kondisi muka air normal.	93
Gambar 5. 29 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 34.04 m kondisi muka air surut tiba-tiba.	93
Gambar 5. 30 Perbandingan tiga kondisi muka air upstream terhadap rembesan pada bendungan dengan tebal inti 34.04 m ..	94
Gambar 5. 31 Penggambaran garis depresi pada bendungan inti tegak berdasarkan metode Cassagrande.	95
Gambar 5. 32 Garis depresi pada bendungan dengan inti tegak, kondisi muka air normal	97
Gambar 5. 33 Penggambaran garis depresi pada bendungan inti tegak berdasarkan metode Cassagrande.	97
Gambar 5. 34 Garis depresi pada bendungan dengan inti tegak, kondisi muka air banjir.....	99
Gambar 5. 35 Penggambaran garis depresi pada bendungan inti tegak berdasarkan metode Cassagrande.	100
Gambar 5. 36 Garis depresi pada bendungan dengan inti tegak, kondisi muka air surut tiba-tiba.....	101
Gambar 5. 37 Penggambaran garis depresi pada bendungan inti miring berdasarkan metode Cassagrande.	102
Gambar 5. 38 Garis depresi pada bendungan dengan inti miring, kondisi muka air normal.....	103
Gambar 5. 39 Data yang diperlukan untuk menggambarkan garis depresi pada tubuh bendungan	104

Gambar 5. 40	Garis depresi pada bendungan dengan inti miring, kondisi muka air banjir.....	105
Gambar 5. 41	Data yang diperlukan untuk menggambarkan garis depresi pada tubuh bendungan	105
Gambar 5. 42	Garis depresi pada bendungan dengan inti miring, kondisi muka air surut tiba-tiba.....	106
Gambar 5. 43	Data yang diperlukan untuk menggambarkan garis depresi	107
Gambar 5. 44	Garis depresi pada bendungan dengan inti tirai, kondisi muka air normal.....	108
Gambar 5. 45	Data yang dibutuhkan untuk penggambaran garis depresi	109
Gambar 5. 46	Garis depresi pada bendungan inti tirai, dengan kondisi muka air banjir.....	110
Gambar 5. 47	Data yang diperlukan untuk menggambar garis depresi pada tubuh bendungan	110
Gambar 5. 48	Gambar garis depresi pada tubuh bendungan, kondisi muka air surut tiba-tiba.....	112
Gambar 5. 49	Asumsi zona untuk perhitungan rembesan	120
Gambar 5. 50	Garis aliran filtrasi pada tubuh bendungan pada kondisi air normal.....	123
Gambar 5. 51	Garis aliran filtrasi pada tubuh bendungan, pada kondisi muka air banjir.....	125
Gambar 5. 52	Garis aliran filtrasi pada tubuh bendungan, pada kondisi muka air surut tiba-tiba.....	127
Gambar 5. 53	Garis aliran filtrasi pada tubuh bendungan, pada kondisi muka air normal.....	129
Gambar 5. 54	Garis aliran filtrasi pada tubuh bendungan, pada kondisi muka air banjir.....	131
Gambar 5. 55	Garis aliran filtrasi pada tubuh bendungan, pada kondisi muka air surut tiba-tiba.....	133

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Macam tipe bendungan urugan tanah (SNI 8065:2015)	11
Tabel 2. 2 Tipe bendungan berdasarkan pertimbangan desain (SNI 8062:2015).....	17
Tabel 2. 3 Hasil-hasil pengujian kompresi tri-sumbu dalam skala yang besar untuk bahan zona transisi (Dept. Civil Engineering, US Army, Electric Power Co. In France).....	21
Tabel 2. 4 Rekomendasi kemiringan untuk bendungan urugan pada pondasi yang stabil.....	27
Tabel 2. 5 Standarisasi klasifikasi dari tanah (Sosrodarsono, 2002).....	28
Tabel 2. 6 Sifat-sifat khusus tanah berdasarkan klasifikasi standar (<i>Sosrodarsono, 2002</i>).....	32
Tabel 2. 7 Koefisien rembesan (k) berdasarkan tipe tanah (<i>Das, 1985</i>).....	52
Tabel 2. 8 Tabel perhitungan untuk menentukan volume air filtrasi yang melalui tubuh bendung (Direktorat Jendral Pengairan, 1999).....	58
Tabel 4. 1 Material inti kedap air	70
Tabel 4. 2 Material Filter.....	71
Tabel 4. 3 Material Random.....	72
Tabel 4. 4 Material Batu.....	72
Tabel 4. 5 Variasi kombinasi material penyusun tubuh bendungan	73
Tabel 5. 1 Total laju rembesan pada bendungan inti tegak	78
Tabel 5. 2 Total laju rembesan pada bendungan inti miring	81
Tabel 5. 3 Total laju rembesan pada bendungan inti tirai	84
Tabel 5. 4 Total laju rembesan pada bendungan dengan tebal inti 43.8 m.....	88
Tabel 5. 5 Total laju rembesan pada bendungan dengan tebal inti 43.8m.....	90

Tabel 5. 6 Total laju rembesan pada bendungan dengan tebal inti 34.04m.....	93
Tabel 5. 7 Koordinat garis depresi pada inti bendungan	96
Tabel 5. 8 Koordinat garis depresi pada zona sembarang	97
Tabel 5. 9 Koordinat garis depresi pada inti bendungan	98
Tabel 5. 10 Koordinat garis depresi pada zona sembarang	99
Tabel 5. 11 Koordinat garis depresi pada inti tegak	100
Tabel 5. 12 Koordinat garis depresi pada zona sembarang	101
Tabel 5. 13 Koordinat garis depresi pada inti miring	103
Tabel 5. 14 Koordinat garis depresi pada inti miring	104
Tabel 5. 15 Koordinat garis depresi pada inti miring	106
Tabel 5. 16 Koordinat garis depresi pada tubuh bendungan inti tirai.....	108
Tabel 5. 17 Koordinat garis depresi pada bendungan inti tirai..	110
Tabel 5. 18 Koordinat garis depresi pada bendungan inti tirai..	111
Tabel 5. 19 Nilai K ekivalensi pada tiap variasi tubuh bendungan	114
Tabel 5. 20 Debit rembesan pada tiap tipe bendungan.....	118

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tingginya kebutuhan air di wilayah Kabupaten Ponorogo, mendorong pemerintah untuk merencanakan bendungan guna menjaga ketersediaan air sepanjang tahun. Bendungan Bendo adalah bendungan yang dibangun di atas Kali Keyang atau lebih dikenal sebagai Kali Ngindeng di Dusun Bendo, Desa Ngindeng, Kecamatan Sawoo, Kabupaten Ponorogo. Daerah tangkapan air Bendungan Bendo seluas 120,63 km². Kapasitas tampungan yang besar dan elevasi muka air yang tinggi, dapat mengatur besarnya aliran ke hilir menjadi merata sepanjang tahun. (Kementerian Pekerjaan Umum BBWS Bengawan Solo, 2010)

Berdasarkan tujuannya, Bendungan Bendo dibangun untuk memenuhi kebutuhan air baku, irigasi serta sebagai salah satu upaya pengendalian banjir. Untuk itu perencanaan tubuh bendungan harus diperhitungkan dengan baik, yaitu dengan memperhatikan pemilihan inti kedap air tegak atau tipe sekat yang umumnya sangat menguntungkan untuk penanggulangan terhadap penurunan air secara cepat (*rapid draw down*). Sehingga faktor utama yang harus diperhatikan dalam perencanaan tubuh bendungan adalah usaha untuk mendapatkan kualitas dan kuantitas tubuh bendungan yang memadai terutama untuk bahan pada zona kedap air yang berupa tirai atau inti kedap air. (Direktorat Jendral Pengairan, 1999)

Mengingat pentingnya keberadaan bendungan untuk menjaga ketersediaan air untuk berbagai kebutuhan masyarakat, maka perlu adanya analisa lebih lanjut mengenai bahaya keruntuhan yang ditimbulkan oleh aliran rembesan pada tubuh bendungan. Aliran rembesan pada tubuh bendungan berpengaruh terhadap bahaya gejala sufosi (*piping*) dan bahaya terhadap gejala sembulan (*boiling*) sehingga menyebabkan longsor pada lereng. Dalam penulisan tugas akhir ini, analisa dilakukan dengan membandingkan dua tipe bendungan yaitu, tipe urugan zonal dan

tipe urugan membran melalui pendekatan analitik dengan Hukum Darcy serta melalui pendekatan numerik dengan Geo Studio SEEP/W. Kedua tipe tersebut akan diuji melalui variasi pemilihan material penyusun tubuh bendungan dan pengaruh tebal inti terhadap laju rembesan. Selain itu, alternatif drainase pada tubuh bendungan juga turut diperhitungkan untuk menjaga keseimbangan air di hulu dan hilir bendungan. Penulisan tugas akhir ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh desain tubuh bendungan terhadap laju rembesan pada tubuh bendungan. Sehingga nantinya akan diketahui tipe bendungan yang memiliki stabilitas rembesan yang baik sehingga mampu menjaga keseimbangan air di bendungan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana susunan tanah yang baik untuk tubuh bendungan?
2. Berapa kapasitas rembesan yang melalui *maindam* jika *maindam* didesain sebagai bendungan tipe urugan zonal dan dihitung secara numerik?
3. Bagaimana laju rembesan pada bendungan yang ditinjau dari variasi tebal inti kepad air?
4. Berapa besar kapasitas rembesan (q) pada bendungan tipe urugan zonal dan bendungan tipe urugan membran yang dihitung secara analitik?
5. Manakah desain *maindam* terbaik untuk mencegah laju aliran rembesan?

1.3 Batasan Masalah

Yang menjadi batasan masalah dalam penulisan proposal tugas akhir ini adalah:

1. Pada saat dilakukan analisa rembesan, tubuh bendungan dianggap stabil.

2. Pondasi tubuh bendungan dianggap kedap air, sehingga tidak ada rembesan pada pondasi bendungan.
3. Uji analisa hanya dilakukan pada bendungan tipe urugan zonal dan bendungan tipe urugan membran.
4. Tipe sistem drainase yang digunakan pada tubuh bendungan adalah tipe subzone saringan (filter).
5. Tidak membahas metode pelaksanaan serta perhitungan ekonomi teknik dalam pemilihan tipe *maindam*.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penulisan proposal tugas akhir ini adalah:

1. Untuk mengetahui susunan tanah yang baik sebagai penyusun tubuh bendungan.
2. Untuk menghitung laju aliran rembesan pada tubuh bendungan tipe urugan zonal secara numerik.
3. Untuk menghitung dimensi dan menentukan posisi lapisan kedap air pada tubuh bendungan, sehingga mampu menurunkan garis aliran rembesan pada *maindam*.
4. Untuk menghitung kapasitas rembesan (q) pada bendungan tipe urugan zonal dan bendungan tipe urugan membran berdasarkan perhitungan analitik.
5. Untuk menentukan desain *maindam* yang paling efektif terhadap laju rembesan.

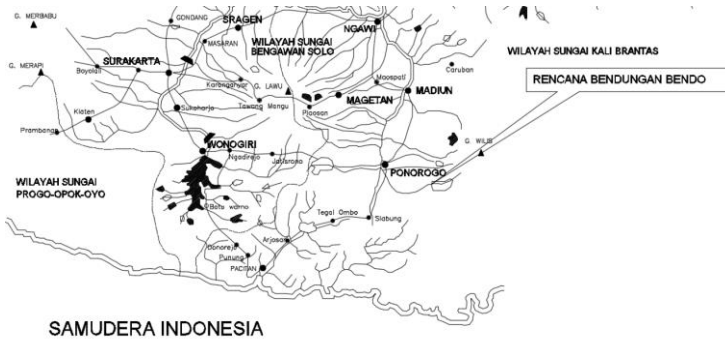
1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penyusunan tugas akhir ini adalah untuk mengetahui pengaruh kapasitas rembesan pada *maindam* akibat pemilihan tipe *maindam* serta desain inti kedap air sehingga kedepannya dapat menjadi referensi dalam pemilihan tipe *maindam* yang paling efektif dalam meminimalisir terjadinya kelongsoran akibat aliran rembesan.

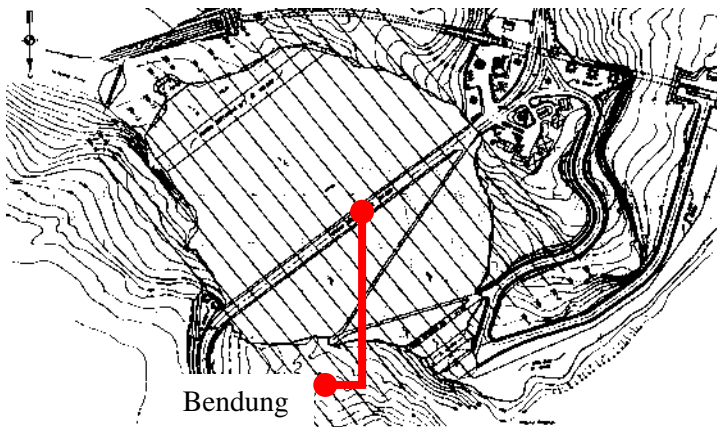
1.6 Peta Lokasi

Bendungan Bendo terletak di atas Kali Keyang atau lebih dikenal sebagai Kali Ngindeng di Dusun Bendo, Desa Ngindeng, Kecamatan Sawoo, Kabupaten Ponorogo, Propinsi Jawa Timur.

Secara geografis lokasi rencana Bendungan Bendo terletak pada posisi antara $7^{\circ} 49' 33''$ - $7^{\circ} 59' 36''$ LS dan $111^{\circ} 34' 57''$ - $111^{\circ} 44' 40''$ BT seperti pada Gambar 1.1. Rencana posisi bendungan di atas Kali Ngindeng adalah seperti Gambar 1.2 berikut:



Gambar 1. 2 Denah lokasi rencana Bendungan Bendo Ponorogo (*Laporan Akhir Pekerjaan Detail Design Bendungan Bendo Kabupaten Ponorogo, 2010*)



Gambar 1. 1 Denah bendungan utama (*Laporan Akhir Pekerjaan Detail Design Bendungan Bendo Kabupaten Ponorogo, 2010*)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Lokasi

Berdasarkan Laporan Akhir Perencanaan Bendungan Bendo, secara geografis lokasi rencana Bendungan Bendo terletak pada posisi antara $7^{\circ} 49' 33''$ - $7^{\circ} 59' 36''$ LS dan $111^{\circ} 34' 57''$ - $111^{\circ} 44' 40''$ BT. Terletak di atas Kali Keyang atau lebih dikenal sebagai Kali Ngindeng di Dusun Bendo, Desa Ngindeng, Kecamatan Sawoo, Kabupaten Ponorogo, Propinsi Jawa Timur.

Lokasi Bendungan Bendo seperti terlihat pada Gambar 2.1, secara morfologi merupakan daerah perbukitan bergelombang, dengan ketinggian berkisar antara elevasi +150 m sebagai dasar Sungai Keyang sampai dengan elevasi +450 m, yaitu daerah Gunung Tumpak Bengele di selatan rencana lokasi bendungan. Sedangkan disebelah utara rencana bendungan ketinggiannya +250 m di atas permukaan air laut, yaitu lebih rendah dari yang sebelah selatan.



Gambar 2. 1 Tampak atas lokasi Bendungan Bendo (*sumber: dokumen pribadi*)

Berdasarkan peta geologi, satuan batuan breksi vulkanik merupakan batuan dasar yang ada di daerah penyelidikan. Ketersediaan material bahan bangunan seperti lempung, pasir, kerikil, campuran tanah-gravel, fragmen andesit dan bolder besar cukup melimpah di lokasi dekat dengan lokasi rencana Bendungan Bendo.

2.2 Analisa Geologi

Data geologi Bendungan Bendo diperlukan untuk mengetahui kondisi geologi rencana lokasi bendungan. Hal ini dilakukan sebagai pertimbangan untuk menentukan jenis tanah di lokasi rencana, yang bisa dimanfaatkan sebagai tanah penyusun tubuh bendung.

Satuan morfologi perbukitan bergelombang rendah dijumpai di sebelah utara dan timur laut rencana lokasi Bendungan Bendo. Meliputi daerah-daerah Sooka, Ngadirojo, dan Jurugan pada ketinggian sekitar 200 sampai 350 m di atas muka laut. Umumnya terdiri dari batuan tufa vulkanik, beberapa kurang kompak dan mudah tererosi sehingga menimbulkan morfologi bergelombang rendah. (*Laporan Akhir Pekerjaan Detail Design Bendungan Bendo Kabupaten Ponorogo, 2010*)

Satuan morfologi bergelombang kuat terdapat di daerah rencana Bendungan Bendo, waduk, maupun hulu Kali Ngindeng dengan ketinggian antara 150 sampai 750 m di atas muka laut ke arah kompleks Gunung Wilis dan Gunung Dorowati. Lereng terjal dan lembah yang curam, kelokan sungai yang tajam, dengan morfologi yang kasar seringkali dijumpai dan cenderung dikontrol oleh komposisi batuan breksi vulkanik keras dan kompak yang mendominasi daerah ini, serta beberapa struktur geologi sesar terutama di daerah hulu Kali Ngindeng. Puncak-puncak bukit tinggi pada satuan morfologi ini antara lain Gunung Bayangkaki +721 m, Gunung Toklak-taklik +356m, Gunung Butuh +457m, Gunung Kelir +470m, Gunung Tumpak Bengle + 450m. (*Laporan Akhir Pekerjaan Detail Design Bendungan Bendo Kabupaten Ponorogo, 2010*)

2.3 Kapasitas Tampung

Fungsi utama waduk adalah memanfaatkan air pada musim penghujan, menampung air sehingga dapat dimanfaatkan dimusim kemarau. Hal yang terpenting dari waduk adalah kapasitas waduk atau kapasitas tampung yang meliputi:

a. Kapasitas efektif

Kapasitas efektif adalah volume tampungan dari waduk yang dapat dimanfaatkan untuk melayani kebutuhan air yang ada. Pada data perencanaan Bendungan Bendo, kapasitas tampungan waduk dihitung dengan menggunakan kurva lengkung massa yang didasarkan pada besarnya debit *inflow*, kebutuhan air serta kehilangan air. Prinsip dasar dalam analisa kapasitas tampungan efektif bendungan adalah untuk mengoptimalkan ketersediaan air.

Debit *inflow* pada analisa kapasitas tampungan efektif menggunakan debit andalah Q_{80} . Sedangkan debit *outflow* adalah debit untuk memenuhi semua kebutuhan waduk. Dari perhitungan, kapasitas tampung efektif Waduk Bendo didapatkan:

- Untuk elevasi muka air terendah elv. +188.00 m, didapatkan:

Tampungan efektif	= 33.938	juta m ³
Tampungan kotor	= 43.114	juta m ³
Tampungan mati	= 9.176	juta m ³
Elevasi MAT	= 218.60	m
Elevasi puncak dam	= 224.00	m

- Untuk elevasi muka air terendah elv. +198.00 m (ketika sedimentasi mencapai +185,00 m), didapatkan:

Tampungan efektif	= 26.375	juta m ³
Tampungan kotor	= 43.114	juta m ³
Tampungan mati	= 16.738	juta m ³
Elevasi MAT	= 218.60	m
Elevasi puncak dam	= 224.00	m

(Laporan Akhir Pekerjaan Detail Design Bendungan Bendo Kabupaten Ponorogo, 2010)

b. Kapasitas mati (volume tampungan untuk sedimen)

Kapasitas mati perlu diketahui karena merupakan dasar untuk merencanakan bangunan-bangunan seperti *maindam*, *spillway* dan

intake. Sebelum dilakukan perhitungan kapasitas waduk lebih dahulu perlu digambarkan hubungan antara elevasi, luas permukaan dan volume.

2.4 Dimensi bendungan

Berdasarkan data pada Laporan Akhir Perencanaan Bendungan Bendo, diketahui dimensi tubuh bendung (*maindam*) pada Bendungan Bendo adalah sebagai berikut:

a. Tinggi jagaan (*free board*)

Perhitungan tinggi jagaan mengacu pada Panduan Perencanaan Bendungan Urugan (PPBU) Vol. III, halaman 33 dengan memperhitungkan kebutuhan tinggi jagaan yang ditinjau dari beberapa kondisi berikut: (*Laporan Akhir Pekerjaan Detail Design Bendungan Bendo Kabupaten Ponorogo, 2010*)

- Kondisi muka air normal

$$\begin{aligned} H_j &= \frac{3}{4} H_w + H_s + H_r + H_e + h_u & (2.1) \\ &= \frac{3}{4} 0.83 + 0.02 + 0.69 + 0.39 + 1.0 \\ &= 2.72 \text{ m} \end{aligned}$$

- Kondisi muka air banjir dengan kala ulang 100 tahun

$$\begin{aligned} H_j &= \frac{3}{4} H_w + H_s + H_r + h_u & (2.2) \\ &= \frac{3}{4} 0.83 + 0.02 + 0.69 + 0.5 \\ &= 1.83 \text{ m} \end{aligned}$$

- Kondisi muka air banjir BMB (banjir maksimal boleh jadi)

$$H_j = 0.80 \text{ m}$$

b. Tinggi puncak bendungan

- Kondisi normal

$$\begin{aligned} &HWL + H_j \text{ (Normal)} \\ &El.218.6 + 2.72 = El. 221.32 \text{ m} \end{aligned}$$

- Kondisi banjir Q 1000

$$\begin{aligned} &FWL(1000) + H_j \text{ (1000)} \\ &El. 220.89 + 1.82 = El. 222.513 \text{ m} \end{aligned}$$

- Kondisi Banjir BMB

$$\begin{aligned} &FWL \text{ (BMB)} + H_j \text{ (BMB)} \\ &El. 223.11 + 0,89 = El. 224 \text{ m} \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan elevasi puncak di atas, kebutuhan tinggi bendungan ditentukan pada elevasi 224,00 m

c. Tinggi bendungan

Tinggi bendungan dari elevasi dasar sungai pada bagian hulu kaki bendungan hingga elevasi puncak bendungan yaitu $224 - 153 = 71$ m. Sedangkan beda tinggi antara elevasi puncak bendungan dengan dasar pondasi setelah dikupas lapisan endapan sungainya (Elvasi 136m) adalah 88m. (*Laporan Akhir Pekerjaan Detail Design Bendungan Bendo Kabupaten Ponorogo, 2010*)

d. Lebar mercu bendungan

Lebar puncak bendungan minimum ditentukan dengan rumus sebagai berikut:

$$b = 3,6 * H^{1/3} - 3,0 \quad (2.3)$$

Dimana :

b = lebar puncak bendungan

H = tinggi bendungan ($224-138=86$ m)

(Sosrodarsono, 2002)

$$b = 3,6 * (88,00)^{0,333} - 3,0$$

$$b = 13,013 \text{ m}$$

Berdasarkan Panduan Perencanaan Bendungan Urugan, lebar puncak bendungan dihitung dengan rumus:

$$Bt = \frac{5}{3} \sqrt{H} \quad (2.4)$$

(Direktorat Jendral Pengairan, 1999)

$$Bt = \frac{5}{3} \sqrt{88.00} = 15,63 \text{ m}$$

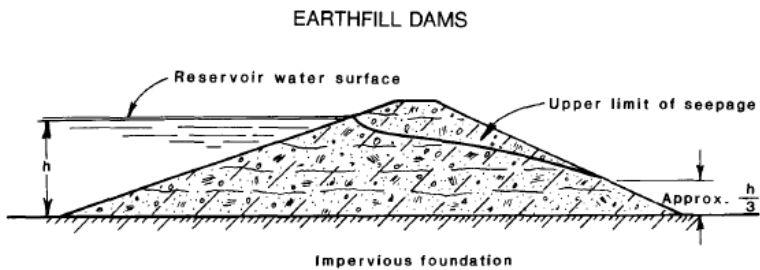
Dari kedua perhitungan diatas serta mempertimbangkan bendungan-bendungan sejenis, maka lebar puncak bendungan ditetapkan sebesar 15,00 m.

2.5 Tipe-Tipe Bendungan

Berdasarkan material yang menyusun tubuh bendungan, tipe bendungan dibedakan menjadi bendungan tipe urugan tanah (*earthfill dam*), bendungan tipe urugan batu (*rockfill dam*), dan bendungan beton (*concrete gravity dam*). (*Design of small dam, 1987*)

2.5.1 Bendungan tipe urugan tanah

Bendungan tipe urugan (Gambar 2.2) merupakan jenis bendungan yang paling sering digunakan di Indonesia, karena konstruksinya cukup mudah yaitu dengan memanfaatkan material yang ada di sekitar lokasi rencana bendungan. Bahkan, syarat pondasi dan kondisi topografi untuk membangun bendungan tipe urugan tanah cukup mudah. Sepertihalnya tipe lain, bendungan tipe urugan tanah memiliki kemampuan yang baik untuk menjaga kondisi tampungan.



Gambar 2. 2 Bendungan tipe urugan (*Design of Small Dam, 1987*)

Meskipun bendungan tipe urugan tanah memiliki beberapa klasifikasi tanah sebagai penyusun tubuh bendungannya, bendungan tipe ini cukup murah jika dibandingkan dengan tipe lainnya. Kekurangan dari bendungan tipe ini adalah kemungkinan terjadinya kerusakan akibat erosi cukup besar jika kapasitas spillway yang memadai tidak disediakan untuk membuang kelebihan air. Selama masa konstruksi, air di sungai harus tetap mengalir sehingga perlu dibangun bangunan coverdam atau conduit. Bendungan tipe urugan tanah memiliki beberapa spesifikasi lain seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Macam tipe bendungan urugan tanah (SNI 8065:2015)

Tipe		Skema umum	Keterangan
Bendungan urugan homogen			Apabila 80% dari seluruh pembentuk tubuh bendungan terdiri atas bahan yang bergradasi sama dan bersifat kedap air.
Bendungan urugan Zonal	Tirai		Apabila pembentuk tubuh bendungan terdiri atas bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan tirai kedap air di udiknya.
	Inti miring		Apabila pembentuk tubuh bendungan terdiri atas bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan miring ke hilir.
	Inti vertikal		Apabila pembentuk tubuh bendungan terdiri atas bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan vertikal.
Bendungan urugan batu dengan membran			Apabila pembentuk tubuh bendungan terdiri atas bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan membran kedap air di lereng udiknya, yang biasanya terbuat dari lembaran baja tahan karat, lembaran beton bertulang, aspal beton, lembaran plastik, dan lain-lainnya.

2.5.2 Bendungan tipe urugan batu

Bendungan tipe urugan batu menggunakan batu dari berbagai jenis ukuran sebagai material pengisi tubuh bendungannya. Ukuran yang berbeda-beda itu dipilih untuk menjaga stabilitas tubuh bendung serta untuk memperkecil pori-pori diantara batu-batu besar sekaligus sebagai lapisan kedap air. Lapisan kedap air pada permukaan tubuh bendungan bagian *upstream* bisa berupa tanah, beton, beton-aspal paving, lembaran baja, atau inti dengan tanah yang kedap. Seperti bendungan tipe urugan tanah, bendungan urugan batu bisa rusak akibat kelebihan air, sehingga perlu adanya bangunan spillway dengan kapasitas yang memadai untuk mencegah terjadinya *overtopping*. Selain itu, bendungan urugan batu memerlukan pondasi yang cukup besar

untuk mencegah terjadinya pecahnya lapisan kedap air. Pondasi yang cocok adalah batu atau pasir padat dan kerikil.

Bendungan tipe urugan batu sangat cocok untuk daerah yang sulit dijangkau namun memiliki cukup banyak batu dengan kualitas baik, dimana tanah yang baik sangat langka atau periode hujan yang tinggi membuat konstruksi bendungan tidak mudah. Sedangkan konstruksi dengan tipe beton dirasa terlalu mahal. Bendungan tipe urugan batu sangat populer di wilayah dengan iklim tropis karena konstruksinya cocok untuk wilayah dengan periode hujan lebat yang cukup lama.

2.5.3 Bendungan beton

Bendungan tipe beton cocok dibangun di kawasan yang memiliki dasar berupa batuan. Konstruksi beton biasanya digunakan dalam konstruksi puncak spillway pada bendungan tipe urugan tanah maupun urugan batu.

Bendungan tipe beton biasanya dibangun dengan bentuk menyerupai kurva. Tipe bendungan ini memiliki kelebihan baik dalam hal biaya maupun keamanan. Biasanya, bendungan berbentuk menyerupai kurva memiliki pondasi yang kuat, dengan sedikit sekali pekerjaan penggalian. Konsep konstruksi bendungan dengan *roller compacted concrete* (RCC) telah banyak dilakukan. Beberapa bendungan RCC dibangun di United States.

2.5.4 Bendungan tipe urugan membran

Bendungan tipe urugan membran merupakan alternatif desain bendungan yang berada pada lokasi dengan bahan urugan lulus air cukup banyak, namun langka terhadap bahan urugan kedap air. Bahan lembaran membran biasanya menggunakan pelat beton bertulang, beton aspal, dan kadang-kadang lembaran baja, lembaran karet, atau lembara geosintetik. Hal-hal yang harus dihindari dalam desain bendungan membran diantaranya adalah retakan akibat berat sendiri, gaya gempa, serta terjangan air. Tipe bendungan ini memiliki ketahanan tinggi terhadap keruntuhan. Namun, harus dihindari terhadap penurunan tidak merata dan deformasi pada bendungan. (SNI 8062:2015).

2.6 Desain Bendungan

2.6.1 Tipe urugan tanah

Dalam merencanakan desain bendungan urugan, berikut merupakan hal-hal yang perlu diperhatikan berdasarkan SNI 8062: 2015 “Tata cara desain tubuh bendungan tipe urugan” :

- a. Bahan urugan yang digunakan adalah bahan yang kedap air atau semi kedap air yang mengandung banyak butiran halus. Bendungan biasanya didesain dengan lereng yang cukup landai sehingga membutuhkan volume bahan lebih banyak.
- b. Garis freatik yang melalui bendungan tipe homogen biasanya memotong lereng hilir pada saat air waduk mencapai elevasi tinggi. Untuk menurunkan garis freatik ini perlu dipasang sistem drainase guna mencegah erosi buluh, penurunan lokal atau keruntuhan pengaruh gaya rembesan air, sehingga desainnya harus memenuhi kriteria filter. Bendungan dengan tinggi kurang dari 25 meter bisa menggunakan sistem drainase kaki atau horizontal, sedangkan untuk bendungan dengan tinggi lebih dari 25 meter bisa menggunakan sistem drainase vertikal yang dipasang mulai dari pusat bendungan.
- c. Lebar inti kedap air mempengaruhi kestabilan lereng dan biasanya dipilih sesuai dengan perbandingan antara harga dan bahan yang tersedia di lapangan. Pada umumnya lebar inti atau lebar parit halang rembesan air didasar pondasi diambil sama atau lebih besar dari seperempat perbedaan tinggi “head”. Lebar puncak inti bendungan dapat diambil minimal 3 m, sedangkan lebar maksimumnya tergantung pada kestabilan bahan urugan yang digunakan.
- d. Bahan urugan yang tidak homogen dengan koefisien permeabilitas yang bervariasi dan tersedia cukup banyak di lapangan, bisa digunakan sebagai bahan urugan tubuh bendungan. Penggunaan bahan tersebut sebagai urugan, harus dilengkapi dengan drainase vertikal dan horizontal.
- e. Hempan ombak dan penurunan mendadak permukaan air waduk dapat menyebabkan tergerusnya lereng udik bendungan. Guna pengamanan maka diperlukan suatu hamparan pelindung

dengan konstruksi yang bervariasi, diantaranya riprap, hampan batu kosong, dan hampan aspal/beton. Dalam hal ini, perlindungan dengan riprap dianggap paling baik.

- f. Pelindung lereng hilir biasanya dimaksudkan untuk melindungi permukaan lereng dari erosi dan pengaruh cuaca lainnya. Pada bendungan yang tinggi dibuat satu atau beberapa berm membujur hampir datar pada permukaan lereng. Hal ini dilakukan untuk memperkecil lintasan langsung aliran air hujan di atas permukaan lereng sekaligus meningkatkan stabilitas lereng.

2.6.2 Tipe urugan zonal

Pada umumnya bendungan tipe urugan zonal terdiri atas zona kedap air, zona semi lulus air, dan zona lulus air. Berikut adalah hal-hal yang perlu diperhatikan dalam desain bendungan tipe urugan zonal: (SNI 8062:2015)

- a. Zona kedap air
 - Koefisien permeabilitasnya harus lebih kecil dari 10^{-5} cm/s.
 - Gradasi zona kedap air harus dipilih agar tidak terjadi penurunan yang berbeda dengan zona disampingnya, yang dapat menimbulkan retakan pengaruh pelengkungan (*arching*).
 - Tebal rata-rata zona kedap air ditentukan dan tergantung pada batas minimum rembesan yang diperkenankan, hubungan antara sifat fisik bahan di sampingnya, adanya filter dan lebar minimum untuk konstruksi. Pada umumnya tebal rata-rata 30%-50% dari tinggi air, atau jika desain konstruksi berjalan sempurna, tebal rata-rata diambil 15%-20% dari tinggi air.
- b. Filter
 - Untuk mencegah erosi buluh, maka ditempatkan material filter dengan gradasi yang memenuhi persyaratan tanpa membawa butiran halus.
 - Filter ditempatkan pada kedua sisi zona kedap air, yaitu di sisi udik dan di sisi hilir.
 - Rembesan air dari zona filter ditampung melalui zona drainase horizontal tanpa merembes melalui zona transisi dan zona lulus air.

- Tebal filter disesuaikan dengan kemudahan dalam pelaksanaan, pengaruh pembuntuan dan gempa bumi. Tebal filter horizontal minimum 2 m sampai 3 m dan tebal minimum filter miring adalah 2 m dekat puncak bendung.
 - Zona filter berfungsi menyaring butiran halus dari zona kedap air agar tidak terlepas dan tertahan di filter. Zona kedap air dengan material kasar dibutuhkan hanya satu zona filter. Bila digunakan material sangat halus, maka diperlukan beberapa lapis filter.
- c. Zona transisi atau semi lulus air
- Biasanya dipasang diantara zona kedap air dan zona lulus air, berfungsi untuk mencegah terjadinya perubahan gradasi yang besar dan mencegah pengaruh deformasi berlebihan antara zona kedap air dan zona lulus air.
 - Bahan zona transisi bisa berupa pasir campur kerikil, batuan lapuk, atau batu pecah di sebelah luar yang lebih kasar dari bahan kedap air.
- d. Zona lulus air
- Zona ini berfungsi memikul beban arid dan menstabilkan lereng hilir dan udik terhadap pengaruh gaya luar. Bahan urugan yang digunakan harus mempunyai kekuatan geser yang tinggi.
 - Bahan harus sangat lulus air agar terjadi aliran air bebas akibat air hujan dan air tersisa waktu terjadi surut cepat di lereng udik.
 - Material terbaik untuk zona lulus air, adalah batuan keras ukuran bongkah, kerakal, kerikil dan kadar butiran halus harus sekecil mungkin.
 - Riprap harus dipasang pada lereng udik.

2.6.3 Tipe urugan membran

- a. Desain bendung tipe urugan batu dengan membran beton aspal
- Tubuh bendungan, menggunakan bahan urugan berupa batu pecah bergradasi baik (*well graded*). Zona transisi harus dipasang anatara mebran kedap air dan zona urugan batu. Zona ini berfungsi untuk menyebarkan tekanan air secara merata ke seluruh tubuh bendungan dan mencegah pengaruh penurunan membran yang tidak merata

- Membran beton aspal, biasanya terdiri atas lapisan kedap air, lapisan drainase, lapisan dasar dan membran pelindung. Lapisan kedap air didesain dengan kadar aspal 8% dan tebal 40-80 mm. Lapisan drainase berfungsi mengalirkan air keluar dari tubuh bendungan didesain menggunakan beton aspal dengan kadar aspal 4% bergradasi terbuka, dan koefisien permeabilitas 10^{-2} cm/det serta tebal 50-80 mm. lapisan transisi dipasang diantara urugan batu dan lapisan dasar. Lapisan ini berupa batu pecah dengan ukuran butir 5-100 mm dan tebal minimum 35-50 mm. Lapisan pelindung dibuat dari bahan aspal mastik dengan tebal 2 mm. Sementara itu, sambungan antara membran dan galeri harus dibuat kedap air.
- b. Desain bendungan tipe urugan batu dengan membran beton
 - Pada bendungan tipe urugan dengan membran beton, desain tubuh bendungan sama dengan tipe urugan batu dengan membran beton aspal.
 - Membran beton, terbuat dari beton bertulang yang didesain dalam lempengan pelat dengan ukuran lebar 15 m dan panjang 30 m yang disambung dengan sambungan konstruksi kedap air. Sementara itu, tebalnya bervariasi tergantung tinggi tekana air yang harus dipikul (tebal $0.3+0.003H$; H = tinggi air dalam m). Kuat tekan beton didesain sesuai peraturan beton yang berlaku dan perhitungan tegangan-regangan pada membran dan tubuh bendungan harus dihitung dengan metode elemen hingga.

2.6.4 Pertimbangan pemilihan tipe bendungan

Pemilihan tipe bendungan bisa disesuaikan dengan kondisi topografi lokasi calon bendungan. Berikut beberapa pertimbangan yang bisa digunakan untuk menentukan tipe bendungan.

Tabel 2. 2 Tipe bendungan berdasarkan pertimbangan desain
(SNI 8062:2015)

Pertimbangan desain	Tipe urugan tanah homogen	Tipe urugan zonal	Tipe urugan membran
Tinggi bendungan	Tinggi maksimum 30m, tetapi ada yang sampai 50m asalkan desain sistem drainase baik.	Tidak terbatas. Untuk bendungan kecil, lebar zonal menjadi sempit sehingga pelaksanaannya sulit.	Tinggi tak terbatas. seperti di bendungan Areina (Brazil) 160m dan Jepang 70m.
Sifat dan jumlah material yang dapat digunakan	Material tanah dibutuhkan dalam jumlah besar. Semua jenis tanah dapat digunakan.	Hanya bila material kedap air, material semilulus air dan material lulus air ditemukan dalam jumlah yang cukup.	Dibutuhkan material lulus air dalam jumlah besar, gradasi baik dan kompresibilitas rendah.
Kondisi topografi bendungan	Tidak ada ketentuan khusus, tetapi ebatmen yang agak landai lebih menguntungkan.	Bentuk V untuk mengurangi volume bahan urugan, tetapi tidak selalu menguntungkan dari segi konstruksi dan tata letak bangunan.	Untuk ebatmen dengan lereng tegak, maka untuk konstruksi membran kedap air harus

Pertimbangan desain	Tipe urugan tanah homogen	Tipe urugan zonal	Tipe urugan membran
			dilakukan dengan hati-hati.
Kondisi geologi lokasi bendungan	Bendungan rendah dapat dibangun walaupun daya dukungnya sangat rendah. Pondasi dapat diperbaiki.	Tidak menguntungkan membangun bendungan di atas pondasi tanah. Pondasi batu dibutuhkan untuk zona kedap air bendungan tinggi.	Tidak menguntungkan bila terletak di atas pondasi yang dapat menimbulkan penurunan tidak merata.
Kondisi meteorologi	Tidak menguntungkan di daerah dengan intensitas hujan tinggi.	Dibutuhkan zona kedap air yang lebar di daerah dengan intensitas hujan tinggi. Pasir, kerikil dan batu tidak terpengaruh oleh intensitas hujan.	Tidak terpengaruh pada daerah dengan intensitas hujan tinggi.
Operasi waduk	Tidak menguntungkan bila terjadi surut cepat pada waduk	Bila diperkirakan terjadi surut cepat, maka harus diteliti permeabilitas dari zona-zona	Surut cepat tidak berpengaruh. Deformasi cukup besar bisa terjadi

Pertimbangan desain	Tipe urugan tanah homogen	Tipe urugan zonal	Tipe urugan membran
		sebelah udik bendungan.	pada pengisian waduk untuk pertama kali.
Metode konstruksi	Pelaksanaan konstruksi secara cepat tidak menguntungkan, terjadi peningkatan tekanan pori. Namun, pelaksanaan konstruksi adalah sederhana, karena material homogen.	Harus dipilih cara konstruksi yang paling tepat untuk setiap zona. Kecepatan konstruksi pada setiap zona harus dilaksanakan dengan perbedaan sekecil mungkin.	Pelaksanaan konstruksi dapat dilakukan dengan cepat.
Lain-lain	-	-	Bocoran bisa besar

2.7 Perencanaan Bahan Urugan

2.7.1 Bahan untuk penimbunan tubuh bendungan dan metode pemilihannya

Secara umum bendungan urugan membutuhkan bahan-bahan yang akan dipergunakan untuk zona-zona peralihan maupun untuk zona-zona lulus air. Bahan urugan biasanya diperoleh dari penggalian di lokasi calon bendungan maupun dari lokasi di sekitar bendungan (*borrow area*).

1) Bahan untuk zona kedap air

Bahan kedap air mutlak diperlukan dalam penyusunan zona tubuh bendungan. Tipe serta stabilitas bendungan sangat tergantung pada karakteristik, kualitas serta kuantitas dari bahan yang digunakan untuk penimbunan pada zona kedap air tersebut.

Karakteristik bahan kedap air ini sangat beragam, tergantung tingkat kadar air yang terkandung didalamnya, metode penimbunan, kepadatan baik sesudah penimbunan maupun setelah konsolidasi. Untuk itu, berikut merupakan syarat utama untuk bahan kedap air:

a. Koefisien filtrasi

Sebagai standard, koefisien filtrasi dari bahan yang digunakan supaya tidak melebihi nilai 1×10^{-5} cm/dt. Pada dasarnya semakin halus butiran, maka koefisien filtrasinya semakin rendah dan nilai K biasanya sudah dapat diperkirakan berdasarkan persentase butiran pada bahan yang dapat melalui saringan no. 200. Hasil penelitian menunjukkan bahwa apabila suatu bahan dapat melalui saringan No. 200 lebih rendah dari 7% maka bahan tersebut biasanya lulus air. Akan tetapi bila lebih dari 50% yang dapat melalui saringan tersebut, tidak dapat digunakan sebagai bahan kedap air karena plastisitasnya sangat tinggi sehingga mudah longsor dan runtuh. Selain itu, bahan yang sama akan memberikan nilai K yang berbeda apabila tingkat kepadatan dan angka kadar airnya berbeda-beda.

b. Kekuatan geser

Tingkat kekuatan geser dipengaruhi oleh angka kadar air serta tingkat pematatannya. Akan tetapi perubahan kekuatan geser tidak terlalu besar meskipun kemampuan penyerapan airnya tinggi. Kekuatan geser suatu bahan ditentukan oleh daya kohesi (C) dan sudut geser dalamnya (Q). Pada umumnya suatu bahan dengan harga $D = 95$ s/d 98 merupakan harga yang cukup baik untuk digunakan pada penimbunan tubuh bendungan. Sedangkan bahan dengan harga $D = 90$ s/d 95 biasanya digunakan untuk pembangunan tubuh bendungan yang rendah (< 30 meter).

c. Karakteristik proses konsolidasi

Semakin halus gradasi suatu bahan dan semakin tinggi angka kadar airnya, maka tingkat konsolidasinya akan menjadi lebih besar dan tekanan air pori mungkin dapat terjadi pada saat berlangsungnya proses konsolidasi.

d. Kondisi bahan pada saat pelaksanaan pembangunan bendungan

Pada umumnya penimbunan dan pemadatan bahan-bahan berbutir kasar lebih mudah dilakukan dari pada bahan-bahan berbutir halus. Demikian pula tingkat kelembapan suatu bahan dapat mempengaruhi pengerjaannya, dimana pengerjaan akan lebih mudah ketika kelembapan material rendah dari pada ketika kelembapannya tinggi.

e. Zat-zat organis yang terkandung didalam bahan

Zat-zat organis merupakan zat-zat yang mudah terurai sehingga menyebabkan terjadinya perubahan fisik pada zat-zat tersebut dan menyebabkan penurunan stabilitas dari bahan. Kadungan zat organis pada bahan tidak boleh lebih dari 5%.

2) Bahan-bahan untuk filter dan zona transisi

Zona-zona timbunan tanah dan zona-zona timbunan batu pada tubuh suatu bendungan biasanya dipisahkan oleh zona-zona peralihan. Spesifikasi yang memenuhi standar untuk bahan-bahan pasir dan kerikil dapat dilihat pada Tabel 2.3

Tabel 2. 3 Hasil-hasil pengujian kompresi tri-sumbu dalam skala yang besar untuk bahan zona transisi (Dept. Civil Engineering, US Army, Electric Power Co. In France)

Kelompok gradasi	Nomor contoh	γ_d (t/m^3)	ϕ (°)	C(kg/cm)
A	10	1.97-2,17 (2,04)	38-48 (41)	0,04-0,46 (0,34)
B	22	1,78-2,40 (2,07)	35- 43(40)	0-1,31 (0,41)
C	32	1,57-2,19 (1,94)	29-41 (38)	0-1,21 (0,31)

Kelompok gradasi	Nomor contoh	γ_d (t/m^3)	ϕ (°)	C(kg/cm)
D	1	1,57	32	0,17
E	2	1,46-1,68 (1,57)	36-37 (36)	0,18-0,54 (0,36)

Yang akan digunakan untuk timbunan tubuh bendungan, hanya bahan dengan $\gamma_r \geq 50$ yang akan dipertimbangkan.

Agar filter dapat berfungsi sebagai penahan keluarnya butiran-butiran halus, maka harus memenuhi syarat berikut:

- a. $F_{15}/B_{15} > 5$
- b. Kurva-kurva gradasi bahan filtrasi dan bahan zona yang dilindungi merupakan garis yang hampir paralel.
- c. Apabila di dalam susunan bahan zona yang dilindungi tempat kerikil yang berdiameter lebih dari 4,75 mm, maka diameter terbesarnya adalah 25mm.
- d. Di dalam susunan bahan filter tidak diperkenankan adanya butiran halus melebihi 5% serta adanya butiran yang bersifat kohesif.

Penentuan ketebalan filter bukan hanya ditentukan karena faktor teoritis namun juga dipertimbangkan faktor-faktor praktis serta faktor keamanan lainnya.

- a. Jika diperoleh pasir sungai dengan butiran seragam dan berbentuk bulat dengan koefisien filtrasi $K = 1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$ cm/dt, maka dapat digunakan sebagai filter dengan ketebalan 20 s/d 30 cm.
- b. Akan tetapi dengan pertimbangan faktor-faktor praktis, faktor-faktor keamanan saat penimbunan maupun eksploitasi serta faktor besarnya debit filtrasi yang harus diluluskan, maka dalam pelaksanaannya tebal filter antara 2 s/d 3 meter.

3) Bahan batu

Bahan batu biasanya diperoleh dengan memecah batuan massif di dalam alur sungai. Bahan batu akan dianggap ideal apabila memenuhi persyaratan berikut:

- a. Ukuran batu antara 45 s/d 60 cm dengan berat antara 250 s/d 500 kg atau lebih.
- b. Batu-batu yang berdiameter kurang dari 10 cm yang terdapat dalam timbunan tubuh bendungan tidak diperkenankan melebihi 5% komposisinya.
- c. Bahan batu tidak mudah pecah.
- d. Berat jenisnya tidak kurang dari 2,5
- e. Kekuatan tegangan tekan batu tidak kurang dari 700 kg/cm²
- f. Daya tahan terhadap pelapukan tinggi.

Untuk bendungan yang lebih rendah dari 50m dapat digunakan bahan batu dengan spesifikasi:

- a. Berat jenis sekitar 2,3
- b. Kekuatan tegangan tekannya sekitar 300 kg/cm²
- c. Daya tahan terhadap pelapukan sebesar 0.15%

Mengenai kekuatan geser bahan-bahan batu, biasanya diperoleh angka-angka sebagai berikut:

- a. Apabila bahan batu cukup keras dan stabil, maka biasanya untuk D50= 2~10 cm, maka besarnya sudut geser dalam (ϕ) sekitar 40°.
- b. Untuk D50>D15 cm, maka harga $\phi = 45^\circ$.
- c. Untuk bahan-bahan batu yang kekuatan tegangan tekannya tidak besar, maka $\phi = 35^\circ$.

Harga ϕ dapat juga diperoleh dengan perhitungan berdasarkan teori Dr. T. Mogami

$$\text{Sin}\phi = \frac{K}{1+e} \quad (2.5)$$

e : angka pori

4) Bahan-bahan lainnya

Selain bahan-bahan yang berkwalitas baik seperti yang telah diuraikan di atas, untuk menyusun tubuh bendungan, kadang juga diperlukan bahan-bahan berkwalitas rendah, seperti

- Bahan batu yang dihasilkan dari batuan lunak yang mudah lapuk
- Pasir atau krikil yang tidak mungkin dapat diambil secara terpisah
- Bahan hasil galian dari pondasi zona kedap air.

- Serta, bahan-bahan yang penyebarannya cukup luas namun karakteristiknya tidak seragam.

Bahan-bahan tersebut biasanya digunakan untuk penimbunan zona sembarang (*random zone*).

2.7.2 Pemilihan lokasi zona random

Pada bendungan tipe urugan zonal, tubuh bendungan dibagi menjadi beberapa zona termasuk didalamnya zona random. Zona random tersusun dari material galian di lokasi bendungan. Beberapa tipe pemilihan lokasi zona random bisa dilihat pada Gambar 2.3. (*Design of Small Dams, 1987*)

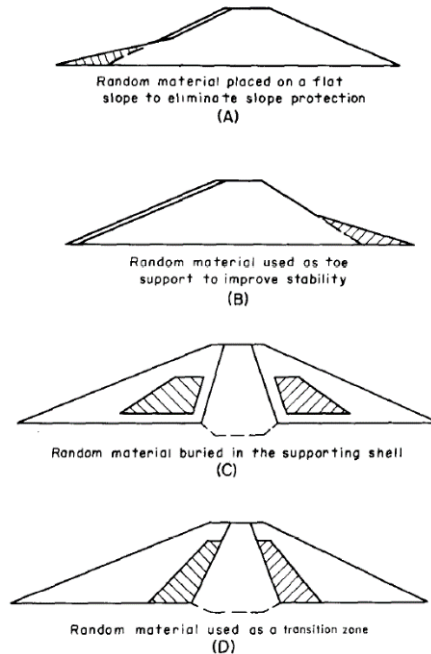
Penyusunan tanah galian untuk *maindam* dapat mengalami kesalahan, untuk itu perlu adanya batasan zona untuk mengakomodasi kelebihan dan kekurangannya. Dalam beberapa kasus, diperlukan tes laboratorium untuk menentukan material yang sesuai untuk zona random. Selain itu, harus diperkirakan pula prosentase dari struktur galian yang sesuai untuk berbagai zona serta kembang susut dari material yang menyusun zona tersebut. Kekurangan material juga harus diperhitungkan untuk memperkirakan jumlah material yang harus diambil dari *borrow area* agar desain akhir *maindam* ekonomis dan memiliki urutan konstruksi yang wajar.

2.7.3 Desain kemiringan *maindam* berdasarkan material penyusunnya

Desain kemiringan *maindam* biasanya ditentukan berdasarkan karakter material penyusun yang tersedia, kondisi pondasi, dan tinggi struktur *maindam*. Untuk menjaga kestabilan akibat rembesan (*seepage*) pondasi kedap air perlu diletakkan pada bagian upstream bendungan atau menambah kemiringan pada downstream serta adanya filter drainase horizontal.

Kemiringan upstream dapat bervariasi dari 2:1 hingga setinggi 4:1, untuk stabilitas biasanya 2,5:1 atau 3:1. Untuk lebih jelasnya, kemiringan yang direkomendasikan untuk tubuh

bendungan urugan bisa dilihat pada Tabel 2.4. (*Design of Small Dam, 1987*)



Gambar 2. 3 Lokasi pengisian material zona random pada potongan melintang maindam. (*Design of Small Dam, 1987*)

2.7.4 Klasifikasi Bahan Urugan

Mengklasifikasi bahan tanah adalah melakukan serangkaian pengamatan, pengujian dengan cara sederhana dengan membandingkan sifat teknis bahan tanah untuk pengelompokan bahan-bahan tersebut dalam beberapa golongan tertentu.

1) Kriteria dari metode klasifikasi standard

Pada kondisi yang sebenarnya amatlah sukar dijumpai, dimana kerikil, pasir, lanau dan lempung dalam keadaan yang terpisah-pisah. Biasanya bahan-bahan tersebut bercampur aduk dalam proporsi-proporsi tertentu. Karena itu metode klasifikasi standard bahan senantiasa didasarkan pada karakteristik teknis

bahan-bahan tersebut, yaitu ukuran butiran, gradasi, plastisitas dan kemampuan kompresinya.

Biasanya bahan tanah berbutir kasar atau halus didasarkan pada ukuran butirannya, sedang tingkat kandungan zat-zat organisnya didasarkan pada penyelidikan baik di lapangan maupun di laboratorium.

Selanjutnya karakteristik bahan berbutir kasar didasarkan pada gradasinya, sedangkan bahan-bahan berbutir halus didasarkan pada plastisitasnya. Dengan penggolongan- penggolongan tersebut di atas akhirnya ditetapkan 15 golongan utama klasifikasi bahan dan nama dari masing-masing kelompok, pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 4 Rekomendasi kemiringan untuk bendungan urugan pada pondasi yang stabil

Kasus	Tipe	Kegunaan	Penurunan tiba-tiba ¹	Klasifikasi tanah ²	Upstream Slope	Downstream slope
A	Homogen atau modifikasi homogen	Penahan atau tampungan	No	GW,GP,SW,SP	Pervious, unsuitable	
				GC,GM,SC,SM	2,5:1	2:1
				CL,ML CH,MH	3:1 3,5:1	2,5:1 2,5:1
B	Modifikasi homogen	Tampungan	Yes	GW,GP,SW,SP	Pervious, unsuitable	
				GC,GM,SW,SM	3:1	2:1
				CL,ML CH,MH	3,5:1 4:1	2,5:1 2,5:1

¹keruntuhan tiba-tiba sebesar 6 inci atau lebih setiap hari pada ketinggian tampungan air maksimum.

²tanah OL dan OH tidak direkomendasikan untuk bagian utama dalam bendungan urugan homogen.

Tabel 2. 5 Standarisasi klasifikasi dari tanah (Sosrodarsono, 2002)

Prinsip Klasifikasi		Group Symbol	Nama Butiran	Metode pembedaan di lapangan tidak termasuk butiran dengan diameter lebih dari 3")			
1	2	3	4	5			
Tanah berbutir kasar	Termasuk lebih dari 50% partikel lebih besar dari ayakan 200(0.074mm)	Kerikil lebih dari separuh butiran kasar, lebih besar dari Ø4 (0.4.76 mm)	Dalam hal observasi klasifikasi, ¼" (16 mm) sama dengan ayakan no4	Kerikil bersih	GW	Kerikil dengan susunan baik, tanah campur kerikil dan pasir, tidak termasuk atau termasuk seluruhnya tanah berbutir halus	Termasuk seluruh butiran ukuran sedang di daerah yang luas
				Tidak termasuk seluruhnya tanah berbutir halus	GP	Kerikil dengan susunan buruk, tanah campur kerikil dan pasir, tidak termasuk atau termasuk seluruhnya tanah berbutir halus.	Hanya satu jenis ukuran butiran, termasuk banyak ukuran butiran di beberapa daerah terbatas dan butiran kecil lainnya.
					GM	Tanah campur kerikil berlumpur, kerikil, pasir dan lempung.	Butiran halus dengan plastisitas kecil atau tidak sama sekali (lihat pembedaan dengan group symbol ML)
					GC	Tanah campur kerikil berlumpur, kerikil, pasir dan lempung.	Butiran halus dengan plastisitas (lihat pembedaan dengan group symbol CL)
	Pasir lebih dari separuh butirannya lebih kecil dari Ø4	Kerikil dengan tanah berbutir halus (termasuk sebagian tanah	SW	Pasir dengan susunan baik, pasir berkerikil dan termasuk seluruhnya tanah berbutir halus atau tidak termasuk.	Termasuk seluruh butiran ukuran sedang daerah yang luas.		
			SP	Pasir dengan susunan buruk, pasir berkerikil dan tidak termasuk atau termasuk seluruhnya tanah berbutir halus.	Hanya satu jenis ukuran butiran, termasuk banyak ukuran butiran pada beberapa daerah yang terbatas dan butiran ukuran kecil lainnya.		

		(0.4.76 mm)	berbutir halus)	SM	Pasir berlumpur dan tanah campur pasir dan lumpur.	Butiran halus dengan plastisitas kecil atau tidak sama sekali (lihat perbedaan dengan group symbol ML)		
				SC	Pasir berlempung dan tanah campur pasir dan lempung.	Butiran halus dengan plastisitas (lihat perbedaan dengan group symbol CL)		
Tanah berbutir halus	Termasuk dari 50% partikel-partikel	Lumpur dan tanah liat				Metode perbedaan untuk tanah yang partikel-partikelnya lebih kecil dari Ø40 (0.42mm)		
		Batas cair <50%		ML	Lumpur anorganis dan pasir berlumpur sangat halus atau pasir berlempung halus yang berasal dari batu pecah atau lumpur berlempung dengan plastisitas rendah.	Kekuatan kering (percobaan hancur)	Dilatancy (percobaan getaran)	Kekuatan kohesi (percobaan gulingan)
				CL	Lempung anorganis dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlumpur dan tanah steril.	Tidak-sangat halus	Cepat-lambat	Tidak
				OL	Lumpur organis dengan plastisitas rendah dan lempung berlumpur organis.	Sedang-besar	Lambat-sangat lambat	Sedang
		Lumpur dan tanah liat		MH	Lumpur anorganis, pasir micrococcus atau tomacoccus halus atau tanah berlumpur,	Sangat kecil-sedang	lambat	Sangat kecil

				tanah dengan plastisitas tinggi.			
		Batas cair >50%	CH	Lempung anorganis dengan plastisitas tinggi dan tanah subur.	Sangat kecil-sedang	Lambat-tidak	Sangat kecil-tidak
			OH	Lempung anorganis dengan plastisitas sedang sampai tinggi dan lumpur organis.	Besar-sangat besar	Tidak	Kuat
		Tanah organis	Pt	Tanah gemuk dan tanah jenis lain yang banyak bahan organis.	Sedang-besar	Sedang-sangat lambat	Sangat kecil-sedang

2) Prosedur pengklasifikasian bahan tanah metode standard

Prosedur pengklasifikasian bahan-bahan tanah dapat dilakukan sesuai dengan petunjuk seperti tertera pada Tabel 2.6. Dua (2) buah huruf yang tertera pada tabel tersebut, merupakan singkatan-singkatan dari istilah -istilah dalam Bahasa Inggris, dimana huruf pertama menunjukkan jenis dari mana bahan tanah dan huruf kedua menunjukkan atribut dari bahan tersebut. Untuk tanda-tanda jenis tanah yang dominan dari bahan-bahan adalah sebagai berikut:

- G : Kerikil (Gravel)
- S : Pasir (Sand)
- M : Lanau (Silt = Mo)
- C : Lempung (Clay)
- O : Organik (Organic)
- Pt : Gambut (Peat)

Untuk tanda-tanda atribut dari tanah digunakan huruf-huruf sebagai berikut:

- W : Bergradasi baik (Well graded)
- P : Bergradasi tidak baik (Poor graded)
- C : Kelempungan (Clay binder)
- L : Plastisitas rendah (Low plasticity)
- H : Plastisitas tinggi (High plasticity)

3) Klasifikasi karakteristik bahan tanah

Contoh penyusunan metode pengklasifikasian standard untuk bahan timbunan tubuh bendungan dan pondasi yang akan mendukung bendungan dapat diperiksa pada tabel berikut ini.

Tabel 2. 6 Sifat-sifat khusus tanah berdasarkan klasifikasi standard (*Sosrodarsono, 2002*)

Pembagian Utama		Lambang	Irisan	Warna	Nama khusus	Nilai bahan timbunan
1	2	3	4	5	6	7
Tanah berbutir kasar	Kerikil dan tanah berkerikil	CW		Merah	Kerikil dengan gradasi yang baik, campuran kerikil dengan pasir mengandung sedikit tanah berbutir halus.	Stabilitas baik dapat digunakan sebagai lapisan tembus air yang dangkal dari tanggul dan bendungan.
		GP			Kerikil dengan gradasi yang tidak baik, campuran kerikil dengan pasir mengandung sedikit tanah berbutir halus.	Stabilitas dapat dipergunakan untuk lapisan tembus air yang dangkal dari tanggul dan bendungan.

Pembagian Utama		Lambang	Irisan	Warna	Nama khusus	Nilai bahan timbunan
1	2	3	4	5	6	7
		GM		Kuning	Kerikil lanauan, campuran kerikil dengan pasir dan lanau.	Stabilitas baik, tidak baik terutama untuk lapisan yang dangkal, tetapi dapat digunakan untuk inti (<i>core</i>) yang kedap air atau selimut (<i>blanket</i>).
		GC			Kerikil lempungan, campuran kerikil, pasir dan lempung.	Stabilitas baik, dapat digunakan untuk inti (<i>core</i>) yang kedap air.
	Pasir dan tanah berpasir	SW		Merah	Pasir dengan gradasi yang baik, pasir berkerikil	Stabilitas baik, dapat digunakan untuk bagian yang tembus air perlu

Pembagian Utama		Lambang	Irisan	Warna	Nama khusus	Nilai bahan timbunan
1	2	3	4	5	6	7
					mengandung atau tidak sedikit tanah berbutir halus.	untuk perlindungan permukaan.
		SP			Pasir dengan gradasi yang kurang baik, pasir berkerikil mengandung atau tidak tanah berbutir halus.	Stabilitas tanah baik, dapat digunakan untuk tubuh bendungan dengan lereng sedang.
		AM		Kuning	Pasir lanauan, campuran pasir dengan lanau	Stabilitas sedang, tidak baik terutama untuk untuk lapisan yang dangkal, dapat digunakan untuk inti kedap

Pembagian Utama		Lambang	Irisan	Warna	Nama khusus	Nilai bahan timbunan
1	2	3	4	5	6	7
						air atau tubuh bendungan.
		SC			Pasir lempungan, campuran pasir dengan lempung	Stabilitasnya sedang, dapat digunakan untuk konstruksi inti yang kedap air untuk pengendalian banjir.
Tanah berbutir halus	Lumpur dan tanah liat untuk batas cair 50	ML		Hijau	Lanau anorganis dan pasir sangat halus, serbuk batu berlanau atau pasir halus lempungan, lanau lempungan dengan	Stabilitas kecil dapat dipergunakan untuk tanggul dan pengaturan sekedarnya.

Pembagian Utama		Lambang	Irisan	Warna	Nama khusus	Nilai bahan timbunan
1	2	3	4	5	6	7
					plastisitas rendah	
		CL			Lempung anorganis dengan plastisitas rendah atau sedang, lempung pasir, lempung berkerikil, lempung lanauan, lempung.	Stabil, dapat dipergunakan untuk inti (<i>core</i>) yang kedap air dan lapisan kedap air (<i>blanket</i>)
		GL			Lanau organis dengan plastisitas	Tidak baik untuk tanggul

Pembagian Utama		Lambang	Irisan	Warna	Nama khusus	Nilai bahan timbunan
1	2	3	4	5	6	7
					rendah, lempung lanau organis	
	Lumpur dan tanah liat untuk batas cair 50	MH		Biru	Lanau organis, mika atau pasir halus diatomis, tanah lanauan, lanau dengan elastisitas tinggi	Stabilitasnya kurang dapat digunakan untuk inti bendungan yang dipadatkan dengan air, tidak baik untuk tanggul yang dipadatkan dengan mesin pilling.
		CH			Lempung anorganis dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk.	Stabilitasnya sedang dalam hal kemiringan lereng, dapat digunakan untuk inti yang tipis

Pembagian Utama		Lambang	Irisan	Warna	Nama khusus	Nilai bahan timbunan
1	2	3	4	5	6	7
						lapisan selimut (<i>blanket</i>) dan tubuh bendungan.
		OH			Lempung organis dengan plastisitas sedang sampai tinggi, lanau anorganis.	Tidak baik untuk tanggul
		Pt		Oranye	Tanah mengandung gambut dan bahan-bahan organis lainnya	Tidak mungkin digunakan untuk konstruksi.

2.8 Sistem Pengendalian Rembesan Pada Urugan

Berdasarkan SNI 8065:2016 tentang Metode Analisis dan Cara Pengendalian Rembesan Air Untuk Bendungan Tipe Urugan, sistem pengendalian rembesan pada urugan dibedakan menjadi dua yaitu:

2.8.1 Zona urugan

Zona urugan biasanya terdiri atas zona kedap air (inti kedap air) yang dilindungi oleh saring (*filter*) dan zona pelindung untuk stabilitas. Pengendalian rembesan pada zona urugan dapat dilakukan dengan beberapa alternatif berikut :

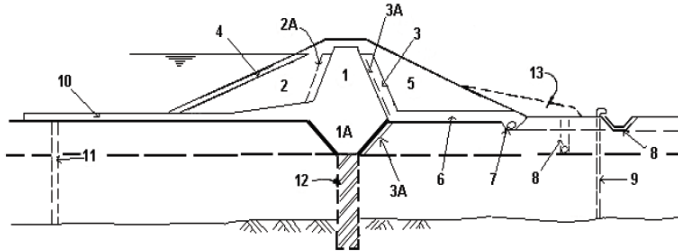
- a) Parit halang (*cutoff trench*)
Parit halang merupakan bagian dari inti kedap air yang dibuat pada lapisan pondasi yang porus, dan bila memungkinkan secara ekonomis akan dibangun mencapai kedalaman pondasi yang kedap air. Desain bidang kontak antara inti dan pondasi dianjurkan cukup panjang, untuk mengurangi gradien hidraulik di sepanjang bidang kontak
- b) Zona drainase hilir (*chimney drain*)
Zona drainase hilir harus dilengkapi dengan subzona saring (*filter*) terhadap material inti kedap air dan subzone campuran pasir dan kerikil yang porus, yang memenuhi persyaratan. Alternatif ini harus memiliki kapasitas yang cukup dan ditempatkan cukup tinggi untuk mengatasi kondisi aliran darurat yang mungkin terjadi.
- c) Zona drainase udik dan zona pelindung stabilitas
Alternatif ini biasanya menggunakan material nonkohesif dan mempunyai sifat disipasi air yang tinggi sehingga waktu surutnya cepat.

2.8.2 Selimut drainase

Selimut drainase (*drainage blanket*), biasanya merupakan perpanjangan dari sistem drainase hilir dalam arah horizontal, yang dihubungkan dengan drainase kaki (*toe drain*). Material yang digunakan sebagai selimut harus memenuhi syarat filter. Jika material bagian atas dan bawah mempunyai kemungkinan terjadinya perpindahan partikel halus ke dalam material drainase

maka selimut drainase harus didesain agar mampu menampung air dari zona drainase hilir, pondasi dan rembesan air hujan.

2.9 Sistem Pengendalian Rembesan Pada Pondasi



Keterangan gambar:

1	Zona penahan air (inti)	6	Selimut drainase
1A	Parit halang	7	Drainase kaki (<i>toe drain</i>)
2	Zona drainase udik untuk pelindung stabilitas	8	Parit drainase (terbuka atau tertutup)
2A	Zona transisi	9	Sumur pelepas tekanan (<i>relief wells</i>)
3	Zona drainase hilir (<i>chimney drain</i>)	10	Selimut kedap air
3A	Subzona saringan (filter)	11	Dinding halang slurry (<i>Slurry wall cutoff</i>)
4	Zona armor	12	<i>Grouting</i> tirai
5	Zona pelindung stabilitas hilir	13	Berm rembes air

Gambar 2. 4 Macam sistem pengendali rembesan pada pondasi (SNI 8065:2016)

Berdasarkan SNI 8065: 2016 tentang Metode Analisis dan Cara Pengendalian Rembesan Air untuk Bendungan Tipe Urugan terdapat beberapa sistem pengendalian rembesan pada pondasi tubuh bendungan diantaranya, parit drainase hilir, sumur pelepas tekanan, selimut kedap air, dinding halang slary (*slurry*), dinding diafragma, injeksi (*grouting*) tirai, perbaikan bidang kontak, berm rembesan air di hilir, galeri (terowongan drainase), dan pengerboran drainase semi horizontal.

2.9.1 Parit drainase hilir

Parit drainase hilir dibuat sejajar dengan kaki bendungan digunakan sebagai drainase untuk rembesan pondasi. Parit ini didesain dengan memberi lining pada material bergradasi sesuai

dengan syarat filter, dan ditutup dengan material riprap sebagai bahan pelindung terhadap erosi.

2.9.2 Sumur pelepas tekanan

Sumur pelepas tekanan (*relief well*) berfungsi mengurangi tekanan atesis dalam akuifer terkekang dengan aman, karena adanya pengaruh tekanan angkat atau gradient yang melewati lapisan terkekang di hilir bendungan. Sumur ini berfungsi sebagai drainase dari formasi berbutir kasar, sehingga material yang digunakan untuk sumur harus memenuhi syarat filter.

2.9.3 Selimut kedap air

Selimut kedap air di bagian hulu digunakan bila pondasi berupa material yang sangat porus. Selimut ini merupakan kelanjutan horizontal dari dinding halang bendungan (inti). Selimut ini berfungsi untuk mengurangi jumlah rembesan akibat beda tinggi muka air waduk dan muka air hilir. Untuk mencegah terjadinya erosi buluh dari material selimut ke dalam material pondasi, maka perlu dipasang lapisan filter di bawah selimut serta lapisan selimut harus dibuat lebih tebal di daerah sambungan dengan inti bendungan.

2.9.4 Dinding halang slari (slurry)

Dinding halang slari adalah dinding halang yang sangat efektif untuk mencegah rembesan air masuk melewati pondasi bendungan. Dinding halang ini digunakan apabila dinding halang berupa parit tidak ekonomis untuk mencapai pondasi kedap air.

2.9.5 Dinding diafragma

Dinding diafragma digunakan sebagai dinding halang, biasanya terbuat dari beton namun kadang menggunakan proses bahan dan alat yang dipatenkan. Cara ini sangat efektif untuk mencegah air melewati tubuh dan pondasi bendungan.

2.9.6 Injeksi (grouting) tirai

Injeksi berupa tirai dapat digunakan untuk mengurangi rembesan, tetapi sebagai dinding halang tingkat efektivitasnya tergantung pada kondisi geologi. Pada umumnya kondisi injeksi tirai hanya berfungsi untuk mengurangi aliran rembesan total melewati pondasi, namun tidak berfungsi untuk memperpanjang

garis aliran karena suatu bukaan kecil pada tirai akan menimbulkan garis aliran memendek. Tipe injeksi yang sering dilakukan adalah injeksi semen, yang hanya efektif digunakan pada lapisan berbutir kasar. Selain itu, injeksi dengan campuran bahan kimia juga sering dilakukan pada pondasi berbutir halus.

2.9.7 Perbaikan bidang kontak

Perbaikan bidang kontak antara urugan dan pondasi bendungan tipe urugan yang dibangun di atas pondasi batuan harus dilakukan sesuai standard yang berlaku.

2.9.8 Berm rembesan air di hilir

Berm rembesan di hilir adalah konstruksi yang efektif untuk melawan gradient keluaran yang tinggi atau tekanan angkat yang tinggi pada kaki hilir bendungan. Material berm berfungsi sebagai filter, sistem drainase dan beban pengimbang (*counterweight*).

2.9.9 Galeri (terowongan drainase)

Galeri merupakan serangkaian lubang drainase yang di bor, yang kadang-kadang diperlukan untuk mengurangi tekanan air pori dalam batuan di ebatmen, dan memindahkan aliran rembesan dari bidang kontak antara tubuh dan pondasi bendungan.

2.9.10 Pengeboran drainase semi horizontal

Pengeboran drainase semi horizontal dapat dibuat ke dalam ebatmen bendungan untuk mengurangi tekanan air pori berlebih atau menahan rembesan sebelum mencapai bendungan.

2.10 Perencanaan Pengendali Rembesan Air

Berdasarkan SNI 8062:2015, rembesan air yang melewati pondasi dan ebatmen dapat dikendalikan menggunakan dinding halang (*cutoff wall*) rembesan air, lapisan kedap air horizontal sebelah udik dan lapisan drainase horizontal sebelah hilir. Sementara pada ebatmen bisa digunakan galeri. Berikut merupakan beberapa desain dinding halang rembesan:

2.10.1 Dinding halang rembesan air

2.10.1.1 Parit halang

Parit halang adalah dinding halang yang dibuat dengan cara menggali puritan di bawah inti bendungan melewati pondasi

yang rembes air. Kemudian galian tersebut diisi dengan bahan kedap air yang dipadatkan. Untuk mendapatkan dinding yang baik, lebar dasar harus diambil seperempat dari beda tinggi muka air waduk maksimum dan tinggi muka air hilir serta lebar minimum tidak boleh kurang dari 6 m. Bila gradasi bahan isian kedap air yang digunakan tidak berfungsi sebagai filter terhadap material pondasi rembes air, perlu ditambahkan satu lapisan antara yang dapat berfungsi sebagai filter. Sistem pengeringan (*dewatering*) biasanya dibutuhkan pada waktu pelaksanaan penggalian parit halang dan pengisian kembali.

2.10.1.2 Dinding halang slari dan beton

Dinding halang juga bisa dibuat dengan dinding halang slari menembus lapisan pondasi rembes air sampai kedalaman maksimum yang diperlukan. Biasanya ketebalan dinding ini mencapai 60 cm sampai 100 cm dan dibuat dengan menggali paritan yang distabilkan dengan menggali paritan yang distabilkan slari bentonit atau beton. Lokasi paritan biasanya berada pada kaki udik bendungan yang juga berfungsi meningkatkan kestabilan bendungan. Pada pondasi material bongkahan batu digunakan bentonit untuk mencegah keruntuhan. Pada waktu pelaksanaan, dapat terjadi keruntuhan paritan sehingga kemungkinan pada bagian itu tidak terisi isian kedap air. Hal ini harus dijaga karena akan menimbulkan bagian yang lemah dan air bisa merembes. Bila dinding slari digunakan sebagai konstruksi pengendali rembesan air, maka pada waktu pengisian pertama waduk harus dilakukan pengamatan pisometer secara kontinu. Bila dinding halang slari tidak berfungsi secara efektif, maka perlu dipasang lapisan drainase sebelum menaikkan air waduk.

2.10.1.3 Dinding halang injeksi

Injeksi melewati pondasi batuan atau tanah (termasuk ebatmen), digunakan untuk mengurangi rembesan dan tekanan angkat pada bagian hilir bendungan. Efektivitas injeksi tergantung pada sifat kekar atau rekahan, campuran, peralatan dan prosedurnya. Injeksi tirai biasanya dilakukan dengan membuat lubang bor di bawah zona kedap air dari bendungan tipe urugan.

Kemudian ke dalam lubang itu diinjeksikan sejumlah campuran bahan injeksi dengan tekanan tertentu. Injeksi tirai yang baik harus dibuat minimal tiga baris pada pondasi batuan. Dalam pelaksanaannya injeksi tirai pada pondasi harus dikombinasikan dengan menggunakan bahan semen dan kimiawi. Bahan kimiawi digunakan pada baris dalam, sedangkan bahan semen pada baris sebelah luar. Pelaksanaan injeksi harus mengacu pada standar SNI 03-2393-1990.

2.10.2 Selimut kedap air horizontal sebelah udik

Selimut kedap air horizontal yang dipasang di sebelah udik merupakan cara praktis untuk mengurangi rembesan serta tekanan angkat di sebelah hilir. Selimut drainase biasanya dibuat satu kesatuan dengan bagian urugan yang kedap air dan dikombinasi dengan pemasangan sumur pelepas tekanan (*relief wells*). Bahan urugan di sebelah udik bendungan dianjurkan tidak diambil dari lapisan kedap air pada daerah genangan. Efektivitas selimut kedap air horizontal sebelah udik tergantung pada panjang, tebal, permeabilitas bahan dan permeabilitas pondasi.

2.10.3 Desain Lapisan Drainase

Lapisan drainase yang terpasang antara pondasi dan bagian urugan sebelah hilir dapat berfungsi ganda yaitu sebagai pengendali rembesan air baik melewati urugan maupun melewati pondasi.

2.10.4 Sumur Pelepas Tekanan (Pressure Relief Wells)

Lapisan tanah atau batuan di bawah pondasi sering kali tidak homogen. Pemasangan lapisan drainase di permukaan pondasi yang berlapis-lapis, mengandung material rembes air biasanya kurang efektif untuk mengurangi tekanan angkat di bawah pondasi. Pemasangan ini akan lebih efektif dengan pemasangan sumur pelepas tekanan yang menembus lapisan rembes air. Biasanya sumur pelepas tekanan dipasang di hilir bendungan dan terbuat dari material yang memenuhi persyaratan sebagai filter. Sumur pelepas tekanan harus ditempatkan dengan posisi ujung bagian atasnya mudah dibersihkan. Selain itu, air juga bisa dialirkan ke saluran terbuka atau suatu sistem pengumpulan

air di luar bendungan. Pemeliharaan harus dilakukan secara kontinu untuk mempertahankan kerja sumuran.

2.10.5 Drainase Kaki Lereng

Perlemahan pada kaki lereng hilir bendungan biasanya terjadi akibat pembuntuan karena terisi oleh butiran pada sistem drainase horizontal. Penggunaan sumur pelepas tekanan atau lapisan drainase horizontal sampai lapisan batuan tidak dapat mencegah perlemahan pada kaki lereng bendungan. Untuk mencegah kejadian tersebut, biasanya digunakan sistem drainase di kaki lereng hilir dan dikombinasikan dengan drainase horizontal atau sumur pelepas tekanan. Bahan yang digunakan untuk drainase kaki lereng harus memenuhi syarat filter.

2.10.6 Drainase galeri

Galeri biasanya digunakan untuk mengendalikan rembesan air yang melalui ebatmen. Galeri digali menembus ebatmen dengan arah sejajar sumbu bendungan dan di dalamnya dibuat lubang-lubang drainase untuk mengendalikan rembesan air lewat ebatmen. Ukuran galeri harus cukup besar untuk memungkinkan pelaksanaan injeksi di kemudian hari bila dibutuhkan.

2.11 Stabilitas Bendungan Terhadap Aliran Filtrasi

Untuk mengetahui kemampuan daya tahan tubuh bendungan serta pondasinya terhadap gaya-gaya akibat aliran filtrasi, maka diperlukan penelitian-penelitian yang meliputi:

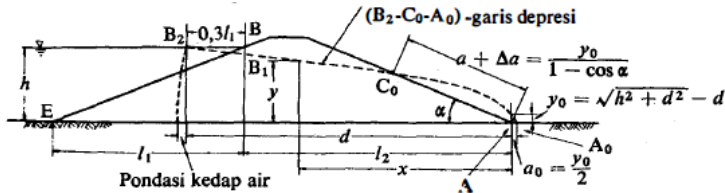
- Formasi garis depresi (*seepage line formation*) dalam tubuh bendungan sesuai elevasi permukaan air yang ada pada waduk.
- Kapasitas air filtrasi yang mengalir melalui tubuh bendungan
- Kemungkinan terjadinya gejala sufosi (*piping*) yang disebabkan oleh gaya-gaya hidrodinamis dalam aliran filtrasi.

2.11.1 Formasi garis depresi

Formasi garis depresi pada zona kedap air dapat diperoleh dengan metode Casagrande. Apabila angka permeabilitas vertikalnya (K_v) berbeda dengan angka permeabilitas horizontalnya (K_h), maka akan terjadi deformasi garis depresi

dengan mengurangi koordinat horizontalnya sebesar $\sqrt{Kv/Kh}$ kali.

Pada Gambar 2.5, ujung tumit hilir bendungan dianggap sebagai titik permulaan koordinat dengan sumbu-sumbu x dan y, maka garis depresi dapat diperoleh dengan persamaan parabola dasar.



Gambar 2. 5 Garis depresi pada bendungan homogen (sesuai garis parabola yang mengalami modifikasi)

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0} \quad (2.6)$$

atau

$$y = \sqrt{2y_0x + y_0^2} \quad (2.7)$$

dan

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \quad (2.8)$$

Dimana:

h : jarak vertikal antara titik A dan B

d : jarak horizonral antara titik B2 dan A

l_1 : jarak horizontal antara titik-titkk B dan E

l_2 : jarak horizontal antara titik-titik B dan A

A : ujung tumit hilir bendungan

B : titik perpotongan antara permukaan air waduk dan lereng udik bendungan

A_1 : titik perpotongan antara parabola bentuk besar garis depresi dengan garis vertikal melalui titik B.

B_2 : titik yang terletak sejauh $0.3 l_1$, horizontal ke arah udik dari titik B.

Pada titik permulaan, garis depresi berpotongan tegak lurus dengan lereng udik bendungan, dan dengan demikian titik C_0

dipindahkan ke titik C sepanjang Δa . Panjang garis Δa tergantung dari kemiringan lereng hilir bendungan dimana air filtrasi tersembul keluar, sehingga dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$a + \Delta a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha} \quad (2.9)$$

Dimana:

a : jarak \overline{AC} (Gambar 2.)

Δa : jarak $\overline{C_0C}$

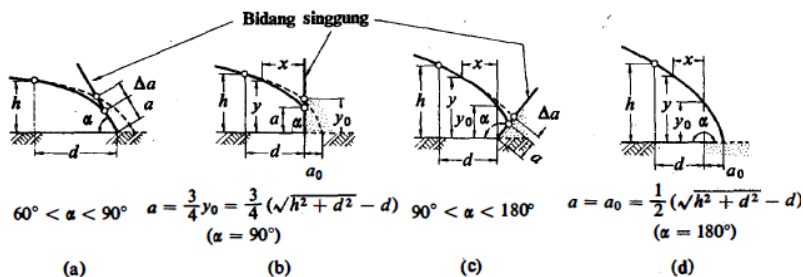
α : sudut kemiringan lereng hilir bendungan.

Angka C diperoleh dari persamaan berikut:

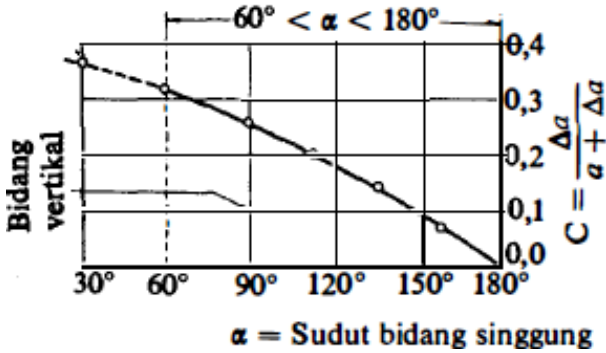
$$C = \frac{a}{a + \Delta a} \quad (2.10)$$

Apabila kemiringan sudut lereng hilir bendungan lebih kecil dari 30° , maka harga a dapat diperoleh dengan rumus sebagai berikut:

$$a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\left(\frac{d}{\cos \alpha}\right)^2 - \left(\frac{h}{\sin \alpha}\right)^2} \quad (2.11)$$



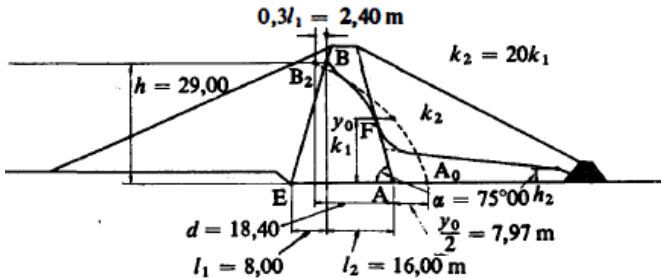
Gambar 2. 6 Beberapa cara untuk memperoleh harga “a” sesuai dengan sudut bidang singgunya (α)



Gambar 2. 7 Hubungan antara sudut bidang singgung (α) dengan $\frac{a}{a+\Delta a}$

2.11.1.1 Menentukan formasi garis depresi pada bendungan dengan inti kedap air vertikal.

1. Untuk zona kedap air



Gambar 2. 8 Skema formasi garis depresi bendungan inti vertikal

Pada Gambar 2.8 diketahui $h = 29 \text{ m}$ dan $d = 0.3 l_1 + l_2 = 18.40 \text{ m}$, dengan demikian:

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d = \sqrt{29^2 + 18.40^2} - 18.40 = 15.94 \text{ m}$$

Parabola bentuk dasar dapat diperoleh dengan persamaan (2.7) sebagai berikut:

$$y = \sqrt{2y_0x + y_0^2} = \sqrt{31.88x + 258.08}$$

Sehingga diperoleh koordinat parabola sebagai berikut:

x(m)	-7.97	0	5	10	15
y(m)	0	15.94	20.33	29.93	27.06

Pada Gambar 2.8, $d = 78^0$ dan $C = 0.28$, maka:

$$a + \Delta_a = \frac{y_0}{1 - \cos\alpha} = \frac{15.94}{1 - 0.2588} = 21.51m$$

Karenanya, harga $\Delta_a = 6.02$ dan $a = 15.49$

2. Untuk zona sembarang

Dengan menganggap koefisien filtrasi zona sembarang sebesar $k_2 = 20k_1$, (k_1 = koefisien filtrasi zone inti kedap air). Dengan anggapan debit aliran filtrasi konstan, maka

$$Q = k_1 \cdot y_0 \cdot L = k_2 \cdot h_2 \cdot L, \text{ dengan demikian harga } h_2 = \left(\frac{k_1}{k_2}\right) y_0 = \left(\frac{1}{20}\right) 15.49 = 0.80m$$

Berdasarkan persamaan (2.7), diperoleh koordinat parabola bentuk dasar sebagai berikut:

$$y = \sqrt{2y_0x + h_0^2} = \sqrt{1.6x + 0.64}$$

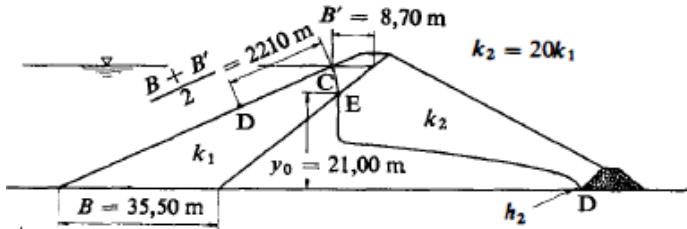
Sehingga diperoleh koordinat parabola sebagai berikut:

x(m)	-0.40	0	10	20	30	40
y(m)	0	0.80	4.08	5.72	6.97	8.04

2.11.1.2 Menentukan Formasi Garis Depresi Pada Bendungan Dengan Inti Miring .

1. Untuk zona kedap air

Pada Gambar 2.9 lingkaran beradius $\frac{(B+B')}{2}$ tergambar dengan titik D sebagai pusat lingkaran dan titik E didapatkan, sehingga garis depresi pada zona kedap air bendungan merupakan garis busur \widehat{CE} .



Gambar 2. 9 Skema formasi garis depresi pada bendungan tirai

2. Untuk zona sembarang
 Elvasi titik E adalah ketinggian dimana air filtrasi mengalir keluar dari zona ke atas air dan harga $y_0 = 21,00 \text{ m}$ (dengan dasar pengukuran di tempat). Dengan demikian harga $h_2 = (k_1/k_2)y_0 = (1/20) \times 21,00 = 1.05 \text{ m}$. Dengan menggunakan persamaan (2.7), diperoleh koordinat parabola bentuk dasar sebagai berikut:

$$y = \sqrt{2y_0x + h_0^2} = \sqrt{2 \cdot 21 \cdot x + 1.10}$$

Sehingga diperoleh koordinat parabola sebagai berikut:

x(m)	-0.53	0	5	10	20	40
y(m)	0	1.05	3.41	4.70	6.57	9.23

2.11.2 Jaringan aliran

Jaringan aliran merupakan jaringan yang terbentuk akibat berpotongannya garis aliran (*flow lines*) dan garis ekipotensial (*equipotential lines*). Garis aliran merupakan garis yang menunjukkan arah aliran butir-butir air yang bergerak dari bagian hulu ke bagian hilir sungai melalui media tanah yang tembus air (*permeable*). Garis ekipotensial adalah suatu garis yang menunjukkan sepanjang mana tinggi potensial di semua titik adalah sama. Pada percobaan uji rembesan dengan pipa piezometer, apabila alat-alat piezometer tersebut diletakkan pada beberapa titik yang berbeda-beda di sepanjang satu garis ekipotensial, air di dalam tiap-tiap piezometer akan naik pada ketinggian yang sama.

Jaringan aliran dibuat untuk menghitung aliran air tanah. Dalam pembuatan jaringan aliran, garis-garis aliran dan ekipotensial digambar sedemikian rupa sehingga:

- Garis ekipotensial memotong tegak lurus garis aliran.
- Elemen-elemen aliran dibuat kira-kira mendekati bentuk bujur sangkar.

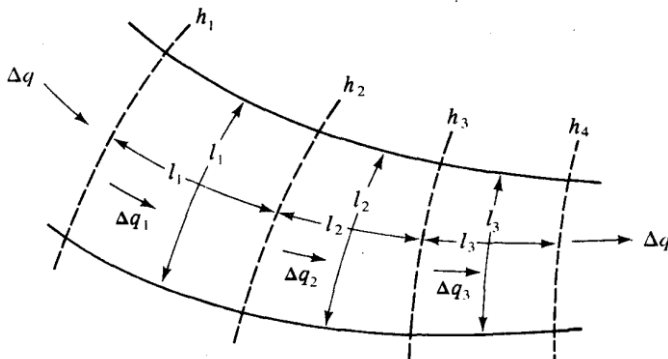
2.11.3 Perhitungan rembesan dari suatu jaringan aliran

Di dalam jaringan aliran, daerah diantara dua garis aliran yang saling berdekatan dinamakan saluran aliran (flow channel). Gambar 2.10 menunjukkan suatu aliran dengan garis ekipotensial yang membentuk elemen-elemen berbentuk persegi. Apabila $h_1, h_2, h_3, h_4, \dots, h_n$ adalah muka air pizometrik yang bersesuaian dengan garis ekipotensial, maka kecepatan rembesan yang melalui saluran aliran per satuan lebar (tegak lurus bidang gambar) dapat dihitung dengan cara: (tidak ada aliran yang memotong garis aliran).

$$\Delta q_1 = \Delta q_2 = \Delta q_3 = \dots = \Delta q_n$$

Dari Hukum Darcy, jumlah air yang mengalir persatuan waktu adalah $k \cdot i \cdot A$. Maka persamaan diatas dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta q = k \left(\frac{h_1 - h_2}{l_1} \right) l_1 = k \left(\frac{h_2 - h_3}{l_2} \right) l_2 = k \left(\frac{h_3 - h_4}{l_3} \right) l_3 \\ = \dots \dots \dots$$



Gambar 2. 10 Rembesan melalui suatu saluran aliran

2.11.4 Koefisien rembesan

Koefisien rembesan mempunyai satuan yang sama dengan kecepatan. Koefisien rembesan tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu: kekentalan cairan, distribusi ukuran-pori, distribusi ukuran-butir, angka pori, kekasaran permukaan butiran tanah dan derajat kejenuhan tanah. Pada tanah berlempung struktur tanah memegang peran penting dalam menentukan koefisien rembesan. Faktor-faktor lain yang mempengaruhi sifat rembesan tanah lempung adalah konsentrasi ion dan ketebalan lapisan air yang menempel pada butiran lempung.

Harga koefisien rembesan (k) untuk tiap-tiap tanah berbeda-beda. Berikut merupakan beberapa harga koefisien rembesan:

Tabel 2. 7 Koefisien rembesan (k) berdasarkan tipe tanah
(Das, 1985)

Jenis tanah	k	
	cm/ detik	ft/ menit
Kerikil bersih	1.0 – 100	2.00 – 200
Pasir kasar	1.0 – 0.01	2.0 – 0.02
Pasir halus	0.01- 0.001	0.02 – 0.002
Lanau	0.001 – 0.00001	0.002 – 0.00002
Lempung	Kurang dari 0.000001	Kurang dari 0.000002

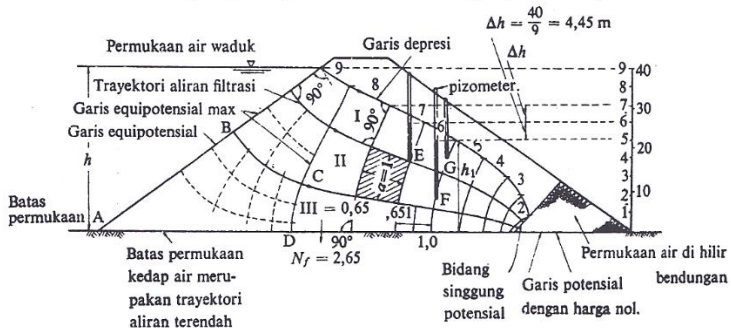
2.11.5 Pembuatan jaringan trayektori aliran rembesan (seepage flow-net)

Untuk menggambar jaringan trayektori aliran rembesan melalui sebuah bendungan supaya diperhatikan hal-hal sebagai berikut:

1. Trayektori aliran rembesan dengan garis equi-potensial berpotongan secara tegak lurus, sehingga akan membentuk bidang-bidang yang mendekati bentuk-bentuk bujur-sangkar atau persegi panjang.
2. Jadi apabila diperhatikan bentuk bidang ABCD (Gambar 2.11) hanya mendekati bentuk bujur sangkarnya akan semakin nyata.

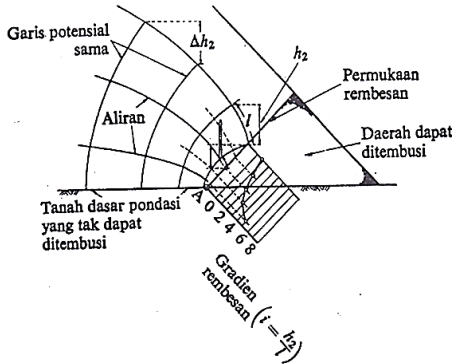
3. Biasanya bidang-bidang yang terbentuk oleh pertolongan trayektori aliran rembesan dengan garis-garis equi-potensial tersebut di atas lebih mendekati bentuk-bentuk persegi panjang dan pada semua persegi panjang yang terjadi perbandingan antara sisi pendek dan panjangnya mendekati harga yang sama.
4. Pada bidang di bawah tekanan atmosfer, dimana aliran rembesan tersembul keluar, bukan merupakan trayektori aliran rembesan dan bukan pula merupakan garis equi-potensial, karenanya tidak akan terbentuk bidang-bidang berbentuk persegi panjang dan trayektori aliran rembesan dengan permukaan tersebut tidak akan berpotongan secara vertikal.
5. Garis depresi yang berpotongan dengan bidang di bawah tekanan atmosfer (titik tertinggi tersembulnya aliran rembesan), tertera pada (Gambar 2.13)
6. Titik perpotongan antara garis-garis equi-potensial dengan garis depresi adalah dengan interval (Δh) yang diperoleh dengan membagi tinggi tekanan air (perbedaan antara elevasi permukaan air dalam waduk dan permukaan air di bagian hilir bendungan) dengan suatu bilangan integer (bilangan bulat).

Contoh jaringan trayektori aliran filtrasi dapat diperhatikan pada Gbr. 3-40.

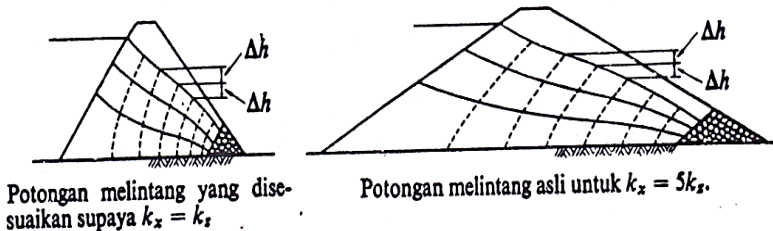


Gambar 2. 11 Jaringan trayektori aliran filtrasi dalam tubuh bendungan (Sosrodarsono, 2002)

Contoh jaringan trayektori aliran rembesan pada bendungan urugan, dimana angka koefisien vertikal berbeda dengan angka koefisien rembesan horizontal ($k_v \neq k_h$). Jaringan trayektori aliran rembesan digambar sebagai bidang-bidang persegi panjang yang sisi horizontalnya diperpendek sebesar $\sqrt{k_v/k_h}$ kali (periksa Gambar 2.13)



Gambar 2. 13 Gradien rembesan (Sosrodarsono, 2002)



Gambar 2. 12 Jaringan trayektori aliran filtrasi dalam tubuh bendungan (dimana $K_x = 5 K_z$) (Sosrodarsono, 2002)

2.11.6 Jaringan filtrasi pada saat terjadinya penurunan tiba-tiba (rapid draw down)

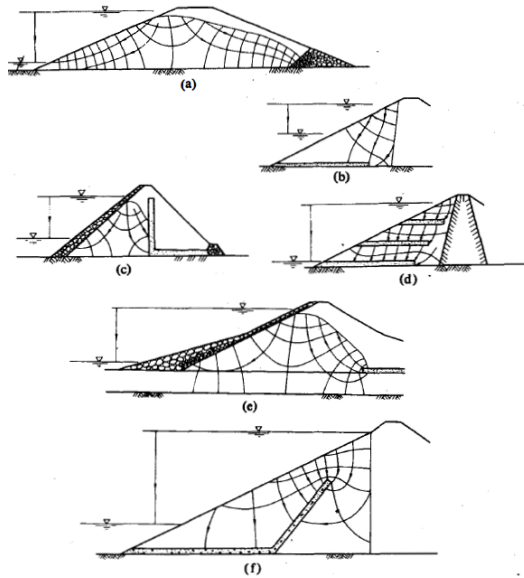
Pada saat terjadinya penurunan tiba-tiba permukaan air waduk, aliran filtrasi merupakan aliran tidak tetap (*unsteady flow*). Oleh karena itu, analisisnya didasarkan pada teori aliran tidak tetap, akan tetapi teorinya sangat kompleks. Untuk lebih menyederhanakan penganalisaannya, biasanya digunakan rumus-

rumus Laplace dengan anggapan bahwa penurunan permukaan air waduk terjadi dengan sedemikian cepatnya, sehingga kapasitas dari fasilitas pelimpah pada bendungan dapat diabaikan. Dalam analisa ini gejala penyusutan dan gaya-gaya kapiler yang terjadi pada tubuh bendungan diabaikan, sehingga hasil analisa menjadi lebih aman. Jaringan trayektori aliran filtrasi yang diperoleh akan menjadi gambaran dalam kondisi yang bersifat sementara.

Lereng udik dapat dianggap sebagai garis equi-potensial dan karenanya trayektori pada bidang lereng atas dapat digambarkan sebagaimana biasanya, sedangkan trayektori aliran filtrasi di dalam tubuh bendungan akan tergantung dari kecepatan penurunan permukaan air waduk, permeabilitas bahan pembentuk tubuh bendungan dan kondisi permukaan lereng udik bendungan.

Permeabilitas bahan-bahan pembentuk tubuh bendungan merupakan faktor yang paling menentukan untuk karakteristik gambar jaringan aliran filtrasi dan umumnya akan memberikan hasil sebagai berikut:

- Untuk bahan tubuh bendungan, dengan $k > 1 \times 10^{-3}$ cm/dt, maka penurunan permukaan air dalam waduk akan bersamaan dengan penurunan air yang terdapat dalam tubuh bendungan.
- Untuk bahan tubuh bendungan dengan $1 \times 10^{-3} < k < 1 \times 10^{-4}$ cm/dt, maka penurunan permukaan air dalam waduk akan segera diikuti oleh penurunan permukaan air di dalam tubuh bendungan.
- Untuk bahan tubuh bendungan dengan $k < 1 \times 10^{-4}$ cm/dt, maka penurunan permukaan air dalam waduk tidak lagi segera diikuti oleh penurunan permukaan air dalam tubuh bendungan. Agar keduanya dapat mencapai permukaan yang sama membutuhkan waktu yang agak lama.



Gambar 2. 14 Jaringan trayektori aliran filtrasi pada saat terjadinya penurunan tiba-tiba (Sosrodarsono, 2002)

2.11.7 Penentuan kapasitas aliran rembesan

- a. Kapasitas rembesan berdasarkan jaringan trayektori aliran rembesan

Kapasitas rembesan dihitung berdasarkan jaringan trayektori aliran rembesan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut: (Direktorat Jendral Pengairan, 1999)

$$Q_f = \frac{N_f}{N_p} K \cdot H \cdot L$$

Keterangan:

Q_f : kapasitas aliran rembesan (kapasitas rembesan)

N_f : angka pembagi dari garis trayektori aliran rembesan

N_p : angka pembagi dari garis equi-potensial

K : koefisien rembesan

H : tinggi tekanan air total

L : panjang profil melintang tubuh bendungan

- b. Memperkirakan kapasitas rembesan berdasarkan rumus empiris

Besarnya rembesan air yang menuju ke hilir tubuh bendungan dan pondasi bendungan, rembesan harus mempunyai batasan tertentu agar tidak membahayakan bahaya sufosi.

Kapasitas aliran rembesan dihitung berdasarkan Hukum Darcy, yaitu hubungan antara kecepatan aliran air yang melalui pori-pori tanah dan gradien hidrolis, dimana aliran air yang melalui pori-pori tersebut dianggap bersifat laminar. Sehingga besarnya kapasitas rembesan yang melalui tubuh bendungan (*maindam*) dapat ditentukan melalui persamaan (*Sosrodarsono, 2002*):

$$Q_f = \sum q \cdot B$$

$$Q_f = k \cdot i \cdot A$$

maka :

$$Q_f = k \sum B \cdot i \cdot A$$

Dimana :

Q_f = Kapasitas Rembesan

q = Kapasiitas rembesan per unit panjang tubuh bendungan (*Maindam*)

B = Lebar profil tubuh bendungan

i = Gradient Hidrolis (dihitung dengan rumus $y_o = \sqrt{h^2 + d^2} - d$)

A = Luas potongan melintang yang dilalui air rembesan per unit lebar

k = Koefisien rembesan

- c. Memperkirakan kapasitas rembesan pada bendungan inti miring
Perencanaan kapasitas rembesan pada inti miring dapat dihitung berdasarkan rumus empiris berikut:

$$Q_f = q \cdot h$$

Catatan: sesungguhnya, garis-garis pembagian disesuaikan dengan perubahan potongan melintang masing-masing blok.

Tabel 2. 8 Tabel perhitungan untuk menentukan volume air filtrasi yang melalui tubuh bendung (*Direktorat Jendral Pengairan, 1999*)

	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓓ	Ⓔ iA	Ⓕ B	Ⓖ
Nomor urut blok	Elevasi blok	192 - Ⓐ	Ketebalan rata-rata	Panjang rata-rata	Ⓔ+ⒻxⒼ	Lebar (m)	Ⓔ x Ⓖ
1	182,50	9,50	6,00	10,00	5,70	1.000	5,700
2	177,50	14,50	11,00	14,00	11,39	950	10.821
3	170,00	22,00	12,50	22,00	12,50	670	8.375
4	162,00	30,00	13,50	30,00	13,50	340	4.590
5	154,00	38,00	18,00	60,00	11,40	100	1.140
							∑ = 30.626

$$q = \frac{(H - \frac{h^2}{2})}{\frac{PQ + CM}{2}} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sin\theta_1} + \frac{h_2}{\sin\theta_2} \right) k$$

- d. Memperkirakan kapasitas rembesan dengan menggunakan skema jaringan trayektori aliran rembesan.
- Garis-garis trayektori aliran rembesan merupakan garis-garis berbentuk elips
 - Garis-garis trayektori aliran rembesan merupakan bidang-bidang berbentuk persegi panjang ($\frac{B}{T} \geq 1$)

$$q = k \cdot H \left(\frac{T}{B + T} \right)$$

T : ketebalan lapisan pondasi yang diperhitungkan

2.11.8 Penentuan kecepatan aliran rembesan

1. Dengan menggunakan jaringan aliran filtrasi, maka dapat digunakan rumus:

$$v = k \cdot i = k \cdot \frac{h_2}{l}$$

dimana:

- v : kecepatan pada bidang keluarnya aliran filtrasi (lereng hilir bendungan).
 k : koefisien filtrasi
 i : gradient debit
 h_2 : tekanan air rata-rata (perbedaan antara tekanan pada titik peresapan di lereng udik dan titik keluarnya di lereng hilir suatu garis trayektori aliran filtrasi
 l : panjang rata-rata bekas elemen aliran filtrasi pada bidang keluarnya aliran filtrasi.
2. Dengan menggunakan rumus empiris

$$v_y = \frac{k \cdot H}{\pi} \times \frac{1}{\sqrt{x^2 - c^2}} (x > c)$$

dimana,

v_y : komponen vertikal dari vector kecepatan aliran keluar pada permukaan lereng hilir.

x : jarak dari titik tengah (ke arah luar dari median A.B)

2.12 Analisa Teknis Tubuh Bendung Dengan Lapisan *Waterproof Pada Upstream*

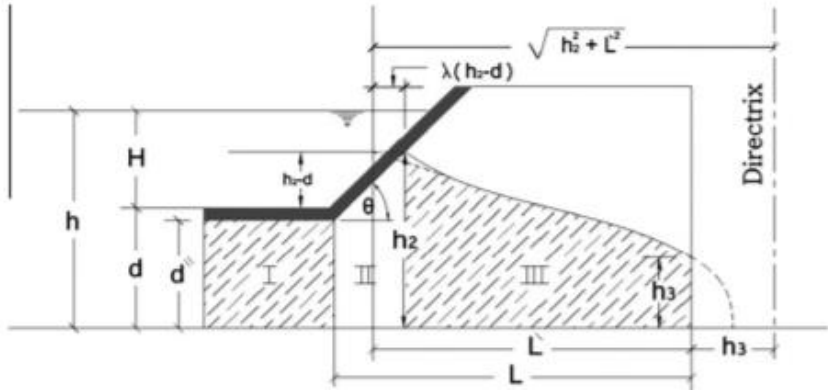
Berdasarkan penelitian berjudul “Analytical solution of earth dam with upstream blanket” oleh Mohammed Abd El-Razek M. Rezk yang dikeluarkan oleh Alexandria Engineering Journal, perhitungan matematis yang telah dikombinasikan berdasarkan hasil penelitian oleh Rezk dan Rabiea maka perhitungan matematis dibedakan dalam tiga persamaan.

2.11.1 Zona I

Berdasarkan Hukum Darcy

$$q = -K \cdot i \cdot A,$$

maka,



Gambar 2. 15 Pembagian zona dalam perhitungan matematis

$$q = k \frac{(h-h_1)}{(d+1)} (d - d')$$

2.11.2 Zona II

Persamaan analisa rembesan pada zona II juga berdasarkan Hukum Darcy:

$$q = -k \cdot i \cdot A = -k \frac{dh}{dx} (d'' + x \cdot \tan \theta)$$

$$\frac{q}{\tan \theta} \int_0^x \frac{dx \cdot \tan \theta}{(d'' + x \cdot \tan \theta)} = -k \int_{h_1}^{h_2} dh$$

$$\frac{q}{\tan \theta} [\ln(d'' + x \cdot \tan \theta)]_0^x = k \cdot [h]_{h_2}^{h_1}$$

$$q = \frac{k \cdot \tan \theta \cdot (h_1 - h_2)}{\ln(d'' + x \cdot \tan \theta) - \ln d''}$$

$$x = \frac{(h_2 - d'')}{\tan \theta}$$

2.11.3 Zona III

Persamaan pada zona III berdasarkan pada persamaan dari Kozeny. Efek dari bentuk vertikal pada ujung bendungan yang diasumsikan berdasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh Rezk dan Rabiea dengan memperkenalkan konstanta C pada persamaan berikut:

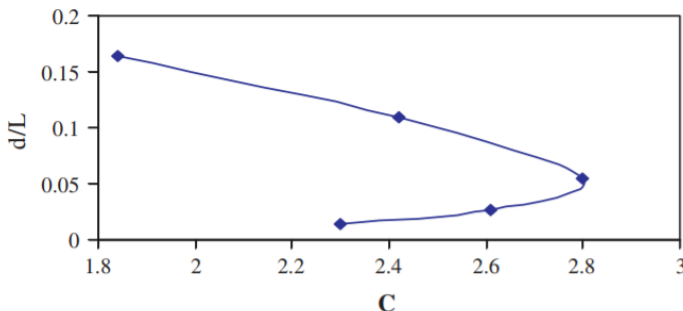
$$q = C \cdot k \cdot h_3$$

Nilai h_3 dapat diketahui berdasarkan persamaan berikut:

$$h_3 = \left\{ \sqrt{h_2^2 + L'^2} - L' \right\}$$

$$q = C \cdot k \left\{ \sqrt{h_2^2 + L'^2} - L' \right\}$$

Berdasarkan grafik hubungan antara d/L dan C , maka konstanta C dapat ditentukan.



Gambar 2. 16 konstanta C

2.13 Geo Studio SEEP/W

Geo Studio adalah rangkaian produk perangkat lunak dari Geo-Slope International Ltd. yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja bendungan atau tanggul dengan berbagai tingkat kompleksitas. SEEP/W adalah salah satu elemen dari produk Geo Studio dengan dasar CAD terbatas untuk menganalisis rembesan air dan masalah disipasi tekanan air pori berlebih dalam bahan berpori seperti tanah dan batuan. Formulasi yang komprehensif memungkinkan dapat mempertimbangkan analisis mulai dari yang sederhana, masalah kondisi jenuh steady-state sampai dengan masalah kondisi jenuh atau tidak jenuh yang tergantung pada waktu. SEEP/W dapat diterapkan pada analisis dan desain untuk geoteknik, sipil, hidrogeologi, dan kegiatan

rekayasa pertambangan. Rangkaian tahapan pemodelan untuk menghitung stabilitas rembesan dapat dilihat pada lampiran.

Pada dasarnya Geo Studio SEEP/W memodelkan metode elemen hingga, yaitu metode perhitungan yang didasarkan pada konsep diskretasi. Konsep diskretasi merupakan pembagian suatu struktur, massa, atau benda padat menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Pembagian ini memungkinkan suatu sistem memiliki derajat kebebasan terhingga, sehingga memudahkan proses perhitungan karena benda tersebut telah diubah menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Metode elemen hingga juga merupakan metode pendekatan, semakin kecil pembagian elemen-elemen maka semakin akurat perhitungan dengan metode elemen hingga.

BAB III METODOLOGI

3.1 Tahapan Perencanaan

Metode perencanaan disusun untuk mempermudah pelaksanaan perencanaan, guna memperoleh pemecahan masalah sesuai dengan tujuan perencanaan yang telah ditetapkan melalui prosedur kerja yang sistematis, teratur dan tertib sehingga dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

3.2 Studi Literatur

Adalah mempelajari berbagai literatur, studi yang pernah ada sebelumnya yang terkait dengan perencanaan Bendungan Bendo dan membaca buku serta makalah ilmiah, yang berkaitan dengan masalah:

- Desain perencanaan Bendungan/waduk (terutama pada bangunan *maindam*)
- Aliran rembesan pada bangunan *maindam*.

3.3 Pengumpulan Data

Pengumpulan data diperoleh dari data primer dan data sekunder.

1. Data Primer

Teknik pengumpulan data dengan melakukan peninjauan lapangan dan menghubungi langsung instansi-instansi terkait perencanaan Bendungan Bendo seperti Dinas PU BBWS Bengawan Solo, Dinas PU Kabupaten Ponorogo, Dinas Pengairan Provinsi Jawa Timur dan konsultan perencana serta kontraktor Bendungan Bendo.

Untuk mendapatkan data primer, maka dilakukan survey lapangan yang meliputi:

- Kondisi sungai di Bendungan Bendo yang ada saat ini
- Kondisi rencana letak *maindam* di Bendungan Bendo
- Kendala dan masalah yang sering terjadi pada daerah studi

- Studi yang pernah dilakukan sebelumnya

2. Data Sekunder

Data sekunder adalah teknik pengumpulan data yang diperoleh tanpa melakukan pengamatan secara langsung atau data yang sudah ada yang diperoleh dari instansi. Dengan demikian data yang dimaksud adalah:

- *Peta Topografi*
Digunakan untuk mengetahui lokasi yang akan ditinjau, mengetahui kondisi topografi di sekitar lokasi dan digunakan untuk deliniasi batas daerah aliran sungai (DAS).
- *Peta Lokasi*
Digunakan untuk mengetahui lokasi yang akan ditinjau dari peta umum untuk mengetahui kondisi daerah tersebut.
- *Data Tanah*
Untuk mengetahui karakteristik tanah di sekitar lokasi Bendungan Bendo dan material-material bahan penyusun tubuh bendungan.

3.4 Analisa Kondisi

Penelitian ini akan menggunakan 3 pemodelan (situasi) Bendungan Bendo di Kabupaten Ponorogo untuk 2 jenis tipe yaitu tipe urugan zonal dan tipe urugan membran. Kondisi yang menjadi acuan penelitian ini yaitu:

1. Elevasi muka air banjir,
2. Elevasi muka air normal,
3. Terjadinya penurunan elevasi secara tiba-tiba, (mercu sampai setinggi *intake*)

3.5 Analisis Data

Bendungan Bendo merupakan bendungan yang dibangun untuk memenuhi kebutuhan air baku, irigasi maupun sebagai pengendali banjir di wilayah Kabupaten Ponorogo. *Maindam* merupakan bagian utama dari Bendungan Bendo. Dalam melakukan perencanaan *maindam*, perlu dilakukan pengumpulan serta analisa data tentang jenis tanah yang sesuai sebagai penyusun zonasi pada *maindam*. Perencanaan *maindam* harus dilakukan

dengan mempertimbangkan tingkat rembesan yang akan terjadi agar tidak terjadi gejala sufosi yang disebabkan gaya-gaya hidrodinamis dalam aliran rembesan.

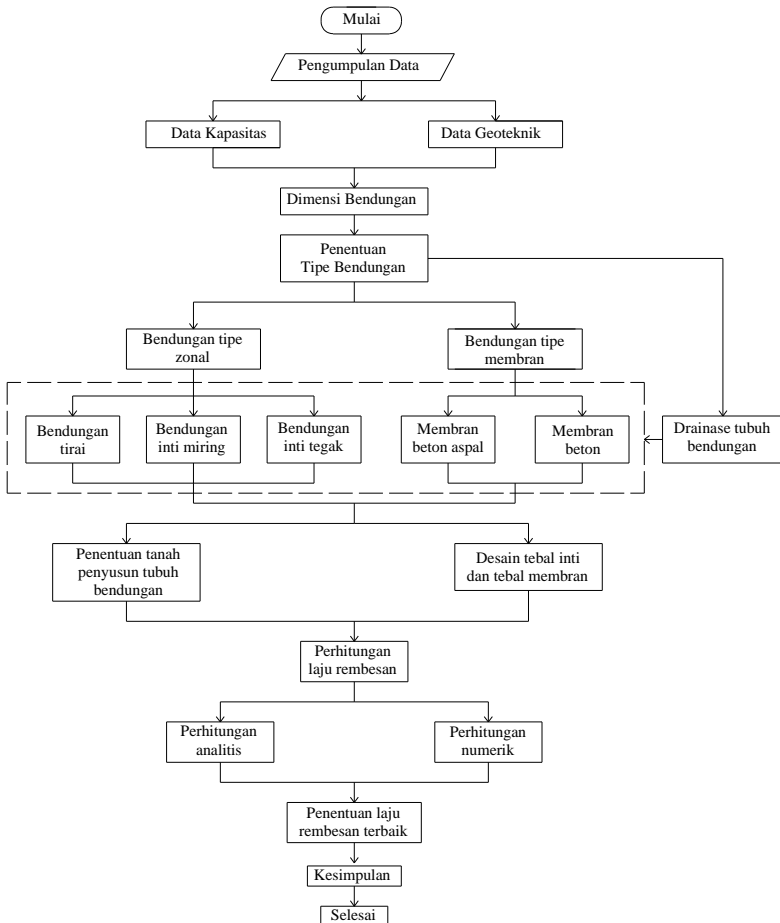
Dari data yang ada, telah diketahui dimensi *maindam* pada Bendungan Bendo. *Maindam* Bendungan Bendo direncanakan bertipe urugan tanah. Kestabilan tubuh bendungan tergantung pada besar kecilnya rembesan yang terjadi. Untuk itu, perlu dilakukan uji tipe bendungan terhadap laju rembesan sehingga diketahui tipe bendungan yang paling baik. Dalam uji analisa kapasitas rembesan ini, dipilih dua tipe bendungan antara lain bendungan tipe urugan zonal dan bendungan tipe urugan membran. Kedua tipe tersebut akan digunakan untuk mengetahui pengaruh variasi tanah penyusun tubuh bendungan dan perubahan tebal inti kedap air terhadap laju rembesan. Pada bendungan tipe urugan zonal, analisa dilakukan berdasarkan variasi inti kedap air, yaitu inti vertikal, inti miring dan inti tirai. Sedangkan pada bendungan tipe urugan membran, variasi dilakukan berdasarkan bahan membran yaitu, membran beton aspal dan membran beton. Kemudian perhitungan laju rembesan akan ditinjau dari tiga kondisi muka air *upstream*, yaitu muka air normal (MAN), muka air banjir (MAB), dan pada kondisi muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*).

Perhitungan secara analitik dengan Hukum Darcy terhadap desain bendungan tipe urugan zonal maupun tipe urugan membran. Pendekatan dengan Hukum Darcy pada tipe urugan membran dilakukan dengan menerapkan rumus dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, yaitu dengan membagi bendungan dalam tiga zona kemudian mendapatkan suatu konstanta yang digunakan untuk memperhitungkan laju rembesan.

Disamping itu, dilakukan pula perhitungan laju rembesan secara numerik menggunakan pemodelan dengan program bantu Geo Studio SEEP/W. Dari analisa yang telah dilakukan kemudian diketahui laju aliran rembesan dari masing-masing variasi tipe bendungan, sehingga dapat ditentukan tipe bendungan yang paling aman dalam perencanaan tubuh bendung pada Bendungan Bendo di Kabupaten Ponorogo.

3.6 Flow Chart

Berdasarkan studi literatur maupun survey lokasi yang telah dilakukan, maka dapat ditentukan bagan alir guna memudahkan pengerjaan analisa laju rembesan pada tugas akhir ini. Berikut merupakan bagan alir dalam penulisan tugas akhir ini:



Gambar 3. 1 Bagan alir

BAB IV

MATERIAL PENYUSUN TUBUH BENDUNGAN

4.1 Analisa Material Penyusun Tubuh Bendungan

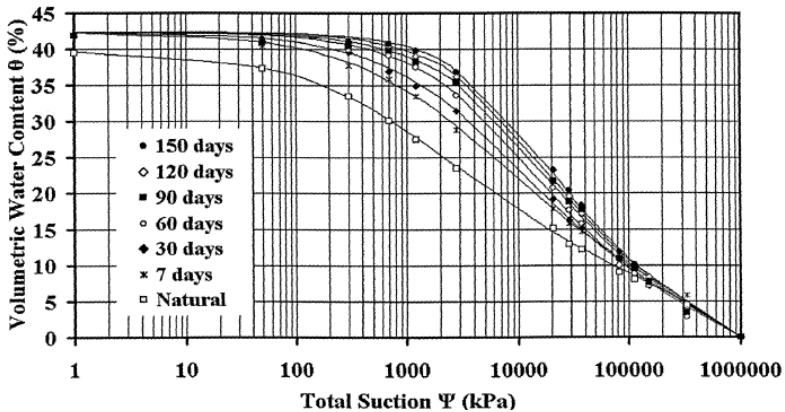
Berdasarkan *Soil Water Characteristic Curve* (SWCC)

Bendungan urugan tanah (*earthfill dam*) merupakan bendungan yang tersusun atas beberapa jenis material tanah. Pada umumnya, material penyusun tubuh bendungan akan ditentukan sesuai dengan kondisi dan ketersediaan material di lokasi konstruksi. Material penyusun tubuh bendungan diperoleh dari hasil galian di lokasi proyek bendungan maupun dari lokasi lain di sekitar proyek (*borrow area*). Jika material yang banyak tersedia di lokasi proyek adalah material kedap air, maka kemungkinan tipe bendungan yang akan direncanakan adalah tipe homogen atau tipe urugan zonal. Namun jika yang terjadi sebaliknya, yaitu material lulus air lebih banyak dari pada material kedap air maka bendungan akan direncanakan sebagai bendungan urugan batu (*rock fill dam*).

Menurut buku “Panduan Perencanaan Bendungan Urugan Vol.3”, keruntuhan yang terjadi pada bendungan bisa disebabkan oleh kegagalan hidrolis, kegagalan akibat rembesan, atau kegagalan struktural. Mengingat pentingnya peran tubuh bendungan dalam mempertahankan tampungan air dengan jumlah yang besar, maka pada penelitian ini, penulis akan merencanakan tubuh bendungan dengan meminimalisir kegagalan akibat rembesan. Oleh karena itu, maka desain suatu bendungan harus memperhatikan jenis, kualitas serta kuantitas material yang tersedia disekitar tempat kedudukan calon bendungan. Sementara itu material urugan untuk bendungan biasanya diperoleh dari material batu atau tanah yang digali di sekitar tempat kedudukan calon bendungan. Agar semua material yang ada di sekitar lokasi bendungan dapat digunakan secara optimal, maka perlu diketahui kemampuan rembesan pada tiap material.

Setiap material penyusun tubuh bendungan memiliki kemampuan menyerap air (*suction*) yang berbeda-beda. Untuk itu

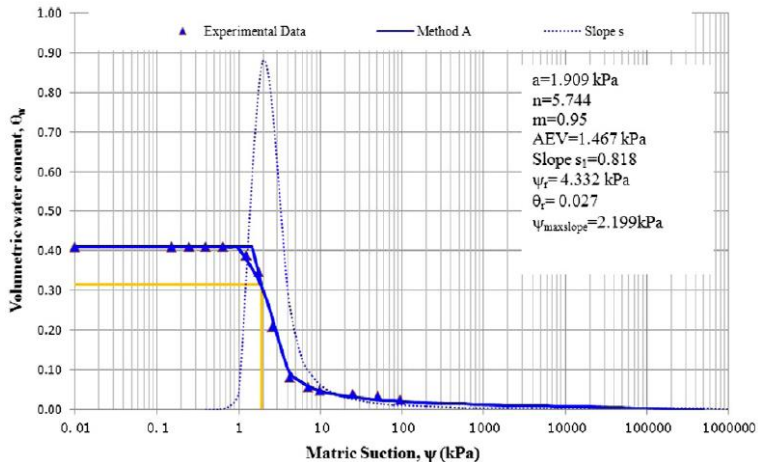
perlu diketahui kemampuan menyerap air dari tiap jenis tanah penyusun tubuh bendungan menggunakan parameter *soil water characteristic curve* (SWCC). *Soil water characteristic curve* (SWCC) merupakan kurva yang menggambarkan hubungan jumlah air dalam tanah yang mempengaruhi perubahan *suction* tanah, (L'Heurux, 2005). Jumlah air tersebut diartikan sebagai *volumetric water content* (θ_w), kadar air *gravimetric* (w), atau derajat kejenuhan (S). SWCC juga digambarkan sebagai *retention curve* atau *volumetric water content curve* yang menggambarkan kemampuan tanah untuk menyimpan dan melepaskan air. Gambar 4.1 menunjukkan kurva SWCC untuk tanah lempung.



Gambar 4. 1 *Soil water characteristic curve* (SWCC) pada tanah lempung (Al-Taie, 2006)

Berdasarkan Gambar 4.1, *suction* maksimum terjadi ketika *volumetric water content* (VWC) berada pada titik minimum, yaitu ketika butir tanah memiliki rongga yang cukup untuk menyerap air. Sementara *suction* minimum terjadi ketika VWC pada kondisi maksimum, yaitu pada saat butir tanah tidak mampu lagi menyerap air. Grafik pada Gambar 4.1 terlihat cukup landai, hal ini menandakan bahwa butir tanah menyerap air secara perlahan atau nilai VWCnya cukup besar. Sementara itu, Gambar 4.2

menunjukkan grafik SWCC pada tanah pasir yang terlihat lebih tegak. Gambar 4.2 menunjukkan bahwa pada kemampuan *suction* yang hampir sama VWC berubah secara drastis sehingga air akan mudah terserap oleh butir tanah.



Gambar 4. 2 soil water characteristic curve (SWCC) pada tanah lempung (clay) (*Qian Zhai, 2011*)

Dalam penelitian ini, untuk mendapatkan desain tubuh bendungan yang tahan terhadap rembesan, penulis merencanakan tubuh bendungan dengan membuat variasi susunan material. Susunan material ini nantinya akan diterapkan pada tiga tipe inti tubuh bendungan urugan zonal, yang kemudian akan ditinjau dari tiga kondisi muka air upstream. Pemodelan untuk mendapatkan nilai laju rembesan pada tubuh bendungan dilakukan dengan *Geo Studio SEEP/W*. Pemodelan dengan *Geo Studio SEEP/W* dilakukan dengan menginput data dari SWCC, yang meliputi karakteristik tanah penyusun tubuh bendungan serta fungsi hidrolik dan *volumetric water content*. Untuk itu, penulis menggunakan

beberapa data karakteristik material dari penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya.

4.2 Material Inti Kedap Air

Inti kedap air merupakan bagian utama tubuh bendungan yang berfungsi meminimalisir daya rusak air yang mengalir melalui celah antar butiran tanah. Karakteristik material kedap air sangat beragam dan dipengaruhi oleh tingkat kadar air yang terkandung di dalamnya. Sehingga sangat diperlukan survey, investigasi serta penelitian laboratorium yang seksama terhadap material tersebut guna menentukan metode-metode penimbunan yang paling efektif. Pemilihan gradasi material zona kedap air pada tubuh bendungan harus diperhatikan agar tidak terjadi penurunan yang berbeda dengan zona di sampingnya, sehingga menyebabkan keretakan akibat pelengkungan (*arching*). Dalam desain tubuh bendungan ini, penulis mencoba memvariasikan bahan inti kedap air. Material yang akan digunakan merupakan hasil studi literatur dari penelitian yang sudah dilakukan oleh DG. Fredlund yang berjudul “*The Scope of Unsaturated Soil Mechanics: An Overview*”, hasil penelitian yang dilakukan oleh L. Lam, DG Fredlund dan S.L. Barbour yang berjudul “*Transient Seepage Model for Saturated-unsaturated Soil System: A Geotechnical Engineering Approach*”, serta hasil penelitian yang dilakukan oleh H. Raharjo dan DG. Fredlund yang berjudul “*Consolidation apparatus for Testing Unsaturated Soils*”, sehingga diperoleh variasi material inti kedap air sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Material inti kedap air

Saturated WC (m^3/m^3)	Material	Saturated K_x (m/sec)	Residual water content (%)
0.5	silty clay	1×10^{-7}	1×10^{-5}
0.27	sand	1×10^{-5}	-
0.69	clay	2.9×10^{-8}	-
0.39	silt	5×10^{-6}	-
0.32	silty sand	4×10^{-6}	-

4.3 Material Filter

Zona timbunan tanah dan zona timbunan batu pada tubuh bendungan biasanya dipisahkan dengan suatu zona peralihan yang tidak terlalu tebal atau disebut lapisan filter. Pada lapisan ini, bahan-bahan pasir dan kerikil akan digunakan supaya memiliki kekuatan geser dan kemampuan meluluskan air yang memadai. Zona filter berfungsi untuk menyaring butiran halus dari zona kedap air agar tidak terlepas dan tertahan di filter. Akan tetapi bahan pada zona filter juga harus mempunyai kemampuan kelulusan yang memadai untuk menampung air filtrasi dari zona yang dilindungi dan melintasi lapisan filter secara terarah serta teratur yang kemudian mengalir ke hilir melalui sistem drainase. Pada penelitian ini, desain lapisan filter akan menggunakan data material dari penelitian yang telah dilakukan oleh DG. Fredlund, A.Xing dan S. Huang yang berjudul “*Predicting The Permeability Function For Unsaturated Soils Using The Soil-Water Characteristic Curve*”.

Tabel 4. 2 Material Filter

Saturated WC (m ³ /m ³)	Sample Material	a	n	m	Saturated K _x (m/sec)
0.458	sandy loam	6.01	11.86	0.36	1
0.43	Silt loam	8.34	9.9	0.44	1
0.375	light clay	2.7	2.05	0.36	1
0.43	loam (wet)	3.12	4.86	0.23	0.43
0.52	loam (dry)	5.61	2.24	0.4	0.52

4.4 Material Random

Pada bendungan tipe urugan zonal, terdapat zona transisi atau semilulus air. Zona ini biasanya diletakkan diantara zona kedap air dan zona lulus air, yang berfungsi mencegah terjadinya perubahan gradasi yang besar serta mencegah terjadinya deformasi berlebihan antara zona kedap air dan zona lulus air. Zona transisi biasanya tersusun dari material random yaitu campuran pasir, kerikil, batu lapuk atau batu pecah. Pada penelitian ini, penulis menggunakan

data dari hasil penelitian sebelumnya oleh Kamal Mohamed Hafez Ismail Ibrahim yang berjudul “*Effect Of Percentage Of Low Plastic Fines On The Unsaturated Shear Strength Of Compacted Gravel Soil*”

Tabel 4. 3 Material Random

Saturated WC (m ³ /m ³)	Sample Material	Grain size			Saturated Kx (m/sec)
		Diameter (mm) 10%	Diameter (mm) 60%	Liquid Limit	
0.29	GW	0.13	6	35	1
0.31	GW-GM	0.7	5	35	0.08
0.25	GM	0.01	6	35	0.05
0.32	GW-GC	0.01	6	40	0.03
0.33	GC	0.05	6	40	0.01

4.5 Material Batu

Material batu biasanya diperoleh dari bungkalan pecahan batuan yang terdapat di dalam alur-alur sungai. Pada bendungan urugan, material batu berfungsi memikul beban air dan menstabilkan lereng hulu dan hilir terhadap pengaruh gaya-gaya luar. Sehingga bahan urugan harus mempunyai kekuatan geser yang tinggi. Ukuran batu ideal berdiameter rata-rata 45 sampai 60 cm dengan berat minimum 250 sampai 500 kg dan bentuknya tidak pipih. Karena keterbatasan data pada penelitian sebelumnya, pada pemodelan kali ini penulis menggunakan acuan syarat material batu sebagai bahan urugan bendungan berdasarkan SNI 8062-2015. Sehingga ditentukan variasi material sebagai berikut:

Tabel 4. 4 Material Batu

Saturated WC (m ³ /m ³)	Sample Material	Ukuran		Saturated Kx (m/sec)
		Diameter (mm) 10%	Diameter (mm) 60%	
0.37	BATU 1	100	400	1
0.33	BATU 2	150	450	1.25
0.27	BATU 3	200	500	1.5
0.23	BATU 4	250	550	1.75

Saturated WC (m ³ /m ³)	Sample Material	Ukuran		Saturated Kx (m/sec)
		Diameter (mm) 10%	Diameter (mm) 60%	
0.15	BATU 5	300	600	2

4.6. Variasi Kombinasi Material Penyusun Tubuh Bendungan

Tubuh bendungan (*maindam*) urugan tahan biasanya tersusun dari tanah dan batuan. Pada penelitian ini, penulis menggunakan studi kasus bendungan tipe urugan zonal sehingga tubuh bendungan terbagi menjadi beberapa zona. Tiap zona pada tubuh bendungan tersusun dari jenis tanah atau batuan dengan ukuran yang berbeda-beda.

Uji stabilitas rembesan pada Geo Studio SEEP/W membutuhkan data spesifikasi tanah penyusun tubuh bendungan. Untuk itu, penulis melakukan studi literatur sehingga didapatkan spesifikasi data tanah dan batuan seperti pada sub bab 4.1, sub bab 4.2, sub bab 4.3 dan sub bab 4.4. Untuk mendapatkan desain bendungan yang paling aman terhadap stabilitas rembesan, penulis melakukan variasi kombinasi material seperti pada Tabel 4.5. Hasil pemodelan dengan kombinasi material tersebut akan dibahas pada bab selanjutnya.

Tabel 4. 5 Variasi kombinasi material penyusun tubuh bendungan

Variasi Material	Zona			
	Inti Kedap Air	Filter	Random	Batu
Kombinasi 1	Silty clay	Sandy loam	GW	Batu 1
Kombinasi 2	Sand	Silt loam	GW-GM	Batu 2
Kombinasi 3	Clay	Light clay	GM	Batu 3
Kombinasi 4	Silt	Loam (wet)	GW-GC	Batu 4
Kombinasi 5	Silty sand	Loam (dry)	GC	Batu 5

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PERHITUNGAN LAJU REMBESAN (*SEEPAGE*)

5.1 Pemodelan Dengan Geo Studio SEEP/W

Lebih dari sepertiga kejadian keruntuhan bendungan, diakibatkan oleh rembesan air melalui pondasi atau tubuh bendungan. (Direktorat Jendral Pengairan, 1999) Rembesan air pada tubuh bendungan merupakan hal yang biasa terjadi dan jarang menimbulkan masalah. Namun mengingat daya rusak air yang cukup tinggi, rembesan yang tidak terkontrol pada tubuh bendungan dapat menyebabkan erosi pada timbunan maupun pada pondasi sehingga menyebabkan terjadinya aliran buluh.

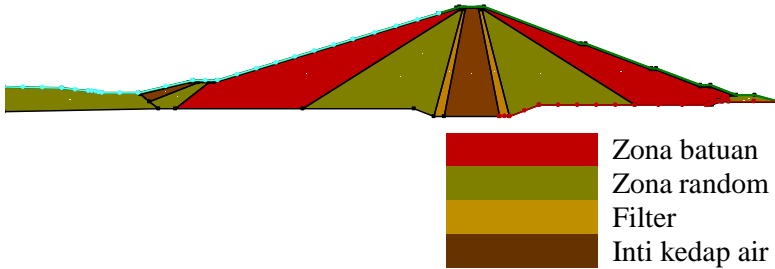
Untuk meminimalisir kerusakan akibat laju rembesan, maka dilakukan pendekatan secara analitik dengan membuat pemodelan laju rembesan pada tubuh bendungan menggunakan Geo Studio SEEP/W. Pemodelan ini akan memberikan gambaran tentang pola rembesan air pada tubuh bendungan serta total debit rembesan air yang keluar akibat rembesan. Pada penelitian ini, penulis melakukan pemodelan terhadap tiga variasi inti bendungan tipe urugan zonal berdasarkan variasi material serta berdasarkan variasi tebal inti yang akan ditinjau pada tiga kondisi muka air *upstream*.

5.1.1 Pemodelan Bendungan Tipe Urugan Zonal dengan Variasi Material

Fungsi utama bendungan adalah menahan air untuk tetap tertampung di dalam waduk. Sementara itu sifat air adalah menekan ke segala arah, sehingga air yang tertampung di dalam waduk akan senantiasa berusaha masuk ke dalam pori-pori tanah pada bendungan. Untuk mencegah terjadinya erosi buluh (*piping*), pemilihan jenis material tanah penyusun tubuh bendungan perlu diperhatikan. Dalam penelitian ini, penulis mencoba melakukan uji rembesan terhadap bendungan tipe zona dengan variasi susunan tanah yang ditinjau dari tiga kondisi muka air *upstream*.

5.1.1.1 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tegak

Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tegak digambarkan memiliki inti kedap air tegak yang berada di tengah tubuh bendungan. Pemodelan tubuh bendungan dilakukan dengan menggambar potongan melintangnya pada Geo Studio SEEP/W. Kemudian tubuh bendungan dibagi menjadi empat zona yang digambar sedemikian rupa sehingga terlihat seperti pada Gambar 5.1.

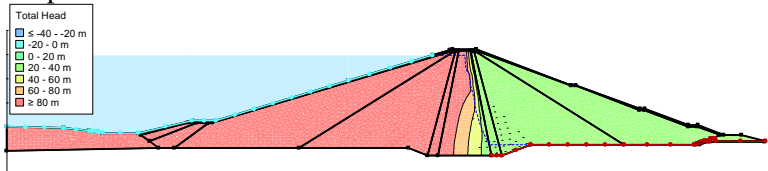


Gambar 5. 1 Pemodelan desain tubuh bendungan pada Geo Studio SEEP/W

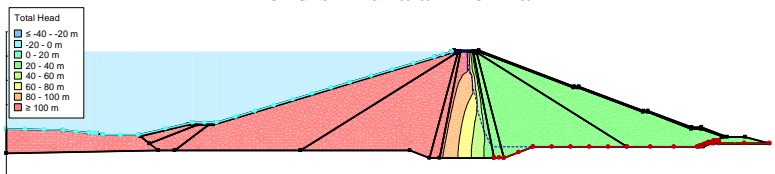
Pada pemodelan ini, tubuh bendungan tersusun dari variasi komposisi tanah seperti pada Tabel 4.5. Kelima variasi susunan tanah tersebut kemudian dimodelkan pada desain tubuh bendungan seperti pada Gambar 5.1. Selanjutnya dilakukan uji stabilitas terhadap rembesan dengan meninjau tiga kondisi muka air upstream yaitu muka air normal (MAN), muka air banjir (MAB) dan ketika muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*). Pada Geo Studio SEEP/W, kondisi muka air digambarkan sebagai garis *boundary condition* yang berwarna biru pada permukaan *upstream* tubuh bendungan. Garis merah pada dasar tubuh bendungan menggambarkan saluran drainase, sehingga aliran rembesan akan diarahkan menuju saluran tersebut. Setelah penggambaran selesai, kemudian dilakukan uji stabilitas terhadap tiga kondisi muka air *upstream* yang menghasilkan garis aliran rembesan, *total head* pada tubuh bendungan, serta debit rembesan yang keluar melalui

saluran drainase. Tahapan pemodelan tubuh bendungan pada Geo Studio SEEP/W bisa dilihat pada lampiran.

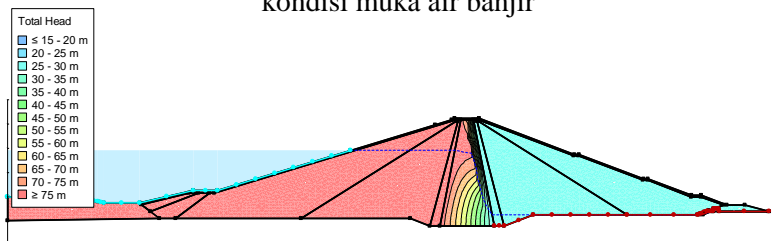
Hasil uji stabilitas dengan kombinasi material tanah 1 (Tabel 4.5) berdasarkan tiga kondisi muka air *upstream* akan terlihat seperti pada Gambar 5.2, Gambar 5.3 dan Gambar 5.4. Ketiga kondisi tersebut menunjukkan aliran rembesan yang menuju saluran drainase, sehingga diperoleh nilai debit rembesan yang melewati tubuh bendungan (Tabel 5.1). Sementara itu, hasil uji stabilitas pada kombinasi material lainnya bisa dilihat pada lampiran.



Gambar 5. 2 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tegak kondisi muka air normal



Gambar 5. 3 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tegak kondisi muka air banjir

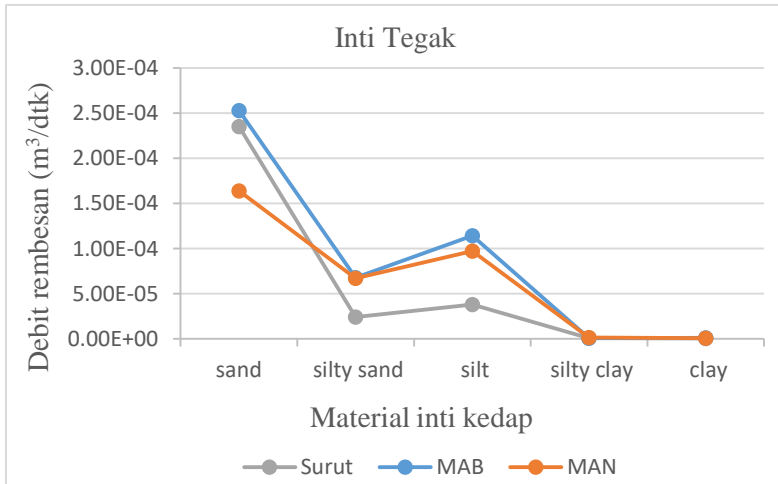


Gambar 5. 4 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tegak kondisi muka air surut tiba-tiba

Tabel 5. 1 Total laju rembesan pada bendungan inti tegak

Material Inti Kedap Air	MAB (m ³ /s)	MAN (m ³ /s)	Rapid (m ³ /s)
Sand	2.53E-04	1.64E-04	2.35E-04
Silty sand	6.79E-05	6.70E-05	2.41E-05
Silt	1.14E-04	9.72E-05	3.81E-05
Silty clay	7.49E-07	1.49E-06	6.67E-07
Clay	8.62E-07	8.28E-07	2.46E-07

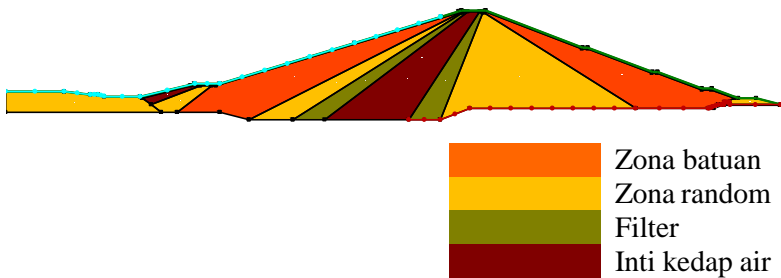
Berdasarkan nilai debit rembesan pada Tabel 5.1, kemudian dibuat grafik hubungan antara debit rembesan dan material kedap air seperti pada Gambar 5.5. Pada Gambar 5.5 terlihat perbandingan kecepatan dari tiap kondisi muka air upstream. Tiap bendungan dengan susunan material berbeda pada kondisi muka air yang berbeda memiliki kemampuan yang berbeda dalam mempertahankan diri dari rembesan.



Gambar 5. 5 Perbandingan tiga kondisi bendungan terhadap rembesan pada bendungan inti tegak

5.1.1.2 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti miring

Bendungan tipe urugan zonal dengan inti miring merupakan bendungan tipe zonal yang memiliki inti kedap air dengan kemiringan tertentu. Pada pemodelan ini, bendungan inti miring digambarkan terdiri dari empat zona dengan karakteristik tanah yang berbeda-beda (Gambar 5.6). Untuk mendapatkan berbandingan debit rembesan, tubuh bendungan akan diisi dengan kombinasi material seperti pada Tabel 4.5.



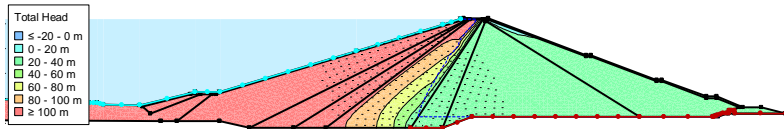
Gambar 5. 6 Pemodelan desain tubuh bendungan pada Geo Studio SEEP/W

Dalam membuat pemodelan tubuh bendungan inti miring pada Geo Studio SEEP/W, digunakan gambar potongan melintang tubuh bendungan. Berdasarkan data tanah yang ada, zonasi susunannya diatur sedemikian rupa sehingga terlihat seperti pada Gambar 5.6. Pada pemodelan tersebut, kondisi muka air digambarkan sebagai garis *boundary condition* yang berwarna biru pada permukaan *upstream* tubuh bendungan. Garis merah pada dasar tubuh bendungan menggambarkan saluran drainase, sehingga aliran rembesan akan diarahkan menuju saluran tersebut.

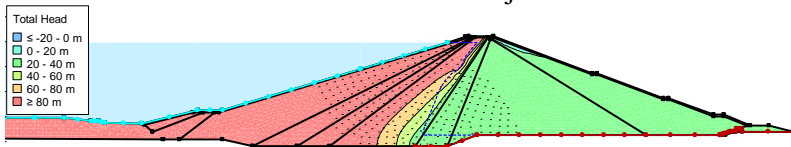
Uji stabilitas terhadap rembesan dilakukan dengan meninjau tiga kondisi muka air upstream yaitu muka air normal (MAN), muka air banjir (MAB) dan ketika muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*) terhadap lima variasi tubuh bendungan berdasarkan kombinasi materialnya. Dari uji stabilitas ketiga kondisi tersebut diperoleh garis aliran rembesan, *total head* pada tubuh bendungan, serta debit rembesan yang keluar melalui saluran

drainase. Tahapan pemodelan menggunakan Geo Studio SEEP/W bisa dilihat pada lampiran.

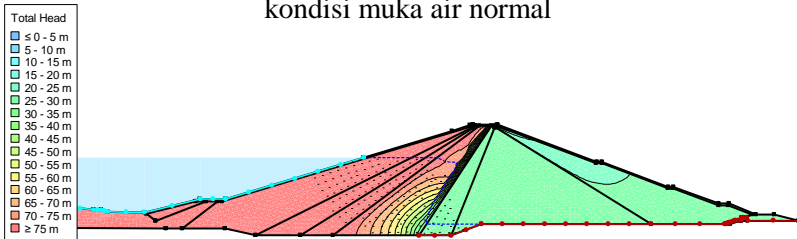
Hasil uji stabilitas berdasarkan tiga kondisi muka air *upstream* dengan variasi material kombinasi 1 (Tabel 4.5) terlihat seperti pada Gambar 5.7, Gambar 5.8 dan Gambar 5.9. Sementara itu, hasil uji stabilitas rembesan dengan kombinasi susunan material lainnya bisa dilihat pada lampiran.



Gambar 5. 7 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tegak kondisi muka air banjir



Gambar 5. 8 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tegak kondisi muka air normal



Gambar 5. 9 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tegak kondisi muka air surut tiba-tiba

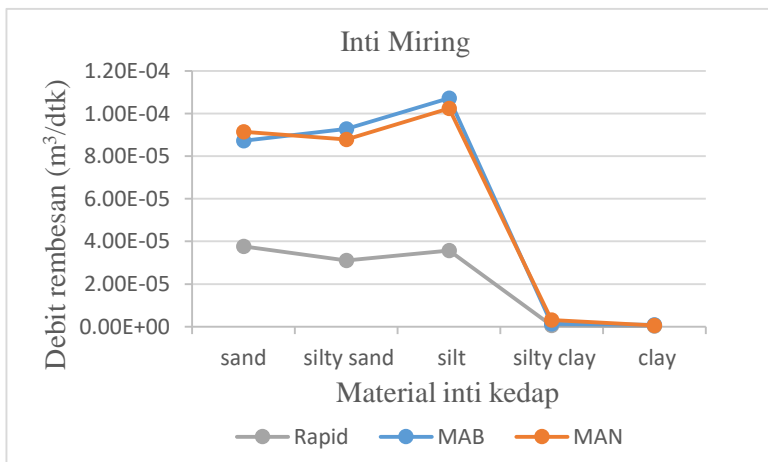
Ketiga kondisi muka air *upstream* menunjukkan aliran rembesan yang menuju saluran drainase, sehingga diperoleh nilai debit rembesan yang melewati tubuh bendungan (Tabel 5.2). Selain kondisi muka air, garis rembesan juga dipengaruhi oleh jenis material penyusun tubuh bendungan. Tabel 5.2 menunjukkan bahwa meski data tanah yang digunakan sama dengan data tanah

pada pemodelan bendungan dengan inti tegak, nilai debit rembesan yang dihasilkan berbeda.

Tabel 5. 2 Total laju rembesan pada bendungan inti miring

Material	MAB (m ³ /s)	MAN (m ³ /s)	Rapid (m ³ /s)
Sand	8.73E-05	9.14E-05	3.77E-05
Silty sand	9.28E-05	8.78E-05	3.10E-05
Silt	1.07E-04	1.02E-04	3.57E-05
Silty clay	1.28E-06	3.09E-06	5.10E-07
Clay	7.78E-07	4.89E-07	1.94E-07

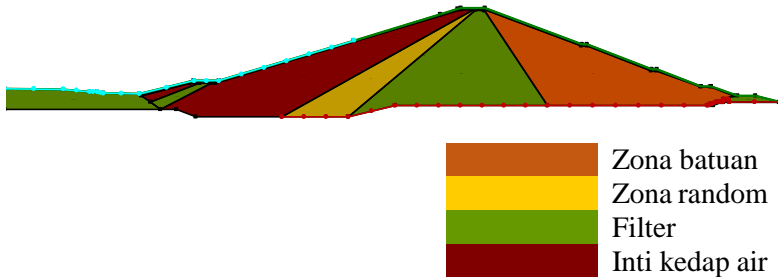
Berdasarkan nilai debit rembesan pada Tabel 5.2, kemudian dibuat grafik hubungan antara debit rembesan dan material kedap air seperti pada Gambar 5.10. Pada Gambar 5.10 terlihat perbandingan kecepatan dari tiap kondisi bendungan. Pada ketiga kondisi muka air, inti kedap air yang menggunakan material tanah liat (*clay*) menghasilkan debit paling kecil. Sementara itu, pasir (*sand*) mampu meluluskan debit air yang paling banyak pada tiga kondisi muka air yang diujikan.



Gambar 5. 10 Perbandingan tiga kondisi bendungan terhadap rembesan pada bendungan inti miring

5.1.1.3 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tirai

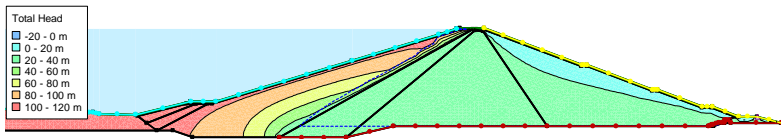
Bendungan dengan inti tirai merupakan bendungan yang inti kedap airnya berada pada bagian paling dekat dengan muka air waduk. Model bendungan tipe urugan zonal dengan inti tirai digambarkan terdiri dari empat zona dengan karakteristik tanah yang berbeda-beda. Susunan tanah pada tubuh bendungan akan divariasikan berdasarkan kombinasi material pada Tabel 4.5. Variasi susunan tanah dilakukan untuk mengetahui kemampuan desain bendungan terhadap laju rembesan. Untuk itu, pemodelan tubuh bendungan dilakukan pada Geo Studio SEEP/W menggunakan potongan melintang tubuh bendungan. Rencana pemodelan dengan inti tirai dapat dilihat pada Gambar 5.11.



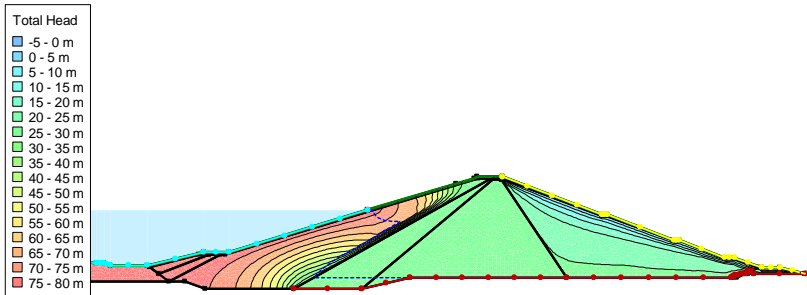
Gambar 5. 11 Pemodelan desain tubuh bendungan pada Geo Studio SEEP/W

Pada Geo Studio SEEP/W, kondisi muka air digambarkan sebagai garis *boundary condition* yang berwarna biru pada permukaan *upstream* tubuh bendungan. Garis merah pada dasar tubuh bendungan menggambarkan saluran drainase, sehingga aliran rembesan akan diarahkan menuju saluran tersebut. Setelah dilakukan input data dan penggambaran kondisi yang akan diujikan, uji stabilitas rembesan akan ditinjau melalui tiga kondisi muka air yaitu muka air normal (MAN), muka air banjir (MAB) dan ketika muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*). Dari pemodelan yang telah dilakukan, akan diperoleh garis aliran pada tubuh bendungan, laju rembesan pada inti kedap air serta total air yang mampu melewati tubuh bendungan tersebut.

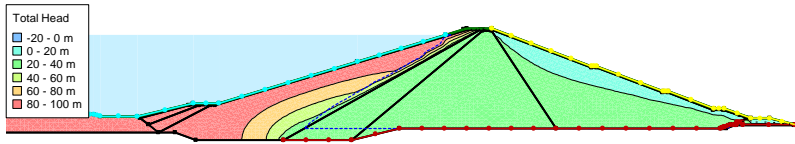
Untuk mendapatkan desain tubuh bendungan serta susunan tanah yang paling baik untuk meminimalisir laju rembesan, maka dilakukan perbandingan desain tubuh bendungan. Pada penelitian ini, perbandingan desain dilakukan dengan membuat kombinasi material penyusun tubuh bendungan yang disusun pada desain tubuh bendungan inti tirai yang sama. Hasil uji stabilitas rembesan dengan variasi material kombinasi 1 (Tabel 4.5) bisa dilihat pada Gambar 5.12, Gambar 5.13, Gambar 5.14. Sementara itu, untuk hasil uji rembesan bendungan inti tirai pada variasi material kombinasi lainnya bisa dilihat pada lampiran.



Gambar 5. 12 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tirai kondisi muka air banjir



Gambar 5. 13 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tirai kondisi muka air surut tiba-tiba



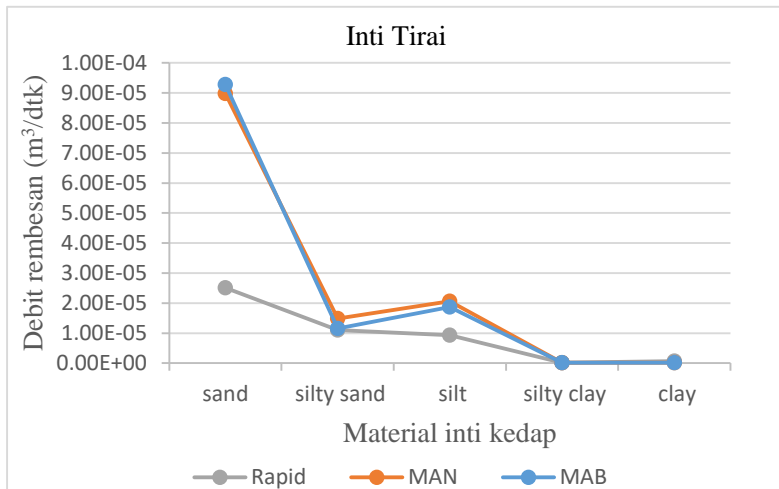
Gambar 5. 14 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tirai kondisi muka air normal

Hasil uji stabilitas berdasarkan tiga kondisi muka air upstream menunjukkan aliran rembesan yang menuju saluran drainase, sehingga diperoleh nilai debit rembesan yang melewati tubuh bendungan (Tabel 5.3). Selain kondisi muka air dan material penyusun tubuh bendungan, garis rembesan juga dipengaruhi oleh posisi inti kedap air. Tabel 5.3 menunjukkan bahwa meski data tanah yang digunakan sama dengan data tanah pada pemodelan bendungan dengan inti tegak dan inti miring, nilai debit rembesan yang dihasilkan berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa inti kedap air pengaruh cukup besar terhadap stabilitas rembesan pada tubuh bendungan.

Tabel 5. 3 Total laju rembesan pada bendungan inti tirai

Material	MAB (m ³ /s)	MAN (m ³ /s)	Rapid (m ³ /s)
Sand	9.28E-05	8.98E-05	2.51E-05
Silty sand	1.15E-05	1.48E-05	1.10E-05
Silt	1.87E-05	2.06E-05	9.30E-06
Silty clay	1.09E-07	1.51E-07	1.19E-07
Clay	1.60E-07	1.56E-07	7.21E-07

Berdasarkan nilai debit rembesan pada Tabel 5.3, kemudian dibuat grafik hubungan antara debit rembesan dan material kedap air seperti pada Gambar 5.15. Gambar 5.15 menunjukkan perbandingan kecepatan dari tiap kondisi bendungan. Pada ketiga kondisi muka air, inti kedap air yang menggunakan material tanah liat (*clay*) menghasilkan debit paling kecil. Sementara itu, pasir (*sand*) mampu meluluskan debit air yang paling banyak pada tiga kondisi muka air yang diujikan.



Gambar 5. 15 Perbandingan tiga kondisi bendungan terhadap rembesan pada bendungan inti miring

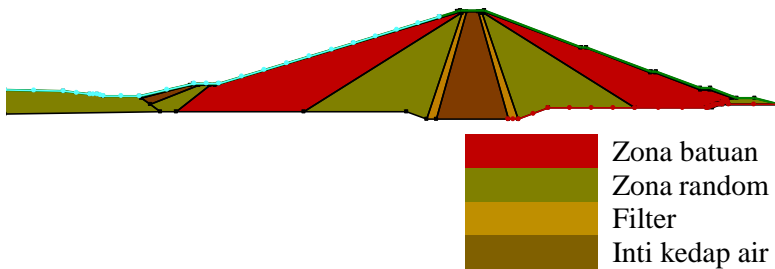
5.1.2 Pemodelan Bendungan Tipe Urugan Zonal dengan Variasi Tebal Inti Ditinjau dari Bendungan Inti Tegak

Lebar inti kedap air mempengaruhi kestabilan lereng dan biasanya dipilih sesuai dengan perbandingan antara harga dan bahan yang tersedia di lapangan. (sumber: SNI 8062-2015) Mengingat pentingnya peran inti kedap air terhadap stabilitas rembesan, penulis melakukan pemodelan dengan membuat tiga variasi tebal inti kedap air pada bendungan inti tegak menggunakan Geo Studio SEEP/W. Uji pengaruh tebal inti kedap air hanya

dilakukan pada inti tegak untuk mengetahui pengaruh tebal inti kedap air dan lapisan filter pada tubuh bendungan terhadap aliran rembesan. Dalam pemodelan ini, ketiga beda tebal inti tersebut juga diterapkan pada lima variasi material penyusun inti tegak.

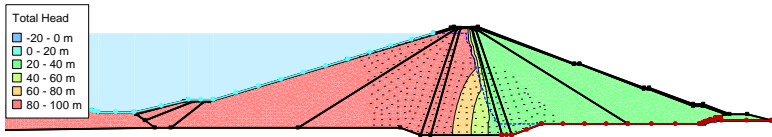
5.1.2.1 Tebal inti 1 (43.8 m)

Inti kedap air pada bendungan tipe urugan zonal inti tegak digambarkan memiliki tebal permukaan 7.57 m dan tebal kaki 43.8 m. Variasi material penyusun tubuh bendungan diberikan seperti pada Tabel 4.5. Pemodelan pada Geo Studi SEEP/W memiliki desain yang sama dengan pemodelan pada uji stabilitas rembesan inti tegak pada sub bab sebelumnya. Perubahan hanya pada dimensi inti kedap air sehingga pemodelan terlihat seperti pada Gambar 5.16.

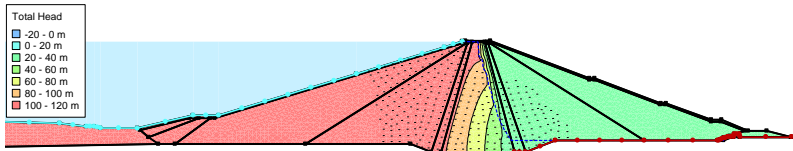


Gambar 5. 16 Pemodelan desain tubuh bendungan pada Geo Studio SEEP/W

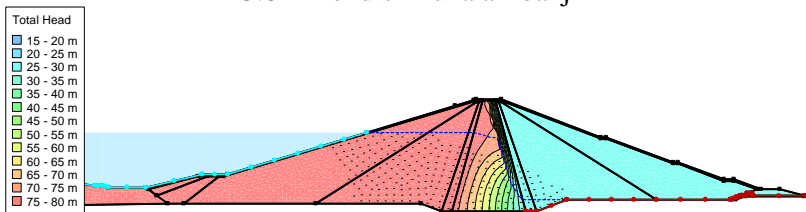
Untuk mengetahui desain tubuh bendungan serta susunan tanah yang paling baik untuk meminimalisir lajur rembesan, maka dilakukan perbandingan desain tubuh bendungan. Pada penelitian ini, perbandingan desain dilakukan dengan membuat kombinasi material penyusun tubuh bendungan yang disusun pada tubuh bendungan dengan tebal inti 43.8 m. Hasil uji stabilitas rembesan dengan variasi material kombinasi 1 (Tabel 4.5) bisa dilihat pada Gambar 5.17, Gambar 5.18 dan Gambar 5.19. Sementara itu, untuk hasil uji rembesan pada variasi material kombinasi lainnya bisa dilihat pada lampiran.



Gambar 5. 17 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 43.8 m kondisi muka air normal



Gambar 5. 18 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 43.8 m kondisi muka air banjir



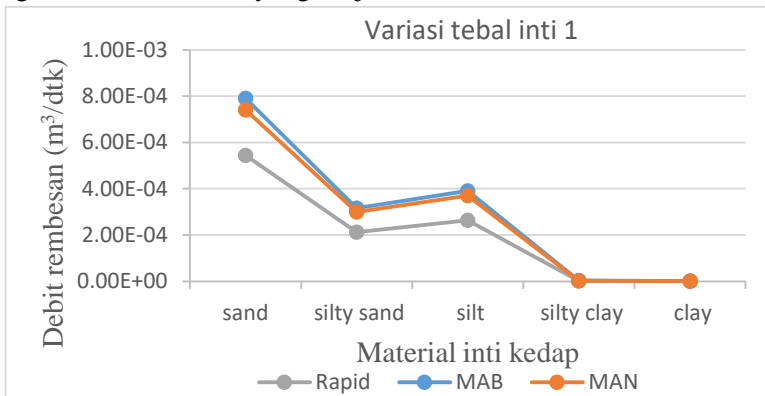
Gambar 5. 19 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 43.8 m kondisi muka air surut tiba-tiba

Setelah pemodelan selesai, hasil uji stabilitas pada lima kombinasi material serta tiga kondisi muka air *upstream* diperoleh nilai debit rembesan yang melewati tubuh bendungan (Tabel 5.4). Data tersebut menunjukkan bahwa selain kondisi muka air, garis rembesan juga dipengaruhi oleh jenis material penyusun tubuh bendungan serta tebal inti ke air. Dapat dilihat pada Tabel 5.4, dengan tebal inti ke air 43.8 m garis rembesan serta debit rembesan yang dihasilkan berbeda dengan nilai pada desain inti ke air pada sub bab sebelumnya.

Tabel 5. 4 Total laju rembesan pada bendungan dengan tebal inti 43.8 m

Material	MAB (m ³ /s)	MAN (m ³ /s)	Rapid (m ³ /s)
Sand	7.90E-04	7.41E-04	5.44E-04
Silty sand	3.17E-04	2.99E-04	2.12E-04
Silt	3.90E-04	3.70E-04	2.63E-04
Silty clay	3.01E-06	2.19E-06	2.40E-06
Clay	6.82E-07	1.57E-06	3.56E-07

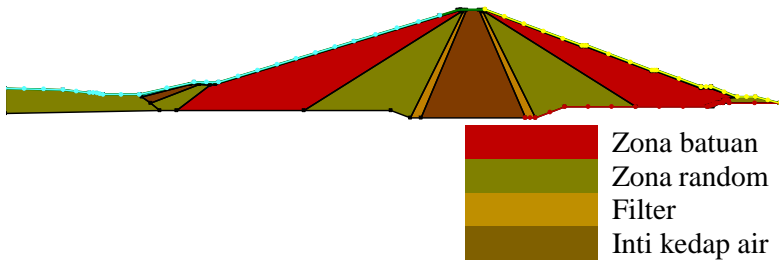
Berdasarkan nilai debit rembesan pada Tabel 5.4, kemudian dibuat grafik hubungan antara debit rembesan dan material kedap air seperti pada Gambar 5.20. Pada Gambar 5.20 terlihat perbandingan kecepatan dari tiap kondisi bendungan. Pada ketiga kondisi muka air, inti kedap air yang menggunakan material tanah liat (*clay*) menghasilkan debit paling kecil. Sementara itu, pasir (*sand*) mampu meluluskan debit air yang paling banyak pada tiga kondisi muka air yang diujikan.



Gambar 5. 20 Perbandingan tiga kondisi muka air *upstream* terhadap rembesan pada bendungan dengan tebal inti 43.8 m.

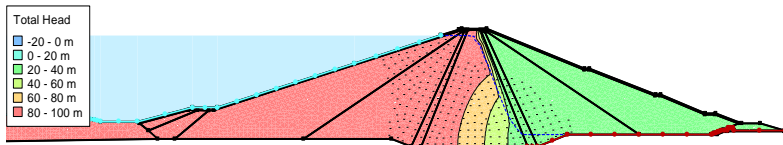
5.1.2.2 Tebal inti 2 (63.8 m)

Pada pemodelan ke dua, inti kedap air pada bendungan zonal inti tegak digambarkan memiliki tebal permukaan 7.57 m dan tebal bagian kaki 63.8 m. Inti tersebut dilindungi oleh filter dengan tebal 6.3 m pada sisi kiri dan kanan. Variasi material penyusun tubuh bendungan diberikan seperti pada Tabel 4.5. Pada pemodelan terhadap variasi tebal inti ini, penulis tidak melakukan perubahan pada data *boundary condition* maupun desain tubuh bendungan sehingga pemodelan terlihat seperti pada Gambar 5.21.

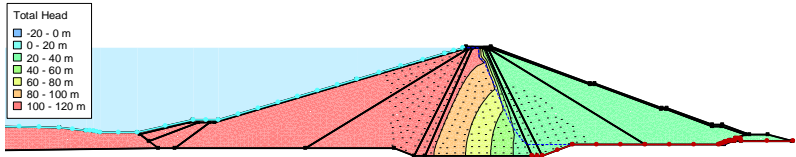


Gambar 5. 21 Pemodelan desain tubuh bendungan pada Geo Studio SEEP/W

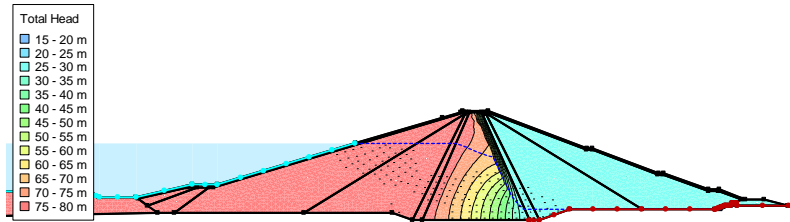
Untuk mengetahui pengaruh tebal inti terhadap laju rembesan pada tubuh bendungan, maka dilakukan perbandingan desain dengan membuat kombinasi material penyusun tubuh bendungan yang disusun pada tubuh bendungan dengan tebal inti 63.8 m. Hasil uji stabilitas rembesan dengan variasi material kombinasi 1 (Tabel 4.5) bisa dilihat pada Gambar 5.22, Gambar 5.23 dan Gambar 5.24. Sementara itu, untuk hasil uji rembesan pada variasi material kombinasi lainnya bisa dilihat pada lampiran.



Gambar 5. 22 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 63.8 m kondisi muka air normal



Gambar 5. 23 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 63.8 m kondisi muka air banjir



Gambar 5. 24 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 63.8 m kondisi muka air surut tiba-tiba

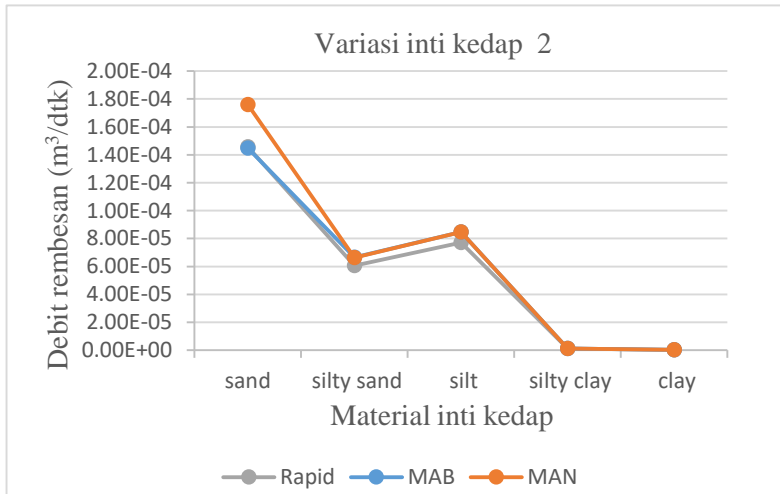
Setelah pemodelan selesai, kemudian dilakukan *running program* pada Geo Studio SEEP/W sehingga diketahui hasil uji stabilitasnya berdasarkan tiga kondisi muka air *upstream*. Nilai debit rembesan yang melewati tubuh bendungan pada lima kombinasi material dengan tebal inti 63.8 m dapat dilihat pada Tabel 5.5. Dengan tebal inti kedap air 63.8 m garis rembesan serta debit rembesan yang dihasilkan berbeda dengan nilai pada desain inti kedap air pada sub bab sebelumnya. Kondisi ini menunjukkan bahawa tebal inti kedap air mempengaruhi laju rembesan pada tubuh bendungan.

Tabel 5. 5 Total laju rembesan pada bendungan dengan tebal inti 43.8m

Material	MAB (m ³ /s)	MAN (m ³ /s)	Rapid (m ³ /s)
Sand	1.45e-04	1.76e-04	1.46e-04
Silty sand	6.65e-05	6.64e-05	6.06e-05
Silt	8.47e-05	8.46e-05	7.71e-05
Silty clay	1.26e-06	1.27e-06	1.20e-06

Material	MAB (m^3/s)	MAN (m^3/s)	Rapid (m^3/s)
Clay	4.11e-07	2.94e-07	3.51e-07

Berdasarkan nilai debit rembesan pada Tabel 5.5, kemudian dibuat grafik hubungan antara debit rembesan dan material kedap air seperti pada Gambar 5.25. Pada Gambar 5.25 terlihat perbandingan kecepatan dari tiap kondisi bendungan. Pada ketiga kondisi muka air, inti kedap air yang menggunakan material tanah liat (*clay*) menghasilkan debit paling kecil. Sementara itu, pasir (*sand*) mampu meluluskan debit air yang paling banyak pada tiga kondisi muka air yang diujikan.

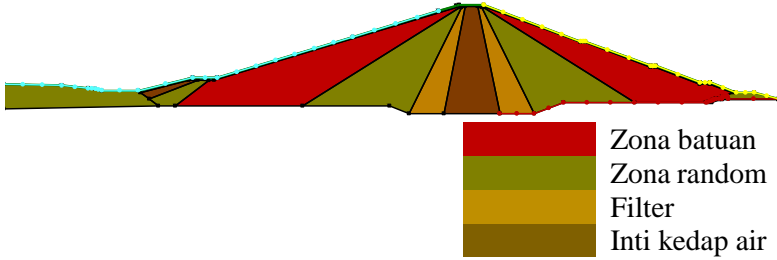


Gambar 5. 25 Perbandingan tiga kondisi muka air upstream terhadap rembesan pada bendungan dengan tebal inti 43.8 m.

5.1.2.3 Tebal inti 3 (34.04 m)

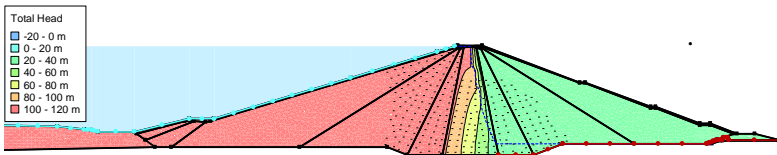
Pemodelan ke tiga untuk uji pengaruh tebal inti menggambarkan tebal permukaan inti bendungan 7.57 m dan tebal bagian kaki 34.04 m. Inti tersebut dilindungi oleh filter dengan tebal 21.3 m pada sisi kiri dan kanan. Pada sub bab ini penulis mencoba melihat pengaruh filter terhadap laju rembesan yang akan

menuju atau meninggalkan inti kepad air sehingga desain tubuh bendungan terlihat seperti pada Gambar 5.26. Pada desain tubuh bendungan, variasi material penyusun tubuh bendungan diberikan seperti pada Tabel 4.5.

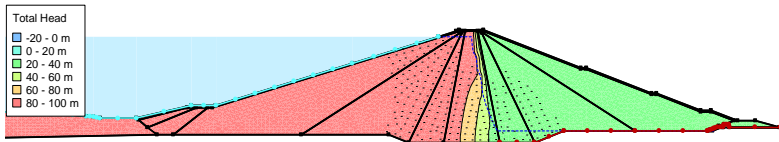


Gambar 5. 26 Pemodelan desain tubuh bendungan pada Geo Studio SEEP/W

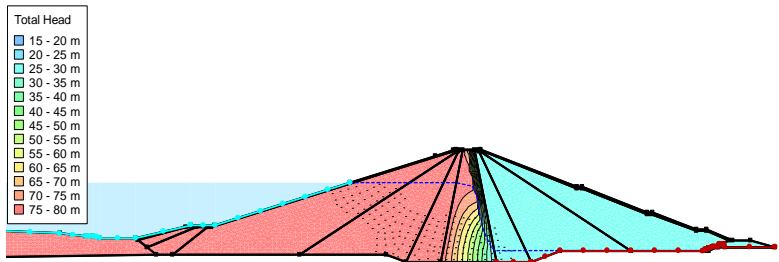
Untuk mengetahui desain tubuh bendungan serta susunan tanah yang paling baik untuk meminimalisir lajur rembesan, maka dilakukan perbandingan desain tubuh bendungan. Pada penelitian ini, perbandingan desain dilakukan dengan membuat kombinasi material penyusun tubuh bendungan yang disusun pada tubuh bendungan dengan tebal inti 34.04 m. Hasil uji stabilitas rembesan dengan variasi material kombinasi 1 (Tabel 4.5) bisa dilihat pada Gambar 5.27, Gambar 5.28 dan Gambar 5.29. Sementara itu, untuk hasil uji rembesan pada variasi material kombinasi lainnya bisa dilihat pada lampiran.



Gambar 5. 27 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 34.04 m kondisi muka air banjir



Gambar 5. 28 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 34.04 m kondisi muka air normal.



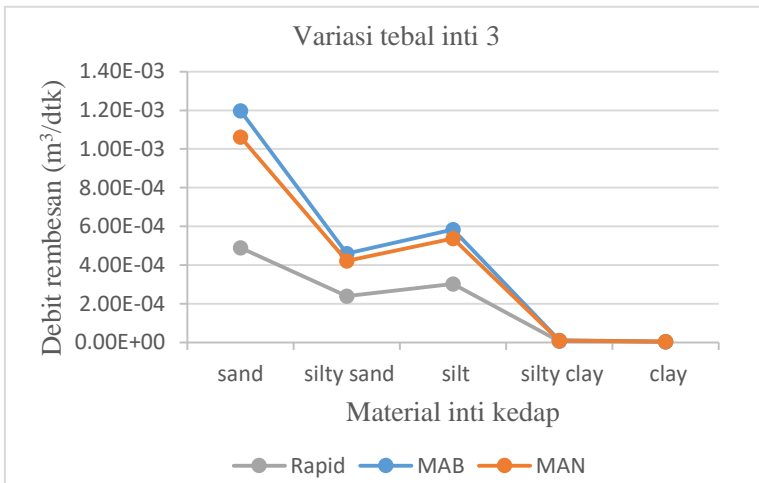
Gambar 5. 29 Bendungan tipe urugan zonal dengan tebal inti tegak 34.04 m kondisi muka air surut tiba-tiba.

Setelah pemodelan selesai, kemudian dilakukan *running* sehingga hasil uji stabilitasnya berdasarkan tiga kondisi muka air *upstream* menunjukkan aliran rembesan yang menuju saluran drainase. Nilai debit rembesan yang melewati tubuh bendungan pada lima kombinasi material dengan tebal inti 34.04 m dapat dilihat pada Tabel 5.6. Dengan tebal inti kedap air 34.04 m garis rembesan serta debit rembesan yang dihasilkan berbeda dengan nilai pada desain inti kedap air pada sub bab sebelumnya.

Tabel 5. 6 Total laju rembesan pada bendungan dengan tebal inti 34.04m

Material inti	MAB (m ³ /s)	MAN (m ³ /s)	Rapid (m ³ /s)
Sand	1.20E-03	1.06E-03	4.90E-04
Silty sand	4.60E-04	4.22E-04	2.39E-04
Silt	5.83E-04	5.38E-04	3.03E-04
Silty clay	1.08E-05	1.00E-05	6.30E-06
Clay	3.89E-06	3.75E-06	2.18E-06

Berdasarkan nilai debit rembesan pada Tabel 5.6, kemudian dibuat grafik hubungan antara debit rembesan dan material kedap air seperti pada Gambar 5.30. Pada Gambar 5.30 terlihat perbandingan kecepatan dari tiap kondisi bendungan. Pada ketiga kondisi muka air, inti kedap air yang menggunakan material tanah liat (*clay*) menghasilkan debit paling kecil. Sementara itu, pasir (*sand*) mampu meluluskan debit air yang paling banyak pada tiga kondisi muka air yang diujikan.



Gambar 5. 30 Perbandingan tiga kondisi muka air upstream terhadap rembesan pada bendungan dengan tebal inti 34.04 m

5.2 Penggambaran Garis Depresi

Selain melakukan pendekatan secara analitik dengan Geo Studio SEEP/W, penulis juga melakukan pendekatan secara numerik yaitu dengan menggambarkan pola aliran menggunakan metode Casagrande. Metode Casagrande merupakan metode penggambaran formasi garis aliran rembesan atau garis depresi pada tubuh bendungan. Pada penelitian ini, penggambaran garis depresi dengan metode Casagrande hanya dilakukan untuk

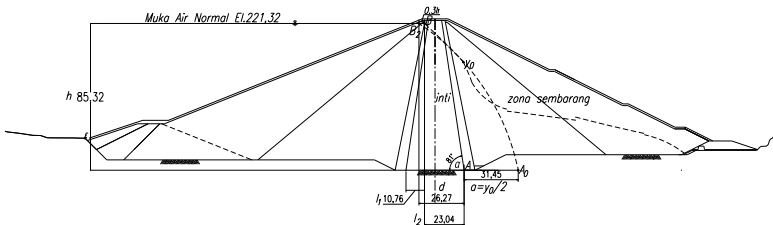
bandungan urugan dengan inti tegak, bandungan urugan dengan inti miring serta bandungan urugan dengan inti tirai.

5.2.1 Bandungan tipe urugan zonal dengan inti tegak

Metode Casagrande dalam menggambarkan formasi garis depresi memiliki tahapan-tahapan yang cukup detail. Pada penelitian ini, tahapan penggambaran garis depresi bisa dilihat pada sub-bab 2.11.1. Penggambaran garis depresi pada penelitian ini dilakukan pada tubuh bandungan dengan inti tegak dengan tinjauan tiga kondisi muka air *upstream* yaitu muka air normal (MAN), muka air banjir (MAB), dan muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*).

5.2.1.1 Kondisi muka air normal

Penggambaran garis depresi pada kondisi muka air normal dengan metode Casagrande meliputi beberapa tahap perhitungan. Gambar 5.31 menunjukkan data-data yang harus dikumpulkan agar bisa memulai perhitungan untuk mendapatkan garis depresi. Berikut perhitungan garis depresi pada tubuh bandungan dengan inti tegak pada kondisi muka air normal.



Gambar 5. 31 Penggambaran garis depresi pada bandungan inti tegak berdasarkan metode Cassagrande.

- Garis depresi pada inti

$$\begin{aligned}
 h &= 85.32 \text{ m} \\
 l_1 &= 10.76 \text{ m} \\
 l_2 &= 23.04 \text{ m} \\
 0.3l_1 &= 3.23 \text{ m} \\
 d &= 0.3l_1 + l_2 \\
 &= 26,27 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d$$

$$= 63.00 \text{ m}$$

Persamaan parabola bentuk dasar:

$$y = \sqrt{2y_0x + y_0^2}$$

$$y = \sqrt{126x + 63.00^2}$$

Dari persamaan parabola yang didapatkan, kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai koordinat x dan y, seperti pada Tabel 5.7. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk permukaan air keluar pada sudut 81° .

Tabel 5. 7 Koordinat garis depresi pada inti bendungan

x (m)	-31.5	-10	-5	0	5	10	15
y (m)	0	52.05	57.79	63.00	67.82	72.32	76.55

- Garis depresi pada zona sembarang

Dengan anggapan koefisien filtrasi zona sembarang sebesar $k_2 = 20k_1$ ($k_1 =$ zona inti kedap air) serta debit aliran filtrasi dianggap konstan, maka:

$$k_1 = 0.0000001$$

$$k_2 = 20k_1$$

$$k_2 = 20 \times 0.0000001$$

$$= 0.000002$$

$$Q = k_1 \cdot y_0 \cdot L = k_2 \cdot h_2 L, \text{ sehingga harga}$$

$$h_2 = (k_1/k_2)y_0$$

$$= (0.0000001/0.000002) \times 63.00$$

$$= 3.15 \text{ m}$$

Berdasarkan persamaan di atas, diperoleh koordinat bentuk dasar sebagai berikut:

$$y = \sqrt{2h_2x + h_2^2}$$

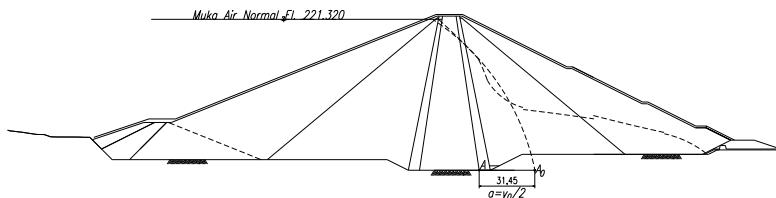
$$= \sqrt{6.3x + 3.15^2}$$

Dari persamaan di atas, kemudian didapatkan koordinat x dan y sebagai berikut:

Tabel 5. 8 Koordinat garis depresi pada zona sembarang

x (m)	-1.58	0	10	30	70	110	150	157.5
y (m)	0	3.2	8.5	14.1	21.2	26.5	30.9	31.7

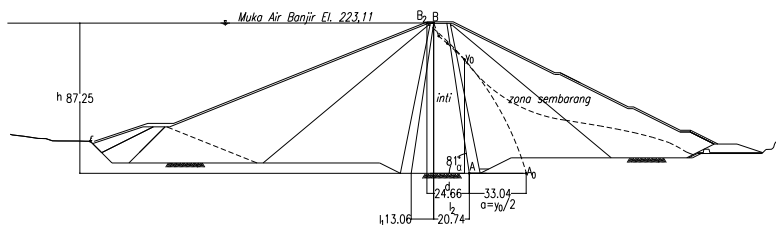
Hasil perhitungan persamaan parabola berupa nilai koordinat X dan Y yang selanjutnya digambarkan dalam tubuh bendungan. Koordinat garis depresi digambarkan sebagai garis putus-putus yang menuju ke saluran drainase seperti pada Gambar 5.32.



Gambar 5. 32 Garis depresi pada bendungan dengan inti tegak, kondisi muka air normal

5.2.1.2 Kondisi muka air banjir

Perubahan kondisi muka air pada hulu bendungan mempengaruhi pola aliran rembesan pada tubuh bendungan. Pada penelitian ini, dilakukan pula penggambaran garis depresi pada kondisi muka air banjir. Penggambaran garis depresi menggunakan metode Casagrande sehingga memerlukan beberapa data perhitungan. Gambar 5.33 menunjukkan beberapa data yang bisa digunakan dalam perhitungan garis rembesan. Berikut merupakan perhitungan garis depresi pada kondisi muka air banjir di hulu bendungan.



Gambar 5. 33 Penggambaran garis depresi pada bendungan inti tegak berdasarkan metode Cassagrande.

- Garis depresi pada inti

$$h = 87.25 \text{ m}$$

$$l_1 = 13.06 \text{ m}$$

$$l_2 = 20.74 \text{ m}$$

$$0.3l_1 = 3.92 \text{ m}$$

$$d = 0.3l_1 + l_2 \\ = 24,66 \text{ m}$$

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \\ = 66.01 \text{ m}$$

Persamaan parabola bentuk dasar:

$$y = \sqrt{2y_0x + y_0^2}$$

$$y = \sqrt{132x + 66.01^2}$$

Dari persamaan parabola yang didapatkan, kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai koordinat x dan y, seperti pada Tabel 5.9. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk permukaan air keluar pada sudut 81° .

Tabel 5. 9 Koordinat garis depresi pada inti bendungan

x (m)	-33.04	-10	-5	0	5	10	20
y (m)	0	55.11	60.80	66.01	70.83	75.35	83.65

- Garis depresi pada zona sembarang

Dengan anggapan koefisien filtrasi zona sembarang sebesar $k_2 = 20k_1$ ($k_1 =$ zona inti kedap air) serta debit aliran filtrasi dianggap konstan, maka:

$$k_2 = 20k_1$$

$$k_2 = 20 \times 0.0000001$$

$$= 0.000002$$

$$Q = k_1 \cdot y_0 \cdot L = k_2 \cdot h_2 L, \text{ sehingga harga}$$

$$h_2 = (k_1/k_2)y_0$$

$$= (0.0000001/0.000002) \times 66.01$$

$$= 3.30 \text{ m}$$

Berdasarkan persamaan di atas, diperoleh koordinat bentuk dasar sebagai berikut:

$$y = \sqrt{2h_2x + h_2^2}$$

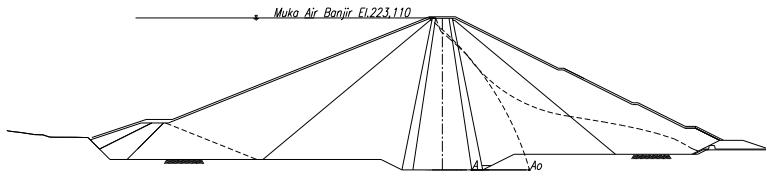
$$= \sqrt{6.6x + 3.30^2}$$

Dari persamaan di atas, kemudian didapatkan koordinat x dan y sebagai berikut:

Tabel 5. 10 Koordinat garis depresi pada zona sembarang

x (m)	-1.65	0	10	30	50	70	90	110
y (m)	0	3.30	8.77	14.45	18.46	21.75	24.60	27.15

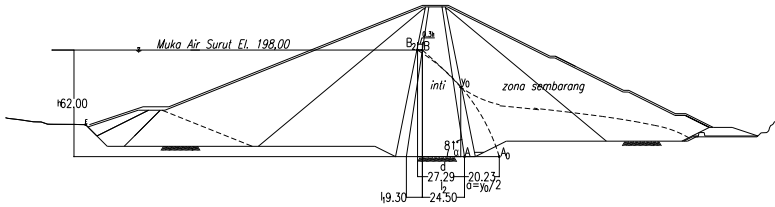
Hasil perhitungan persamaan parabola berupa nilai koordinat X dan Y kemudian digambarkan ke dalam tubuh bendungan. Penggambaran koordinat garis depresi pada tubuh bendungan ditunjukkan dengan garis putus-putus seperti pada Gambar 5.34.



Gambar 5. 34 Garis depresi pada bendungan dengan inti tegak, kondisi muka air banjir

5.2.1.3 Kondisi air surut tiba-tiba

Kondisi penggambaran garis depresi yang ke tiga adalah ketika muka air hulu surut tiba-tiba. Kondisi ini perlu diperhitungkan mengingat adanya kemungkinan kondisi air di dalam bendungan yang mungkin akan berubah secara tiba-tiba. Gambar 3.35 menunjukkan data perhitungan yang diperlukan dalam penggambaran garis depresi dengan metode Casagrande. Berikut merupakan perhitungan pola aliran garis depresi pada kondisi muka air waduk surut tiba-tiba:



Gambar 5. 35 Penggambaran garis depresi pada bendungan inti tegak berdasarkan metode Cassagrande.

- Garis depresi pada inti

$$h = 62.00 \text{ m}$$

$$l_1 = 9.30 \text{ m}$$

$$l_2 = 29.07 \text{ m}$$

$$0.3l_1 = 2.79$$

$$d = 0.3l_1 + l_2 \\ = 31.86 \text{ m}$$

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \\ = 37.85 \text{ m}$$

Persamaan parabola bentuk dasar:

$$y = \sqrt{2y_0x + y_0^2}$$

$$y = \sqrt{75.69x + 37.85^2}$$

Dari persamaan parabola di atas, kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai koordinat x dan y, seperti pada Tabel 5.11. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk permukaan air keluar pada sudut 81° .

Tabel 5. 11 Koordinat garis depresi pada inti tegak

x (m)	-33.04	0	5	10	15	20	25
y (m)	0	37.85	42.55	46.79	50.67	54.28	57.66

- Garis depresi pada zona sembarang

Dengan anggapan koefisien filtrasi zona sembarang sebesar $k_2 = 20k_1$ ($k_1 =$ zona inti kedap air) serta debit aliran filtrasi dianggap konstan, maka:

$$k_1 = 0.0000001$$

$$k_2 = 20k_1$$

$$k_2 = 20 \times 0.0000001 \\ = 0.000002$$

$$Q = k_1 \cdot y_0 \cdot L = k_2 \cdot h_2 L,$$

Sehingga harga

$$h_2 = (k_1/k_2)y_0 \\ = (0.0000001/0.000002) \times 37.85 \\ = 1.89 \text{ m}$$

Berdasarkan persamaan di atas, diperoleh koordinat bentuk dasar sebagai berikut:

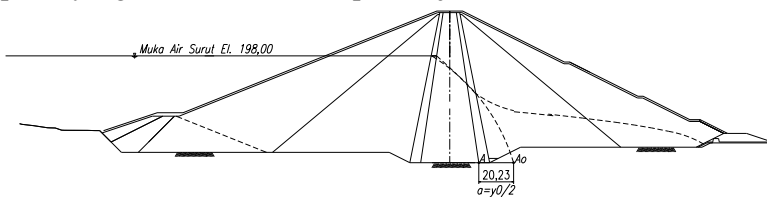
$$y = \sqrt{2h_2x + h_2^2} \\ = \sqrt{3.78x + 1.89^2}$$

Dari persamaan di atas, kemudian didapatkan koordinat x dan y sebagai berikut:

Tabel 5. 12 Koordinat garis depresi pada zona sembarang

x (m)	-1.65	0	10	20	30	40	50	70
y (m)	0	1.89	6.44	8.90	10.82	12.45	13.89	16.39

Selanjutnya, koordinat yang diperoleh dari persamaan parabola dasar dapat digambarkan pada tubuh bendungan seperti pada Gambar 5.36. Garis depresi digambarkan sebagai garis putus-putus yang melewati inti kedap menuju saluran drainase.



Gambar 5. 36 Garis depresi pada bendungan dengan inti tegak, kondisi muka air surut tiba-tiba

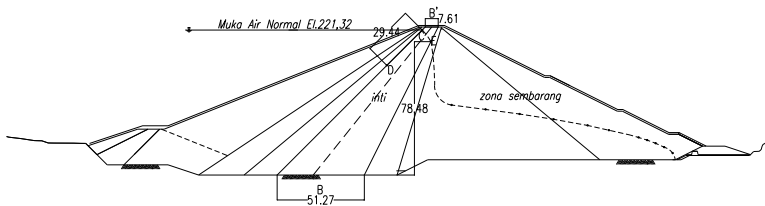
5.2.2 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti miring

Penggambaran garis depresi dengan pendekatan menggunakan metode Casagrande juga bisa dilakukan pada tubuh

bendungan dengan inti miring. Tahapan perhitungan garis depresi dengan inti miring dapat dilihat pada sub bab 2.11.2. Pada sub bab ini, akan digambarkan garis depresi yang melalui tubuh bendungan dengan inti miring yang ditinjau dari tiga kondisi muka air *upstream*, yaitu pada saat muka air banjir (MAB), muka air normal (MAN) dan ketika muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*).

5.2.2.1 Kondisi muka air normal

Penggambaran pola aliran rembesan pada tubuh bendungan dengan inti miring dengan metode Casagrande berbeda dengan penggambaran pola aliran rembesan tubuh bendungan inti tegak yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya. Gambar 5.38 merupakan cara memperoleh data perhitungan untuk menggambar garis depresi. Berikut merupakan perhitungan garis depresi pada tubuh bendungan dengan inti miring pada kondisi muka air normal.



Gambar 5. 37 Penggambaran garis depresi pada bendungan inti miring berdasarkan metode Cassagrande.

- Garis depresi pada zona sembarang

$$B' = 7.61 \text{ m}$$

$$B = 51.27 \text{ m}$$

$$\frac{B + B'}{2} = 29.44 \text{ m}$$

$$y_0 = 78.48 \text{ m}$$

$$k_1 = 0.0000001$$

$$k_2 = 0.000002$$

$$h_2 = \left(\frac{k_1}{k_2} \right) y_0$$

$$= 3.924 \text{ m}$$

Persamaan parabola bentuk dasar:

$$y = \sqrt{2h_2x + h_2^2}$$

$$y = \sqrt{7.85x + 3.924^2}$$

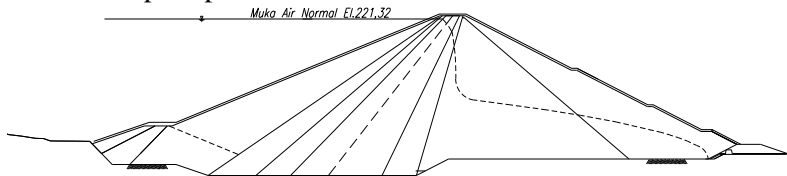
Dari persamaan parabola yang didapatkan, kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai koordinat x dan y, seperti pada Tabel 5.13. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk permukaan air keluar pada sudut 81° .

Tabel 5. 13 Koordinat garis depresi pada inti miring

x (m)	-1.57	0	5	10	15	20	25
y (m)	0	3.92	7.39	9.69	11.54	13.13	14.55

x (m)	50	70	90	110	130	150
y (m)	20.19	23.76	26.86	29.64	32.18	34.53

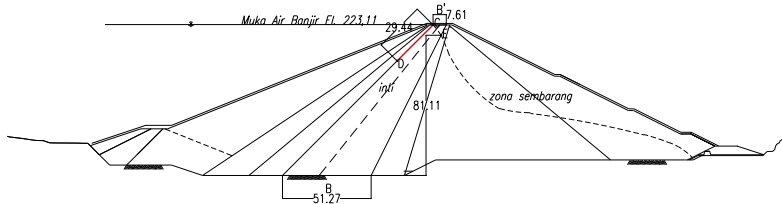
Hasil perhitungan persamaan parabola berupa nilai koordinat X dan Y kemudian digambarkan ke dalam tubuh bendungan. Penggambaran koordinat garis depresi ditunjukkan pada garis putus-putus yang melewati inti ke arah air menuju saluran drainase seperti pada Gambar 5.38.



Gambar 5. 38 Garis depresi pada bendungan dengan inti miring, kondisi muka air normal

5.2.2.2 Kondisi muka air banjir

Pola aliran rembesan yang ke dua pada tubuh bendungan dengan inti miring dengan kondisi muka air banjir. Gambar 5.40 merupakan gambaran sketsa tubuh bendungan yang menunjukkan data perhitungan untuk menghitung garis depresi. Berikut merupakan perhitungan garis depresinya:



Gambar 5. 39 Data yang diperlukan untuk menggambarkan garis depresi pada tubuh bendungan

- Garis depresi pada zona sembarang

$$B' = 7.61 \text{ m}$$

$$B = 51.27 \text{ m}$$

$$\frac{B + B'}{2} = 29.44 \text{ m}$$

$$y_0 = 81.11 \text{ m}$$

$$k_1 = 0.0000001$$

$$k_2 = 0.0000002$$

$$h_2 = \left(\frac{k_1}{k_2}\right) y_0$$

$$= 4.056 \text{ m}$$

Persamaan parabola bentuk dasar:

$$y = \sqrt{2h_2x + h_2^2}$$

$$y = \sqrt{8.11x + 4.056^2}$$

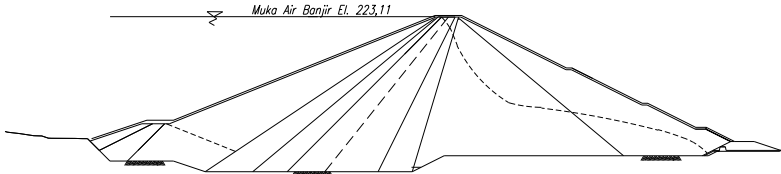
Dari persamaan parabola yang didapatkan, kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai koordinat x dan y, seperti pda Tabel 5.14. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk permukaan air keluar pada sudut 81°.

Tabel 5. 14 Koordinat garis depresi pada inti miring

x (m)	-2.03	0	5	10	15	20	25	50
y (m)	0	4.06	7.55	9.88	11.75	13.37	14.81	20.54

x(m)	70	90	110	130	140	150
y(m)	24.17	27.32	30.14	32.72	33.94	35.12

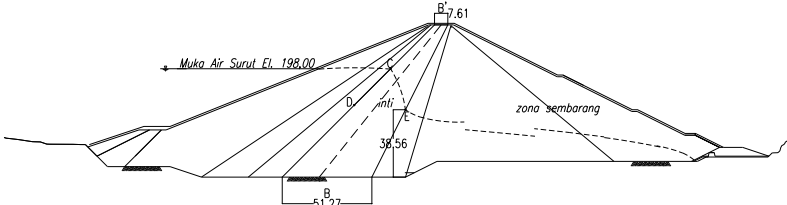
Dari penggambaran koordinat garis depresi tersebut kemudian didapatkan formasi garis depresi seperti pada Gambar 5.40.



Gambar 5. 40 Garis depresi pada bendungan dengan inti miring, kondisi muka air banjir

5.2.2.3 Kondisi muka air surut tiba-tiba

Penggambaran pola aliran rembesan berikutnya adalah pada tubuh bendungan dengan inti miring dengan kondisi muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*). Gambar 5.42 merupakan gambaran data yang dibutuhkan untuk menggambar garis depresi pada tubuh bendungan inti miring pada kondisi *rapid draw down*. Berikut perhitungan garis depresinya:



Gambar 5. 41 Data yang diperlukan untuk menggambarkan garis depresi pada tubuh bendungan

- Garis depresi pada zona sembarang

$$B' = 7.61 \text{ m}$$

$$B = 51.27 \text{ m}$$

$$\frac{B + B'}{2} = 29.44 \text{ m}$$

$$y_0 = 38.56 \text{ m}$$

$$k_1 = 0.0000001$$

$$k_2 = 0.000002$$

$$h_2 = \left(\frac{k_1}{k_2}\right) y_0$$

$$= 1.928 \text{ m}$$

Persamaan parabola bentuk dasar:

$$y = \sqrt{2h_2x + h_2^2}$$

$$y = \sqrt{3.86x + 1.928^2}$$

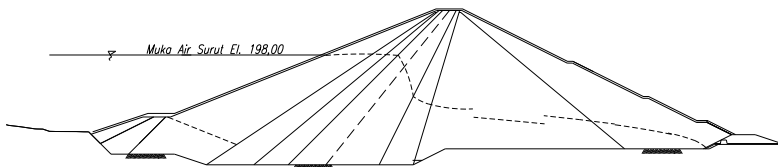
Dari persamaan parabola yang didapatkan, kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai koordinat x dan y, seperti pada Tabel 5.15. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk permukaan air keluar pada sudut 81° .

Tabel 5. 15 Koordinat garis depresi pada inti miring

x (m)	-0.96	0	5	10	15	20	25	50
y (m)	0	1.93	4.80	6.50	7.85	8.99	10.01	14.02

x(m)	70	90	110	130	140	150
y(m)	16.54	18.73	20.69	22.47	23.31	24.13

Selanjutnya, koordinat yang diperoleh dari persamaan parabola dasar digambarkan pada tubuh bendungan. Garis aliran digambarkan sebagai garis putus-putus yang menuju saluran drainase seperti pada Gambar 5.42.



Gambar 5. 42 Garis depresi pada bendungan dengan inti miring, kondisi muka air surut tiba-tiba.

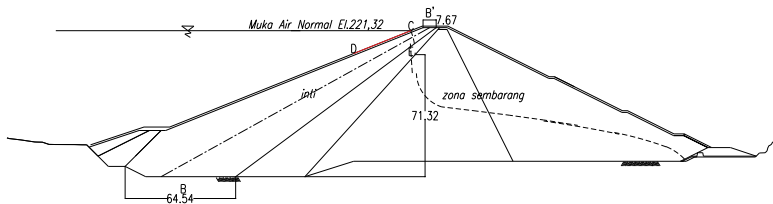
5.2.3 Bendungan tipe urugan zonal dengan inti tirai

Selain bendungan inti tegak dan inti miring, beberapa bendungan di Indonesia juga menggunakan inti tirai dalam

perencanaan bendungannya. Untuk itu, berdasarkan pendekatan yang dilakukan oleh Cassagrande terhadap garis depresi pada inti tirai penulis akan menggambarkan garis depresi pada penelitian ini. Garis depresi yang akan digambarkan ditinjau dari tiga kondisi muka air *upstream*, yaitu pada saat muka air banjir (MAB), muka air normal (MAN) dan ketika muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*).

5.2.3.1 Kondisi muka air normal

Penggambaran pola aliran rembesan pada tubuh bendungan dengan inti tirai menggunakan metode Casagrande berbeda dengan penggambaran pola aliran rembesan tubuh bendungan inti tegak dan inti miring, yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya. Gambar 5.44 merupakan cara memperoleh data perhitungan untuk menggambar garis depresi. Berikut merupakan perhitungan garis depresi pada tubuh bendungan dengan inti miring pada kondisi muka air normal.



Gambar 5. 43 Data yang diperlukan untuk menggambar garis depresi

- Garis depresi pada zona sembarang

$$B' = 7.67 \text{ m}$$

$$B = 64.54 \text{ m}$$

$$\frac{B + B'}{2} = 36.11 \text{ m}$$

$$y_0 = 71.32 \text{ m}$$

$$k_1 = 0.0000001$$

$$k_2 = 0.0000002$$

$$h_2 = \left(\frac{k_1}{k_2}\right) y_0 = 3.566 \text{ m}$$

Persamaan parabola bentuk dasar:

$$y = \sqrt{2h_2x + h_2^2}$$

$$y = \sqrt{7.132x + 3.566^2}$$

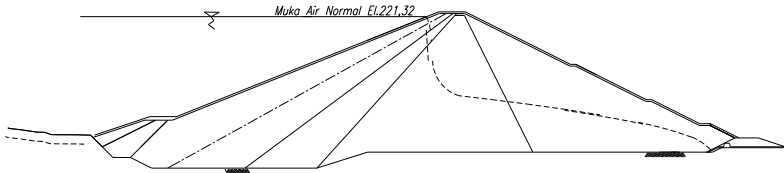
Dari persamaan parabola yang didapatkan, kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai koordinat x dan y, seperti pada Tabel 5.16. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk permukaan air keluar pada sudut 81°.

Tabel 5. 16 Koordinat garis depresi tubuh bendungan inti tirai

x (m)	-1.78	0	5	10	15	20	25	40
y (m)	0	3.57	6.96	9.18	10.94	12.46	13.82	17.26

x(m)	60	80	100	120	140	160	180
y(m)	20.99	24.15	26.94	29.47	31.8	33.97	36.01

Hasil perhitungan persamaan parabola berupa nilai koordinat X dan Y kemudian digambarkan pada tubuh bendungan. Penggambaran koordinat garis depresi ditunjukkan sebagai garis putus-putus seperti pada Gambar 5.44.

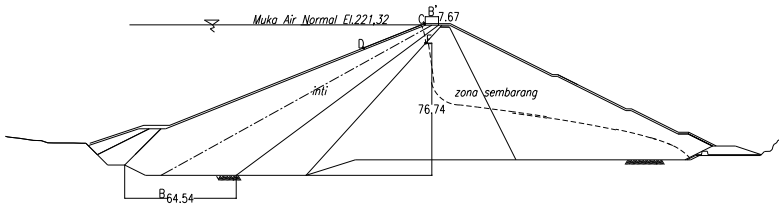


Gambar 5. 44 Garis depresi pada bendungan dengan inti tirai, kondisi muka air normal.

5.2.3.2 Kondisi muka air banjir

Pola aliran rembesan yang ke dua adalah pola aliran pada tubuh bendungan dengan inti tirai dengan kondisi muka air banjir. Gambar 5.45 merupakan gambaran sketsa tubuh bendungan yang

menunjukkan data perhitungan untuk menghitung garis depresi. Berikut merupakan perhitungan garis depresinya:



Gambar 5. 45 Data yang dibutuhkan untuk penggambaran garis depresi

- Garis depresi pada zona sembarang

$$B' = 7.67 \text{ m}$$

$$B = 64.54 \text{ m}$$

$$\frac{B + B'}{2} = 36.11 \text{ m}$$

$$y_0 = 76.74 \text{ m}$$

$$k_1 = 0.0000001$$

$$k_2 = 0.000002$$

$$h_2 = \left(\frac{k_1}{k_2}\right) y_0$$

$$= 3.837 \text{ m}$$

Persamaan parabola bentuk dasar:

$$y = \sqrt{2h_2x + h_2^2}$$

$$y = \sqrt{7.674x + 3.837^2}$$

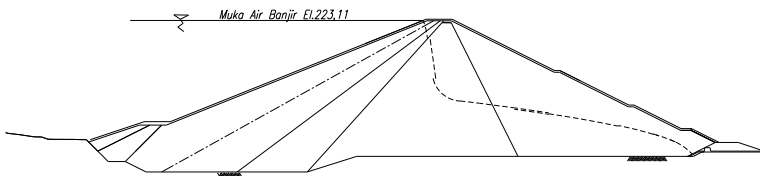
Dari persamaan parabola yang didapatkan, kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai koordinat x dan y, seperti pada Tabel 5.17. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk permukaan air keluar pada sudut 81° .

Tabel 5. 17 Koordinat garis depresi pada bendungan inti tirai

x (m)	-1.92	0	5	10	15	20	25
y (m)	0	3.84	7.29	9.57	11.39	12.97	14.37

x(m)	40	60	80	100	120	130
y(m)	17.94	21.8	25.07	27.97	30.59	31.82

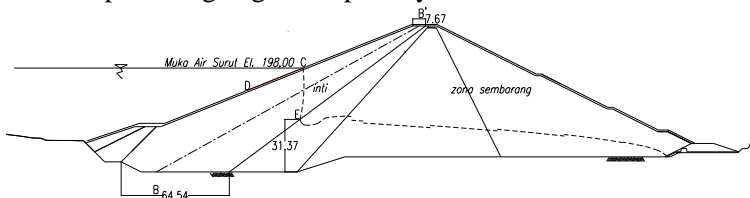
Hasil perhitungan persamaan parabola diperoleh nilai koordinat X dan Y yang selanjutnya digambarkan pada tubuh bendungan. Penggambaran koordinat garis depresi menunjukkan pola aliran pada tubuh bendungan. Pola aliran tersebut ditunjukkan dengan garis putus-putus yang menuju saluran drainase seperti pada Gambar 5.46.



Gambar 5. 46 Garis depresi pada bendungan inti tirai, dengan kondisi muka air banjir

5.2.3.3 Kondisi muka air surut tiba-tiba

Penggambaran pola aliran rembesan berikutnya adalah pada tubuh bendungan dengan inti miring dengan kondisi muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*). Gambar 5.48 merupakan gambaran data yang dibutuhkan untuk menggambar garis depresi pada tubuh bendungan inti miring pada kondisi *rapid draw down*. Berikut perhitungan garis depresinya:



Gambar 5. 47 Data yang diperlukan untuk menggambar garis depresi pada tubuh bendungan

- Garis depresi pada zona sembarang

$$B' = 7.67 \text{ m}$$

$$B = 64.54 \text{ m}$$

$$\frac{B + B'}{2} = 36.11 \text{ m}$$

$$y_0 = 31.37 \text{ m}$$

$$k_1 = 0.0000001$$

$$k_2 = 0.000002$$

$$h_2 = \left(\frac{k_1}{k_2}\right) y_0$$

$$= 1.569 \text{ m}$$

Persamaan parabola bentuk dasar:

$$y = \sqrt{2h_2x + h_2^2}$$

$$y = \sqrt{3.137x + 1.569^2}$$

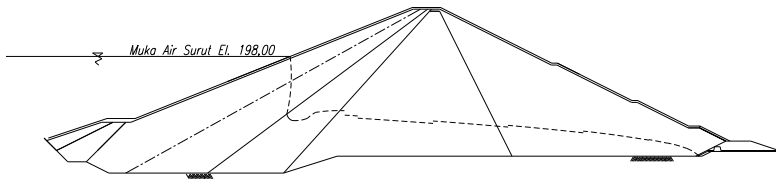
Dari persamaan parabola yang didapatkan, kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai koordinat x dan y, seperti pada Tabel 5.18. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk permukaan air keluar pada sudut 81° .

Tabel 5. 18 Koordinat garis depresi pada bendungan inti tirai

x (m)	-0.96	0	5	10	15	20	25	50
y (m)	0	1.93	4.80	6.50	7.85	8.99	10.01	14.02

x(m)	70	90	110	130	140	150
y(m)	16.54	18.73	20.69	22.47	23.31	24.13

Koordinat X dan Y yang diperoleh dari persamaan parabola dasar dapat digambarkan seperti pada Gambar 5.42. Garis depresi digambarkan sebagai garis putus-putus yang merupakan pola aliran rembesan yang melewati inti kedap menuju saluran drainase.



Gambar 5. 48 Gambar garis depresi pada tubuh bendungan, kondisi muka air surut tiba-tiba

5.3 Perhitungan Laju Rembesan

Bendungan sebagai bangunan yang berfungsi menahan atau menampung air harus mampu mempertahankan diri terhadap gaya-gaya yang ditimbulkan oleh adanya rembesan. Berbagai metode dikembangkan untuk mengetahui besarnya debit air yang mampu melewati tubuh bendungan hingga menyebabkan kerusakan. Pada penelitian ini penulis mencoba melakukan perhitungan untuk mendapatkan besarnya debit rembesan yang melalui tubuh bendungan menggunakan Rumus Darcy.

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan, para ilmuwan melakukan pengembangan terhadap Rumus Darcy hingga diperoleh berbagai pendekatan berdasarkan kondisi muka air maupun material yang menyusun suatu konstruksi timbunan tanah. Pada penelitian ini, akan dilakukan perhitungan debit rembesan terhadap dua tipe bendungan yaitu bendungan tipe urugan zonal dan bendungan tipe urugan membran.

5.3.1 Bendungan tipe urugan zonal

Perhitungan debit rembesan pada bendungan tipe urugan zonal dengan Rumus Darcy ditinjau terhadap tiga variasi inti kedap air dan lima susunan material berbeda pada setiap variasi inti tersebut. Rumus Darcy memperkirakan besarnya kapasitas filtrasi yang mengalir melalui tubuh bendungan didasarkan pada jaringan trayektori aliran filtrasi. Untuk itu, maka dilakukan pemodelan hasil perhitungan garis depresi pada Geo Studio SEEP/W, sehingga didapatkan jumlah garis ekuipotensial. Sedangkan untuk menentukan nilai k (koefisien filtrasi), diperlukan perhitungan k ekuivalensi berdasarkan susunan tanah yang direncanakan pada

tubuh bendungan. Berikut merupakan contoh perhitungan bendungan inti tegak pada kondisi muka air normal. Perhitungan selanjutnya akan disajikan dalam Tabel 5.19 dan Tabel 5.20.

$$k_z = \frac{L}{\frac{l_1}{k_1} + \frac{l_2}{k_2} + \frac{l_3}{k_3} + \frac{l_4}{k_4} + \frac{l_5}{k_5}}$$

$$= \frac{(80.3 + 77.3 + 77.3 + 82.8 + 82.7 + 82.7 + 73.3 + 73.3 + 77.3)}{\frac{80.3}{1} + \frac{77.3}{1} + \frac{77.3}{1} + \frac{82.8}{1} + \frac{82.7}{10^{-7}} + \frac{82.7}{1} + \frac{73.3}{1} + \frac{73.3}{1} + \frac{77.3}{1}}$$

$$= 8.553 \times 10^{-7}$$

Kemudian, untuk mendapatkan laju filtrasi, dilakukan perhitungan berikut:

$$Q_f = \frac{Nf}{Nd} \cdot K \cdot H \cdot L$$

$$Q_f = \frac{1}{6} \times 9 \times 10^{-7} \times 64 \times 1$$

$$Q_f = 9.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{detik}$$

Tabel 5. 19 Nilai K ekivalensi pada tiap variasi tubuh bendungan

No	Type Maindam	11	12	13	14	15	16	17	18	19	k1	k2	k3	k4	k5	kz
1	Inti Tegak 1															
	MAB	85.7	80	80	86.7	86.7	86.7	77.3	77.3	82.7	1	1	1	1	1E-07	8.6E-07
	MAN	80.3	77.3	77.3	82.7	82.7	82.7	73.3	73.3	77.3	1	1	1	1	1E-07	8.6E-07
	Rapid draw down	60.3	56	56	62.7	62.7	62.7	53.3	53.3	57.3	1	1	1	1	1E-07	8.4E-07
2	Inti Tegak 2															
	MAB	85.7	80	80	86.7	86.7	86.7	77.3	77.3	82.7	1.3	1.3	0.08	1	1E-05	8.6E-05
	MAN	80.3	77.3	77.3	82.7	82.7	82.7	73.3	73.3	77.3	1.3	1.3	0.08	1	1E-05	8.6E-05
	Rapid draw down	60.3	56	56	62.7	62.7	62.7	53.3	53.3	57.3	1.3	1.3	0.08	1	1E-05	8.4E-05
3	Inti Tegak 3															
	MAB	85.7	80	80	86.7	86.7	86.7	77.3	77.3	82.7	1.5	1.5	0.05	1	3E-08	2.5E-07
	MAN	80.3	77.3	77.3	82.7	82.7	82.7	73.3	73.3	77.3	1.5	1.5	0.05	1	3E-08	2.5E-07
	Rapid draw down	60.3	56	56	62.7	62.7	62.7	53.3	53.3	57.3	1.5	1.5	0.05	1	3E-08	2.4E-07
4	Inti Tegak 4															
	MAB	85.7	80	80	86.7	86.7	86.7	77.3	77.3	82.7	1.8	1.8	0.03	0.23	5E-06	4.3E-05
	MAN	80.3	77.3	77.3	82.7	82.7	82.7	73.3	73.3	77.3	1.8	1.8	0.03	0.23	5E-06	4.3E-05

No	Tipe Maindam	11	12	13	14	15	16	17	18	19	k1	k2	k3	k4	k5	kz
	Rapid draw down	60.3	56	56	62.7	62.7	62.7	53.3	53.3	57.3	1.8	1.8	0.03	0.23	5E-06	4.2E-05
5	Inti Tegak 5															
	MAB	85.7	80	80	86.7	86.7	86.7	77.3	77.3	82.7	2	2	0.01	0.52	4E-06	3.4E-05
	MAN	80.3	77.3	77.3	82.7	82.7	82.7	73.3	73.3	77.3	2	2	0.01	0.52	4E-06	3.4E-05
	Rapid draw down	60.3	56	56	62.7	62.7	62.7	53.3	53.3	57.3	2	2	0.01	0.52	4E-06	3.3E-05
6	Inti Miring 1															
	MAB	85.8	81.7	85.8	87	87	77.1	77.8	77.9	82.3	1	1	1	1	1E-07	8.5E-07
	MAN	81.3	77.1	83.1	83.1	83	83	73.8	73.9	78.1	1	1	1	1	1E-07	8.6E-07
	Rapid draw down	60.2	56	62	62	62	62	52.9	53	56.9	1	1	1	1	1E-07	8.5E-07
7	Inti Miring 2															
	MAB	85.8	81.7	85.8	87	87	77.1	77.8	77.9	82.3	1.3	1.3	0.08	1	1E-05	8.5E-05
	MAN	81.3	77.1	83.1	83.1	83	83	73.8	73.9	78.1	1.3	1.3	0.08	1	1E-05	8.6E-05
	Rapid draw down	60.2	56	62	62	62	62	52.9	53	56.9	1.3	1.3	0.08	1	1E-05	8.5E-05
8	Inti Miring 3															
	MAB	85.8	81.7	85.8	87	87	77.1	77.8	77.9	82.3	1.5	1.5	0.05	1	3E-08	2.5E-07

No	Type Maindam	11	12	13	14	15	16	17	18	19	k1	k2	k3	k4	k5	kz
	MAN	81.3	77.1	83.1	83.1	83	83	73.8	73.9	78.1	1.5	1.5	0.05	1	3E-08	2.5E-07
	Rapid draw down	60.2	56	62	62	62	62	52.9	53	56.9	1.5	1.5	0.05	1	3E-08	2.5E-07
9	Inti Miring 4															
	MAB	85.8	81.7	85.8	87	87	77.1	77.8	77.9	82.3	1.8	1.8	0.03	0.23	5E-06	4.3E-05
	MAN	81.3	77.1	83.1	83.1	83	83	73.8	73.9	78.1	1.8	1.8	0.03	0.23	5E-06	4.3E-05
	Rapid draw down	60.2	56	62	62	62	62	52.9	53	56.9	1.8	1.8	0.03	0.23	5E-06	4.2E-05
10	Inti Miring 5															
	MAB	85.8	81.7	85.8	87	87	77.1	77.8	77.9	82.3	2	2	0.01	0.52	4E-06	3.4E-05
	MAN	81.3	77.1	83.1	83.1	83	83	73.8	73.9	78.1	2	2	0.01	0.52	4E-06	3.4E-05
	Rapid draw down	60.2	56	62	62	62	62	52.9	53	56.9	2	2	0.01	0.52	4E-06	3.4E-05
11	Inti Tirai 1															
	MAB	85.5	87.1	87.1	76.9	78.1	82.7				1	1	1	1	1E-07	6.4E-07
	MAN	81.3	83	83	73.9	78.9	78.1				1	1	1	1	1E-07	6.1E-07
	Rapid draw down	60.5	62	62	52.8	52.7	56.9				1	1	1	1	1E-07	6.6E-07
12	Inti Tirai 2															

No	Type Maindam	11	12	13	14	15	16	17	18	19	k1	k2	k3	k4	k5	kz
	MAB	85.5	87.1	87.1	76.9	78.1	82.7				1.3	1.3	0.08	1	1E-05	6.4E-05
	MAN	81.3	83	83	73.9	78.9	78.1				1.3	1.3	0.08	1	1E-05	6.1E-05
	Rapid draw down	60.5	62	62	52.8	52.7	56.9				1.3	1.3	0.08	1	1E-05	6.6E-05
13	Inti Tirai 3															
	MAB	85.5	87.1	87.1	76.9	78.1	82.7				1.5	1.5	0.05	1	3E-08	1.8E-07
	MAN	81.3	83	83	73.9	78.9	78.1				1.5	1.5	0.05	1	3E-08	1.8E-07
	Rapid draw down	60.5	62	62	52.8	52.7	56.9				1.5	1.5	0.05	1	3E-08	1.9E-07
14	Inti Tirai 4															
	MAB	85.5	87.1	87.1	76.9	78.1	82.7				1.8	1.8	0.03	0.23	5E-06	3.2E-05
	MAN	81.3	83	83	73.9	78.9	78.1				1.8	1.8	0.03	0.23	5E-06	3E-05
	Rapid draw down	60.5	62	62	52.8	52.7	56.9				1.8	1.8	0.03	0.23	5E-06	3.3E-05
15	Inti Tirai 5															
	MAB	85.5	87.1	87.1	76.9	78.1	82.7				2	2	0.01	0.52	4E-06	2.5E-05
	MAN	81.3	83	83	73.9	78.9	78.1				2	2	0.01	0.52	4E-06	2.4E-05
	Rapid draw down	60.5	62	62	52.8	52.7	56.9				2	2	0.01	0.52	4E-06	2.6E-05

Tabel 5. 20 Debit rembesan pada tiap tipe bendungan

No	Tipe Maindam	Nf	Np	K	H	L	Qf (m ³ /s)
1	Inti Tegak 1						
	MAB	1	8	8.57E-07	69.33	1	7.43E-06
	MAN	1	6	8.55E-07	64	1	9.12E-06
	Rapid draw down	1	12	8.37E-07	44	1	3.07E-06
2	Inti Tegak 2						
	MAB	1	16	8.57E-05	69.33	1	3.71E-04
	MAN	1	15	8.55E-05	64	1	3.65E-04
	Rapid draw down	1	11	8.36E-05	44	1	3.35E-04
3	Inti Tegak 3						
	MAB	1	16	2.49E-07	69.33	1	1.08E-06
	MAN	1	15	2.48E-07	64	1	1.06E-06
	Rapid draw down	1	11	2.43E-07	44	1	9.71E-07
4	Inti Tegak 4						
	MAB	1	16	4.29E-05	69.33	1	1.86E-04
	MAN	1	15	4.27E-05	64	1	1.82E-04
	Rapid draw down	1	11	4.18E-05	44	1	1.67E-04
5	Inti Tegak 5						
	MAB	1	16	3.43E-05	69.33	1	1.48E-04
	MAN	1	15	3.42E-05	64	1	1.46E-04
	Rapid draw down	1	11	3.34E-05	44	1	1.34E-04
6	Inti Miring 1						
	MAB	1	7	8.53E-07	68.57	1	8.36E-06
	MAN	1	6	8.63E-07	64.31	1	9.25E-06
	Rapid draw down	1	16	8.5E-07	43.25	1	2.30E-06
7	Inti Miring 2						
	MAB	1	6	8.53E-05	68.77	1	9.78E-04

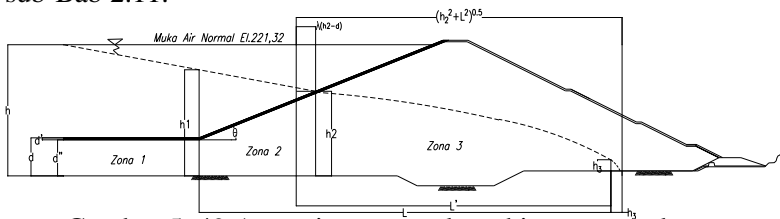
No	Type Maidam	Nf	Np	K	H	L	Qf (m ³ /s)
	MAN	1	5	8.63E-05	64.31	1	1.11E-03
	Rapid draw down	1	15	8.5E-05	43.25	1	2.45E-04
8	Inti Miring 3						
	MAB	1	6	2.47E-07	68.57	1	2.83E-06
	MAN	1	5	2.5E-07	64.31	1	3.22E-06
	Rapid draw down	1	11	2.46E-07	43.25	1	9.69E-07
9	Inti Miring 4						
	MAB	1	5	4.26E-05	68.57	1	5.85E-04
	MAN	1	5	4.31E-05	64.31	1	5.55E-04
	Rapid draw down	1	11	4.25E-05	43.25	1	1.67E-04
10	Inti Miring 5						
	MAB	1	7	3.41E-05	68.57	1	3.34E-04
	MAN	1	6	3.45E-05	64.31	1	3.70E-04
	Rapid draw down	1	13	3.4E-05	43.25	1	1.13E-04
11	Inti Tirai 1						
	MAB	1	12	6.37E-07	68.68	1	3.65E-06
	MAN	1	12	6.06E-07	64.33	1	3.25E-06
	Rapid draw down	1	8	6.58E-07	43.31	1	3.56E-06
12	Inti Tirai 2						
	MAB	1	9	6.37E-05	68.68	1	4.86E-04
	MAN	1	15	6.06E-05	64.33	1	2.60E-04
	Rapid draw down	1	11	6.58E-05	43.31	1	2.59E-04
13	Inti Tirai 3						
	MAB	1	16	1.85E-07	68.68	1	7.93E-07
	MAN	1	15	1.76E-07	64.33	1	7.54E-07
	Rapid draw down	1	11	1.91E-07	43.31	1	7.51E-07

No	Tipe Maindam	Nf	Np	K	H	L	Qf (m ³ /s)
14	Inti Tirai 4						
	MAB	1	17	3.18E-05	68.68	1	1.29E-04
	MAN	1	15	3.03E-05	64.33	1	1.30E-04
	Rapid draw down	1	11	3.29E-05	43.31	1	1.29E-04
15	Inti Tirai 5						
	MAB	1	16	2.55E-05	68.68	1	1.09E-04
	MAN	1	15	2.42E-05	64.33	1	1.04E-04
	Rapid draw down	1	11	2.63E-05	43.31	1	1.04E-04

5.3.2 Bendungan tipe urugan membran

Bendungan tipe urugan membran yaitu, bendungan yang bagian hulunya dilapisi membran kedap air. Membran yang dimaksud atau lapisan kedap air yang biasanya digunakan adalah lapisan beton aspal atau lapisan beton dengan ketebalan sesuai dengan yang disyaratkan. Penjelasan lain terkait bendungan urugan tipe urugan membran bisa dilihat pada sub-bab 2.6.3.

Meski terlihat memiliki pori-pori yang sangat kecil, lapisan beton aspal maupun lapisan beton bisa ditembus oleh aliran air. Untuk itu, penulis melakukan perhitungan laju rembesan yang terjadi pada bendungan urugan tipe urugan membran menggunakan penurunan rumus Darcy dari hasil penelitian yang berjudul “*Analytical solution of earth dam with upstream blanket*” oleh Mohammed Abd El-Razek M. Rezk. Pada penelitian tersebut, tubuh bendungan dibagi menjadi tiga zona seperti pada Gambar 5.49. Untuk lebih jelasnya, penurunan rumus ini bisa dilihat pada sub-Bab 2.11.



Gambar 5. 49 Asumsi zona untuk perhitungan rembesan

5.3.2.1 Bendungan urugan dengan membran beton aspal

Berdasarkan SNI 8062-2015, tubuh bendungan yang dilindungi dengan membran beton aspal, biasanya tersusun dari urugan batu pecah bergradasi baik (*well graded*) atau urugan batu atau kerikil pasiran yang kemudian dipadatkan untuk memperkecil ruang pori dan meningkatkan berat volume. Pada perhitungan ini, penulis menggunakan nilai k (koefisien filtrasi) pasir sebesar 10^{-5} dari hasil penelitian sebelumnya yang berjudul "*The stability of slopes with negative pore water pressure*" (Fredlund D. G., 1995). Selanjutnya debit rembesan pada tubuh bendungan dengan membran pada bagian upstream, dapat dihitung sebagai berikut:

- Kondisi muka air normal

$$d = 23 \text{ m}$$

$$d' = 1.2 \text{ m}$$

$$d'' = 21.8 \text{ m}$$

$$h = 79.32 \text{ m}$$

$$h_1 = 64.17 \text{ m}$$

$$h_2 = 51.17 \text{ m}$$

$$\theta = 22^\circ$$

$$k = 0.00001 \text{ m/s}$$

$$L = 248.9 \text{ m}$$

$$L' = 190.2 \text{ m}$$

Zona 1

$$q = k \left(\frac{h - h_1}{d' + 1} \right) d - d'$$

$$q = 0.00001 \left(\frac{79.32 - 64.17}{1.2 + 1} \right) 23 - 1.2$$

$$q = 0.0015 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Zona 2

$$x = \frac{h_2 - d''}{\tan \theta}$$

$$x = \frac{51.17 - 21.8}{0.4040}$$

$$x = 72.693$$

$$q = \frac{k \tan\theta (h_1 - h_2)}{\ln d'' + x \tan\theta - \ln d''}$$

$$q = \frac{0.00001 \cdot 0.4040 (64.17 - 51.17)}{3.0819 + (72.69 \times 0.404) - 3.082}$$

$$q = 0.000002 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Zona 3

$$m = \cot\theta$$

$$m = 2.475$$

$$\lambda = \frac{m}{2m + 1}$$

$$\lambda = 0.416$$

$$\lambda(h_2 - d) = 11.718 \text{ m}$$

$$\sqrt{h_2^2 + L'^2} = 196.97 \text{ m}$$

$$L' = L + \left(\frac{h_2 - d''}{\lambda - \cot\theta} \right)$$

$$L' = 190.90 \text{ m} \sim \text{digunakan } 190.20 \text{ m}$$

$$h_3 = \sqrt{h_2^2 + L^2} - L'$$

$$h_3 = 6.7626$$

$$C = 1152 \left(\frac{d}{L} \right)^3 - 409.67 \left(\frac{d}{L} \right)^2 + 35.91 \left(\frac{d}{L} \right) + 1.8892$$

$$C = 2.5032$$

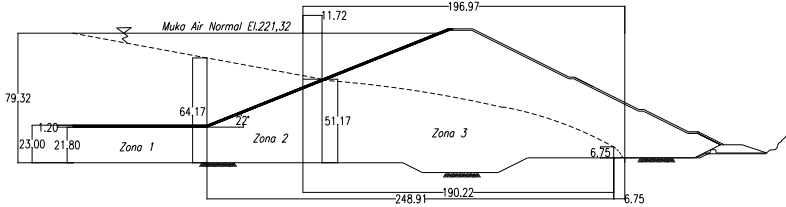
$$q = C \cdot k \sqrt{h_2^2 + L^2} - L'$$

$$q = 0.0002 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Maka, total laju filtrasi dari ketiga zona tersebut adalah

$$q = 1.67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Dari persamaan di atas, kemudian dibuat garis rembesan dengan menghubungkan titik h_1 , h_2 , dan h_3 sehingga diperoleh garis rembesan seperti pada Gambar 5.50.



Gambar 5. 50 Garis aliran filtrasi pada tubuh bendungan pada kondisi air normal

- Kondisi muka air banjir

$$d = 23 \text{ m}$$

$$d' = 1.2 \text{ m}$$

$$d'' = 21.8 \text{ m}$$

$$h = 81.31 \text{ m}$$

$$h_1 = 65.25 \text{ m}$$

$$h_2 = 52.15 \text{ m}$$

$$\theta = 22^\circ$$

$$k = 0.00001 \text{ m/s}$$

$$L = 248.9 \text{ m}$$

$$L' = 188.2 \text{ m}$$

Zona 1

$$q = k \left(\frac{h - h_1}{d' + 1} \right) d - d'$$

$$q = 0.00001 \left(\frac{81.31 - 65.25}{1.2 + 1} \right) 23 - 1.2$$

$$q = 0.002 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Zona 2

$$x = \frac{h_2 - d''}{\tan \theta}$$

$$x = \frac{52.15 - 21.8}{0.4040}$$

$$x = 75.12$$

$$q = \frac{k \tan \theta (h_1 - h_2)}{\ln d'' + x \tan \theta - \ln d''}$$

$$q = \frac{0.00001 \times 0.4040 (65.25 - 52.15)}{3.082 + (75.12 \times 0.404) - 3.082}$$

$$q = 0.000002 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Zona 3

$$m = \cot\theta$$

$$m = 2.475$$

$$\lambda = \frac{m}{2m + 1}$$

$$\lambda = 0.416$$

$$\lambda(h_2 - d) = 12.13 \text{ m}$$

$$\sqrt{h_2^2 + L'^2} = 195.3 \text{ m}$$

$$L' = L + \left(\frac{h_2 - d''}{\lambda - \cot\theta} \right)$$

$$L' = 188.9 \text{ m} \sim \text{digunakan } 188.20 \text{ m}$$

$$h_3 = \sqrt{h_2^2 + L^2} - L'$$

$$h_3 = 7.093$$

$$C = 1152 \left(\frac{d}{L} \right)^3 - 409.67 \left(\frac{d}{L} \right)^2 + 35.91 \left(\frac{d}{L} \right) + 1.8892$$

$$C = 2.5032$$

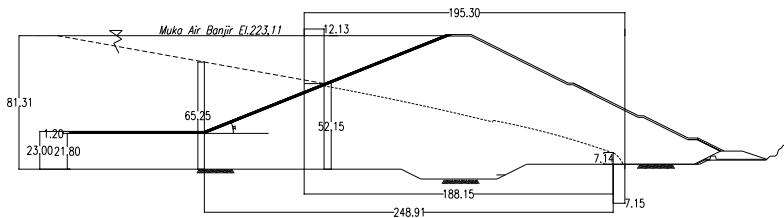
$$q = C \cdot k \sqrt{h_2^2 + L^2} - L'$$

$$q = 0.0002 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Maka, total laju filtrasi dari ketiga zona tersebut adalah

$$q = 1.77 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Dari persamaan di atas, kemudian dibuat garis rembesan dengan menghubungkan titik h_1 , h_2 , dan h_3 sehingga diperoleh garis rembesan seperti pada Gambar 5.51.



Gambar 5. 51 Garis aliran filtrasi pada tubuh bendungan, pada kondisi muka air banjir

- Kondisi muka air surut tiba-tiba

$$d = 23 \text{ m}$$

$$d' = 1.2 \text{ m}$$

$$d'' = 21.8 \text{ m}$$

$$h = 56 \text{ m}$$

$$h_1 = 46.57 \text{ m}$$

$$h_2 = 39.5 \text{ m}$$

$$\theta = 22^\circ$$

$$k = 0.00001 \text{ m/s}$$

$$L = 248.9 \text{ m}$$

$$L' = 214.52 \text{ m}$$

Zona 1

$$q = k \left(\frac{h - h_1}{d' + 1} \right) d - d'$$

$$q = 0.00001 \left(\frac{56.00 - 46.57}{1.2 + 1} \right) 23 - 1.2$$

$$q = 0.0009 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Zona 2

$$x = \frac{h_2 - d''}{\tan \theta}$$

$$x = \frac{39.5 - 21.8}{0.4040}$$

$$x = 43.81$$

$$x = 43.81$$

$$q = \frac{k \tan \theta (h_1 - h_2)}{\ln d'' + x \tan \theta - \ln d''}$$

$$q = \frac{0.00001 \times 0.4040 (46.57 - 39.5)}{3.082 + (43.81 \times 0.404) - 3.082}$$

$$q = 0.000002 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Zona 3

$$m = \cot\theta$$

$$m = 2.475$$

$$\lambda = \frac{m}{2m + 1}$$

$$\lambda = 0.416$$

$$\lambda(h_2 - d) = 6.863 \text{ m}$$

$$\sqrt{h_2^2 + L'^2} = 218.1 \text{ m}$$

$$L' = L + \left(\frac{h_2 - d''}{\lambda - \cot\theta} \right)$$

$$L' = 214.95 \text{ m} \sim \text{digunakan } 214.52 \text{ m}$$

$$h_3 = \sqrt{h_2^2 + L'^2} - L'$$

$$h_3 = 3.606 \text{ m}$$

$$C = 1152 \left(\frac{d}{L} \right)^3 - 409.67 \left(\frac{d}{L} \right)^2 + 35.91 \left(\frac{d}{L} \right) + 1.8892$$

$$C = 2.5031$$

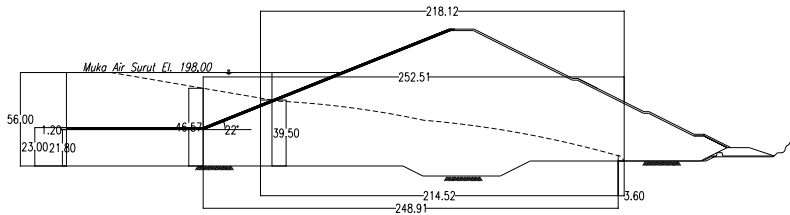
$$q = C \cdot k \sqrt{h_2^2 + L'^2} - L'$$

$$q = 0.00009 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Maka, total laju filtrasi dari ketiga zona tersebut adalah

$$q = 1.03 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Dari persamaan di atas, kemudian dibuat garis rembesan dengan menghubungkan titik h_1 , h_2 , dan h_3 sehingga diperoleh garis rembesan seperti pada Gambar 5.52.



Gambar 5. 52 Garis aliran filtrasi pada tubuh bendungan, pada kondisi muka air surut tiba-tiba

5.3.2.2 Bendungan urugan dengan membran beton

Berdasarkan SNI 8062-2015, tubuh bendungan yang dilindungi dengan membran beton susunan material tubuh bendungannya sama dengan tubuh bendungan yang dilindungi oleh membrane beton aspal. Kuat tekan beton didesain sesuai peraturan yang berlaku dan berdasarkan kualitas beton yang dipilih. Lapisan kedap air pada bendungan ini, berupa lempengan pelat beton berukuran 30 x 15 meter. Tebal membrane bervariasi tergantung pada tinggi tekanan air ($\text{tebal} = 0.3 + 0.003H$; H = tinggi air dalam meter). Pada perhitungan ini, penulis menggunakan nilai k (koefisien filtrasi) material penyusun tubuh bendungan berupa pasir sebesar 10^{-5} dari hasil penelitian sebelumnya yang berjudul *"The stability of slopes with negative pore water pressure"*. (Fredlund D. G., 1995) Selanjutnya debit rembesan pada tubuh bendungan dengan membran pada bagian upstream, dapat dihitung sebagai berikut:

- Kondisi muka air normal

$$d = 23 \text{ m}$$

$$d' = 0.45 \text{ m}$$

$$d'' = 22.55 \text{ m}$$

$$h = 79.30 \text{ m}$$

$$h_1 = 67.4 \text{ m}$$

$$h_2 = 52.55 \text{ m}$$

$$\theta = 22^\circ$$

$$k = 0.00001 \text{ m/s}$$

$$L = 248.8 \text{ m}$$

$$L' = 187.4 \text{ m}$$

Zona 1

$$q = k \left(\frac{h - h_1}{d' + 1} \right) d - d'$$

$$q = 0.00001 \left(\frac{79.30 - 67.40}{0.45 + 1} \right) 23 - 0.45$$

$$q = 0.00185 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Zona 2

$$x = \frac{h_2 - d''}{\tan \theta}$$

$$x = \frac{52.55 - 22.55}{0.4040}$$

$$x = 74.253$$

$$q = \frac{k \tan \theta (h_1 - h_2)}{\ln d'' + x \tan \theta - \ln d''}$$

$$q = \frac{0.00001 \cdot 0.4040 (67.40 - 52.55)}{3.1157 + (74.25 \times 0.404) - 3.1157}$$

$$q = 0.000002 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Zona 3

$$m = \cot \theta$$

$$m = 2.475$$

$$\lambda = \frac{m}{2m + 1}$$

$$\lambda = 0.416$$

$$\lambda(h_2 - d) = 12.292 \text{ m}$$

$$\sqrt{h_2^2 + L'^2} = 194.58 \text{ m}$$

$$L' = L + \left(\frac{h_2 - d''}{\lambda - \cot \theta} \right)$$

$$L' = 187.95 \text{ m} \sim \text{digunakan } 187.40 \text{ m}$$

$$h_3 = \sqrt{h_2^2 + L'^2} - L'$$

$$h_3 = 7.230$$

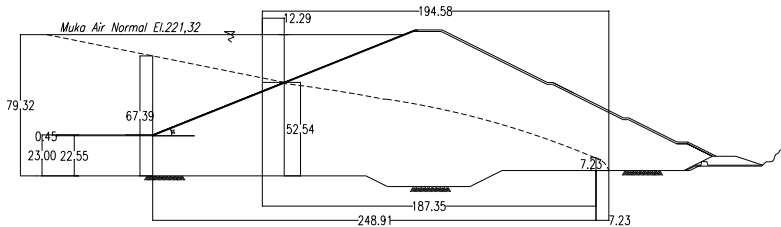
$$C = 1152 \left(\frac{d}{L} \right)^3 - 409.67 \left(\frac{d}{L} \right)^2 + 35.91 \left(\frac{d}{L} \right) + 1.8892$$

$$\begin{aligned}
 C &= 2.504 \\
 q &= C \cdot k \sqrt{h^2 + L^2} - L' \\
 q &= 0.0002 \text{ m}^3/\text{dtk}
 \end{aligned}$$

Maka, total laju filtrasi dari ketiga zona tersebut adalah

$$q = 2.03 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Dari persamaan di atas, kemudian dibuat garis rembesan dengan menghubungkan titik h_1 , h_2 , dan h_3 sehingga diperoleh garis rembesan seperti pada Gambar 5.53.



Gambar 5. 53 Garis aliran filtrasi pada tubuh bendungan, pada kondisi muka air normal

- Kondisi muka air banjir

$$\begin{aligned}
 d &= 23 \text{ m} \\
 d' &= 0.45 \text{ m} \\
 d'' &= 22.55 \text{ m} \\
 h &= 81.30 \text{ m} \\
 h_1 &= 65.25 \text{ m} \\
 h_2 &= 52.15 \text{ m} \\
 \theta &= 22^\circ \\
 k &= 0.00001 \text{ m/s} \\
 L &= 248.90 \text{ m} \\
 L' &= 188.10 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Zona 1

$$\begin{aligned}
 q &= k \left(\frac{h - h_1}{d' + 1} \right) d - d' \\
 q &= 0.00001 \left(\frac{81.30 - 65.25}{0.45 + 1} \right) 23 - 0.45 \\
 q &= 0.0025 \text{ m}^3/\text{dtk}
 \end{aligned}$$

Zona 2

$$x = \frac{h_2 - d''}{\tan \theta}$$

$$x = \frac{52.15 - 22.55}{0.4040}$$

$$x = 73.26$$

$$q = \frac{k \tan \theta (h_1 - h_2)}{\ln d'' + x \tan \theta - \ln d''}$$

$$q = \frac{0.00001 \cdot 0.4040 (65.25 - 52.15)}{3.116 + (74.26 \times 0.404) - 3.116}$$

$$q = 0.000002 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Zona 3

$$m = \cot \theta$$

$$m = 2.475$$

$$\lambda = \frac{m}{2m + 1}$$

$$\lambda = 0.416$$

$$\lambda(h_2 - d) = 12.13 \text{ m}$$

$$\sqrt{h_2^2 + L^2} = 195.20 \text{ m}$$

$$L' = L + \left(\frac{h_2 - d''}{\lambda - \cot \theta} \right)$$

$$L' = 188.90 \text{ m} \sim \text{digunakan } 188.10 \text{ m}$$

$$h_3 = \sqrt{h_2^2 + L^2} - L'$$

$$h_3 = 7.095$$

$$C = 1152 \left(\frac{d}{L} \right)^3 - 409.67 \left(\frac{d}{L} \right)^2 + 35.91 \left(\frac{d}{L} \right) + 1.8892$$

$$C = 2.503$$

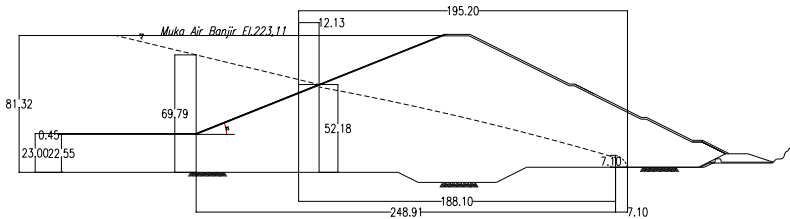
$$q = C \cdot k \sqrt{h_2^2 + L^2} - L'$$

$$q = 0.0002 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Maka, total laju filtrasi dari ketiga zona tersebut adalah

$$q = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Dari persamaan di atas, kemudian dibuat garis rembesan dengan menghubungkan titik h_1 , h_2 , dan h_3 sehingga diperoleh garis rembesan seperti pada Gambar 5.54.



Gambar 5. 54 Garis alir filtrasi pada tubuh bendungan, pada kondisi muka air banjir

- Kondisi muka air surut tiba-tiba

$$d = 23 \text{ m}$$

$$d' = 0.40 \text{ m}$$

$$d'' = 22.60 \text{ m}$$

$$h = 56.00 \text{ m}$$

$$h_1 = 46.10 \text{ m}$$

$$h_2 = 39.50 \text{ m}$$

$$\theta = 22^\circ$$

$$k = 0.00001 \text{ m/s}$$

$$L = 248.90 \text{ m}$$

$$L' = 214.52 \text{ m}$$

Zona 1

$$q = k \left(\frac{h - h_1}{d' + 1} \right) d - d'$$

$$q = 0.00001 \left(\frac{56.00 - 46.10}{0.40 + 1} \right) 23 - 0.40$$

$$q = 0.008 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Zona 2

$$x = \frac{h_2 - d''}{\tan \theta}$$

$$x = \frac{39.50 - 22.60}{0.4040}$$

$$x = 41.83$$

$$q = \frac{k \tan\theta (h_1 - h_2)}{\ln d'' + x \tan\theta - \ln d''}$$

$$q = \frac{0.00001 \cdot 0.4040 (46.10 - 39.50)}{3.118 + (41.83 \times 0.404) - 3.118}$$

$$q = 0.000008 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Zona 3

$$m = \cot\theta$$

$$m = 2.475$$

$$\lambda = \frac{m}{2m + 1}$$

$$\lambda = 0.416$$

$$\lambda(h_2 - d) = 6.863 \text{ m}$$

$$\sqrt{h_2^2 + L^2} = 218.10 \text{ m}$$

$$L' = L + \left(\frac{h_2 - d''}{\lambda - \cot\theta} \right)$$

$$L' = 214.95 \text{ m} \sim \text{digunakan } 214.52 \text{ m}$$

$$h_3 = \sqrt{h_2^2 + L^2} - L'$$

$$h_3 = 3.61 \text{ m}$$

$$C = 1152 \left(\frac{d}{L} \right)^3 - 409.67 \left(\frac{d}{L} \right)^2 + 35.91 \left(\frac{d}{L} \right) + 1.8892$$

$$C = 2.503$$

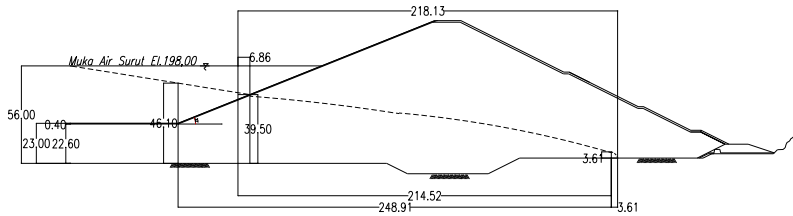
$$q = C \cdot k \sqrt{h_2^2 + L^2} - L'$$

$$q = 0.0005 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Maka, total laju filtrasi dari ketiga zona tersebut adalah

$$q = 8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Dari persamaan di atas, kemudian dibuat garis rembesan dengan menghubungkan titik h_1 , h_2 , dan h_3 sehingga diperoleh garis rembesan seperti pada Gambar 5.55.



Gambar 5. 55 Garis aliran filtrasi pada tubuh bendungan, pada kondisi muka air surut tiba-tiba

5.4 Perbandingan Hasil Perhitungan Secara Analitik dan Numerik

Rembesan air pada tubuh bendungan adalah salah satu penyebab kegagalan konstruksi pada tubuh bendungan. Oleh karena itu, pada penelitian ini penulis membuat beberapa alternatif desain sekaligus menghitung laju rembesan baik dengan Geo Studio SEEP/W maupun dengan perhitungan manual menggunakan rumus Darcy.

Berdasarkan perhitungan yang sudah dilakukan pada sub-bab sebelumnya, didapatkan laju aliran rembesan pada tubuh bendungan zonal dengan inti tegak, inti miring dan inti tirai yang dihitung secara numerik dengan Geo Studio SEEP/W seperti pada Tabel 5.1, Tabel 5.2 dan Tabel 5.3. Sedangkan perhitungan laju rembesan pada tubuh bendungan zonal secara analitik dengan rumus Darcy, dapat dilihat pada Tabel 5.20. Kedua perhitungan tersebut menghasilkan laju rembesan dengan rata-rata selisih kurang dari $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Perbedaan hasil dari kedua metode perhitungan ini disebabkan karena pada perhitungan dengan Geo Studio SEEP/W pendekatan yang dilakukan oleh program adalah pendekatan dengan metode *finite element method* (FEM). Perhitungan laju rembesan dengan Geo Studio SEEP/W memerlukan data-data seperti data koefisien permeabilitas, data *saturated water content*, jenis tanah yang digunakan, data analisa butiran dan menentukan metode yang digunakan dalam mengestimasi perhitungan. Pada Geo Studio

SEEP/W terdapat dua metode yang digunakan untuk mengestimasi perhitungan di antaranya adalah metode Van Genuchten dan metode Fredlund and Xing. Sementara perhitungan dengan rumus Darcy hanya dilakukan dengan mengalikan variabel koefisien permeabilitas (k), gradient hidrolis (i) dan luas penampang yang dilalui aliran rembesan (A). Sehingga perhitungan laju rembesan menggunakan Geo Studio SEEP/W akan menghasilkan angka dengan perbandingan variable yang lebih detail.

BAB VI PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Dari uraian perhitungan laju rembesan pada tubuh bendungan secara analitik dan secara numerik pada bab-bab sebelumnya, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan kombinasi material yang telah dibuat (Table 4.5), susunan urugan tubuh bendungan yang mampu meminimalisir lajur rembesan dengan baik tersusun dari inti kedap air berbahan lempung (*clay*), dilindungi lapisan filter berbahan *light clay*, lapisan random berbahan tanah campur kerikil berlumpur, kerikil, pasir dan lempung, serta lapisan batu dengan batu berukuran 45-60 cm (Kombinasi 3). Kombinasi material tersebut menghasilkan laju rembesan paling kecil.
2. Debit rembesan yang dihasilkan dengan angka paling kecil pada tubuh bendungan urugan tipe urugan zonal berdasarkan variasi material penyusun tubuh bendungan ditinjau dari tiga kondisi inti kedap air yang dihitung menggunakan pendekatan numerik dengan Geo Studio SEEP/W adalah:
 - Pada bendungan inti tegak, laju rembesan paling kecil dihasilkan oleh bendungan dengan material inti *clay* dengan nilai pada kondisi muka air banjir (MAB)= $8.62 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$, kondisi muka air normal (MAN)= $8.28 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$, dan pada kondisi muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*)= $2.46 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$.
 - Pada bendungan inti miring, laju rembesan paling kecil dihasilkan oleh bendungan dengan material inti *clay* dengan nilai pada kondisi muka air banjir (MAB)= $7.78 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$, kondisi muka air normal (MAN)= $4.89 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$, dan pada kondisi muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*) = $1.94 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$.
 - Pada bendungan inti tirai, laju rembesan paling kecil dihasilkan oleh bendungan dengan material inti *clay* dengan nilai pada kondisi muka air banjir (MAB)= $1.60 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$, kondisi muka

air normal (MAN)= $1.56 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, dan pada kondisi muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*)= $7.21 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$.

3. Debit rembesan yang dihasilkan dengan angka paling kecil pada tubuh bendungan urugan tipe urugan zonal berdasarkan variasi tebal inti kedap air pada bendungan inti tegak yang dihitung menggunakan pendekatan numerik dengan Geo Studio SEEP/W adalah:
 - Pada bendungan dengan tebal inti kedap air 43.80m, laju rembesan paling kecil dihasilkan oleh bendungan dengan material inti *clay* dengan nilai pada kondisi muka air banjir (MAB)= $6.82 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, kondisi muka air normal (MAN) = $1.57 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, dan pada kondisi muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*)= $3.56 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Pada bendungan dengan tebal inti kedap air 63.80m yang dilindungi filter dengan tebal 6.3m pada sisi kiri dan kanan, laju rembesan paling kecil dihasilkan oleh bendungan dengan material inti *clay* dengan nilai pada kondisi muka air banjir (MAB)= $4.11 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, kondisi muka air normal (MAN) = $2.94 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, dan pada kondisi muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*)= $3.51 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$
 - Pada bendungan dengan tebal inti kedap air 34.04m filter dengan tebal 21.3m pada sisi kiri dan kanan, laju rembesan paling kecil dihasilkan oleh bendungan dengan material inti *clay* dengan nilai pada kondisi muka air banjir (MAB)= $3.89 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, kondisi muka air normal (MAN) = $3.75 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, dan pada kondisi muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*)= $2.18 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.
4. Perhitungan secara analitik laju rembesan pada tubuh bendungan urugan membran dan tubuh bendungan urugan zonal menggunakan penurunan rumus Darcy dihasilkan debit laju rembesan sebagai berikut:
 - Bendungan membran
 - Pada bendungan membran beton aspal, laju rembesan yang dihasilkan pada kondisi muka air banjir (MAB)= $1.67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, kondisi muka air normal (MAN)= $1.77 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, dan

- pada kondisi muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*) = $1.03 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.
- Pada bendungan membran beton, laju rembesan yang dihasilkan pada kondisi muka air banjir (MAB)= $2.03 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, kondisi muka air normal (MAN)= $3.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, dan pada kondisi muka air surut tiba-tiba (*rapid draw down*) = $8.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Perhitungan secara analitik terhadap tubuh bendungan urugan menggunakan rumus Darcy menunjukkan debit rembesan seperti pada Tabel 5.17, sehingga menghasilkan debit terkecil sebagai berikut:
 - Pemodelan inti tegak1 = $8.6 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Pemodelan inti miring1 = $8.5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Pemodelan inti tirai1 = $6.4 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$.
5. Dari semua pendekatan yang sudah dilakukan, maka tubuh bendungan tipe urugan zonal dengan inti miring, inti tegak dan inti tirai yang disusun dengan material inti berupa *clay* memiliki laju rembesan paling kecil ditinjau dari tiga kondisi muka air upstream.

6.2 Saran

Untuk menentukan desain tubuh bendungan terbaik, baik ditinjau dari segi ekonomi maupun ketahanan terhadap kelongsoran akibat rembesan, berbagai pendekatan dan modifikasi dengan tipe drainase maupun perkuatan lereng bisa dijadikan alternatif desain.

Halaman ini sengaja dikosongkan

Daftar Pustaka

- Al-Taie, S. K. (2006). Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) for Lime Treated Expansive Soil from Mosul City. *ASCE 2006 Univercity of New South Wales*, 12.
- Badan Standarisasi Nasional. (2015). *SNI 8062:2015 Tata Cara Desain Tubuh Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: Bdan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2016). *SNI 8065:2016 Metode Analisis dan Cara Mengendalikan Rembesan Air Untuk Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- D.G. Fredlund, A. X. (1999). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics*, 389-398.
- Das, B. M. (1985). *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik)*. Jakarta: Erlangga.
- Direktorat Jendral Pengairan. (1999). *Panduan Perencanaan Bendungan Urugan Volume III (Desain Pondasi dan Tubuh Bendungan)*. Jakarta: Badan Penerbit Pekerjaan Umum.
- Dirjen Pengairan. (1986). *Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan Utama KP-02*. Jakarta: Badan Penerbit Pekerjaan Umum.
- Fredlund, D. (1999). The Scope of unsaturated soil mechanics: An overview. *The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics*, 140-156.
- Fredlund, D. G. (1995). The stability of slopes with negative pore water pressures. *The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics*, 11.
- H. Rahardjo, D. F. (1999). Consolidation apparatus for testing unsaturated soils. *The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics*, 457-467.
- Ibrahim, K. M. (2014). Effect of Percentage of low plastic fines on the unsaturated shear strength of compacted gravel soil. *Ain Shams Engineering Journal*, 414-419.
- Interior, U. S. (1987). *Design of Small Dams*. United States: United States Departement of The Interior.

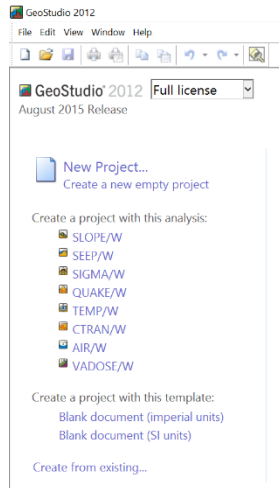
- Kementerian Pekerjaan Umum BBWS Bengawan Solo. (2010). *Laporan Akhir Pekerjaan Design Bendungan Bendo Kabupaten Ponorogo*. Malang: PT. Indra Karya.
- L. Lam, D. F. (1999). Transient seepage model for saturated-unsaturated soil system: A geotechnical engineering approach. *The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics*, 411-425.
- Qian Zhai, H. R. (2011). Determination of Soil-Water Characteristic Curve Variables. *Elsevier*, 7.
- Soedibyo. (2003). *Teknik Bendungan*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Sosrodarsono. (2002). *Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.

LAMPIRAN

Lampiran 1

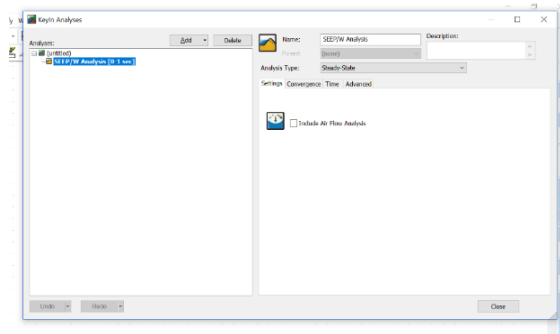
Berikut adalah langkah-langkah analisa laju rembesan (*seepage*) pada tubuh bendungan dengan Geo Studio SEEP/W:

1. Buka aplikasi GeoStudio



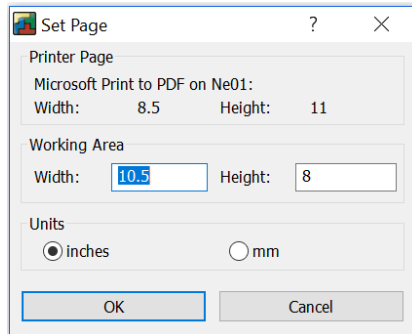
Gambar 1. Tampilan awal Geo Studio

2. Untuk membuat project baru, lakukan hal-hal berikut:



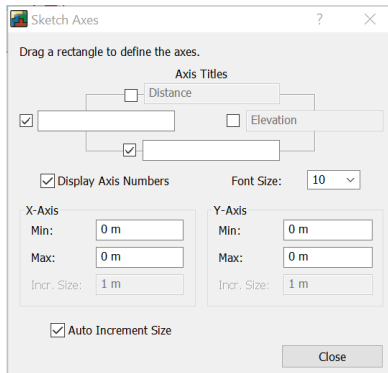
Gambar 2. Penentuan model analisis SEEP/W

- Klik New, kemudian klik SEEP/W untuk memodelkan rembesan.
 - Ketik nama project di kolom title, kemudian pilih Steady-State, lalu tutup untuk memulai.
3. Mengatur lembar kerja
- Panjang dan lebar lembar kerja dapat diatur dengan klik set > page



Gambar 3. Tampilan Set Page

- Untuk mendapatkan lembar kerja yang ideal, klik sketch > axes untuk mengatur sumbu x dan y, kemudian isi batasan maksimal dan minimal.

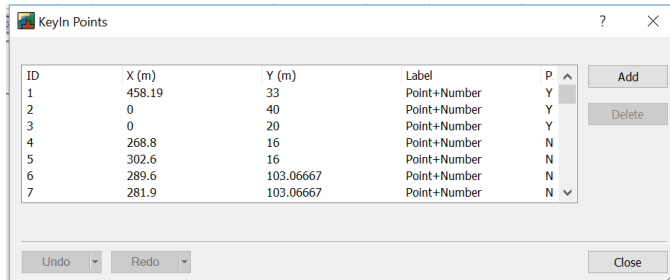


Gambar 4. Tampilan sketch axes

4. Menggambar object

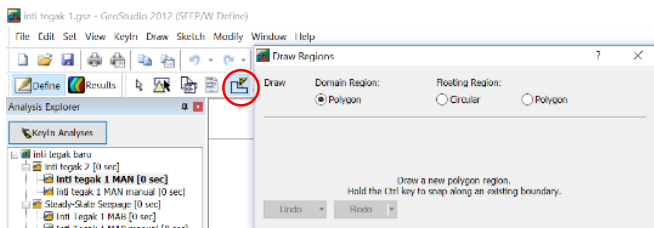
Object yang akan dimodelkan harus diketahui koordinatnya, sehingga dapat digambarkan dengan cara:

- Klik keyin > Points, kemudian tulis semua koordinat yang menggambarkan object yang akan dimodelkan

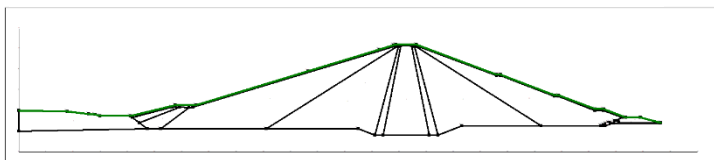


Gambar 5. Tampilan keyIn Points untuk menentukan titik rencana pemodelan

- Setelah semua titik tergambar, kemudian hubungkan tiap titik dengan klik draw > region atau klik icon pada lingkaran merah



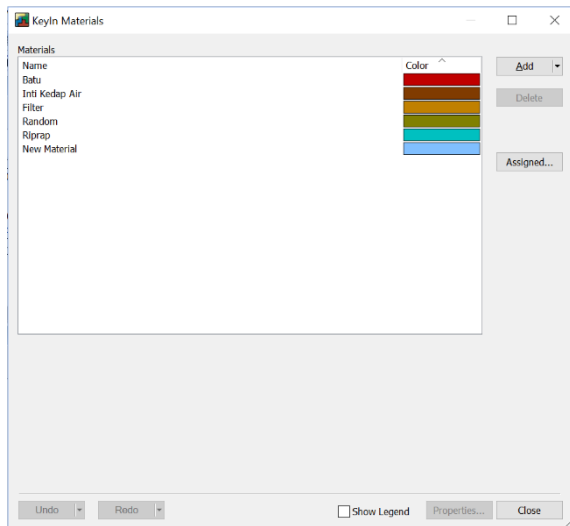
Gambar 6. Draw Region pada Geo Studio



Gambar 7. Hasil penggambaran region pada Geo Studio

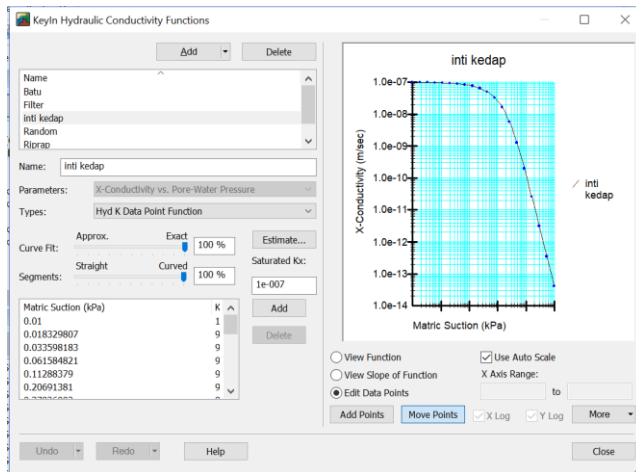
5. Memasukkan data material

- Setelah object tergambar, masukkan data material. Klik KeyIn > materials > add new material.
- Nama material disesuaikan dengan material yang datanya akan dimasukkan.
- Untuk tanah penyusun tubuh bendungan, menggunakan pilihan menu Saturated/ Unsaturated, sementara untuk tanah pondasi menggunakan Saturated Only.
- Nilai ky^3/kx^3 dan ratio disesuaikan dengan data yang ada.



Gambar 8. Perencanaan material pada KeyIn Material

- Klik [...] hydraulic conductivity, kemudian ubah nama material dan pilih Hyd K Data Point Function pada menu types. Selanjutnya klik estimate.

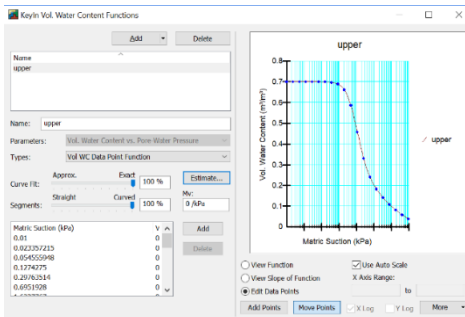


Gambar 9. Penentuan Hydraulic Conductivity Function

- Pilih metode estimasi (estimation method) sesuai dengan kebutuhan, isi kolom Saturated Kx dan Residual Water Content sesuai data yang tersedia.

Gambar 10. Estimate Hydraulic Conductivity Function

- Klik [...] pada Vol. Water Content Fn untuk menentukan jenis material tanah penyusun, untuk mengetahui kemampuannya meloloskan air. Klik add > types Vol. WC Data Point Function > estimate > pilih material dan nilai saturated WC, perhatikan pula suction rangenya sesuai data perencanaan.
- Ulangi tahapan input material untuk material lainnya. Data tiap material mungkin berbeda sesuai dengan jenis materialnya.

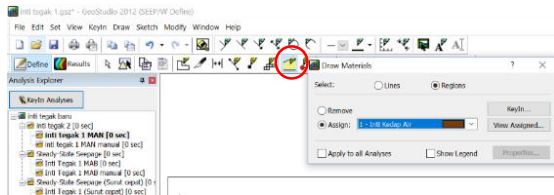


Gambar 11. KeyIn Vo. Water Content Function

Gambar 12. Estimate Vo. Water Content

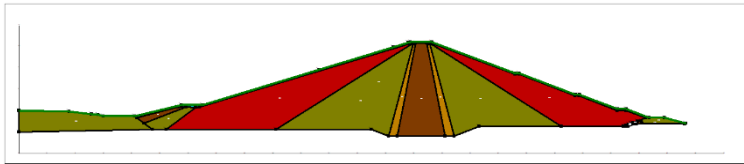
6. Material pada object

- Untuk menggambarkan material pada object yang sudah digambar, maka klik draw > materials > pilih material yang akan digambarkan > klik object. Atau bisa juga klik icon pada lingkaran merah.



Gambar 13. Menggambar material pada object

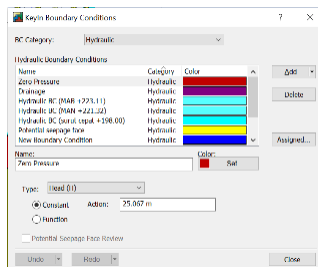
- Lakukan sampai tergambar semua material pada tubuh bendungan.



Gambar 14 Material sudah tergambar pada object

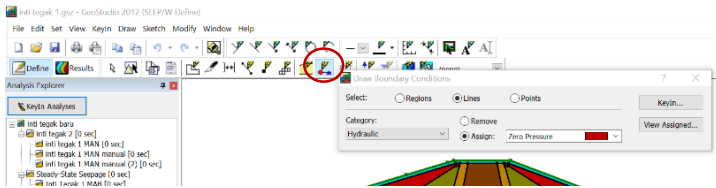
7. Membuat boundary condition

- Klik KeyIn>Boundary Conditions> Add New Hydraulic BC (MAB 10), kemudian pilih type Head, lalu isi pilihan Action dengan elevasi MAB.

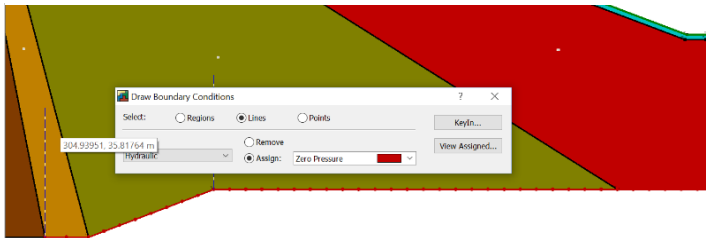


Gambar 15 Merencanakan boundary condition pada object

- Klik draw > boundary Codditions

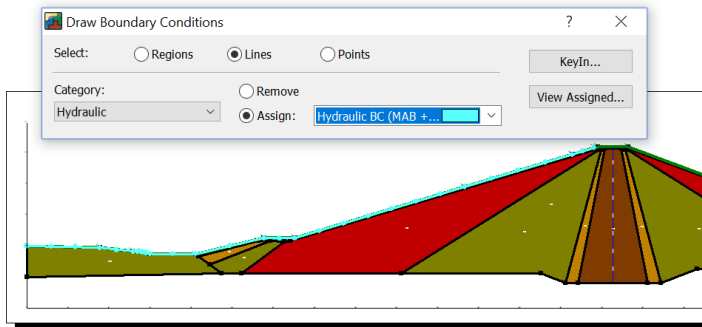


Gambar 17 Penggambaran boundary Condition pada object



Gambar 16 Boundary Condition (zero pressure) pada tubuh bendungan

- Ketinggian muka air upstream

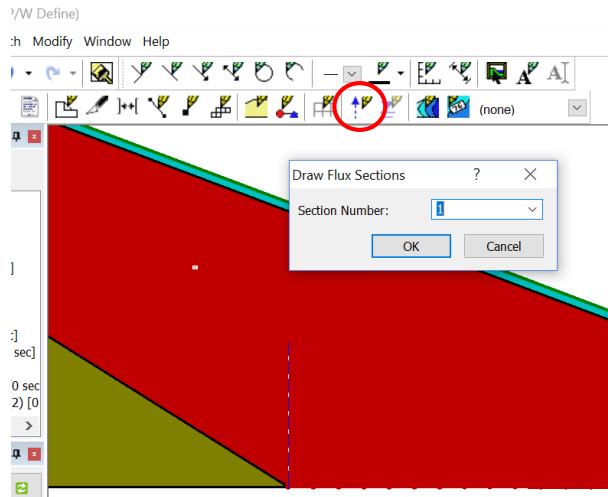


Gambar 18 Penggambaran kondisi muka air pada object

8. Membuat garis flux section

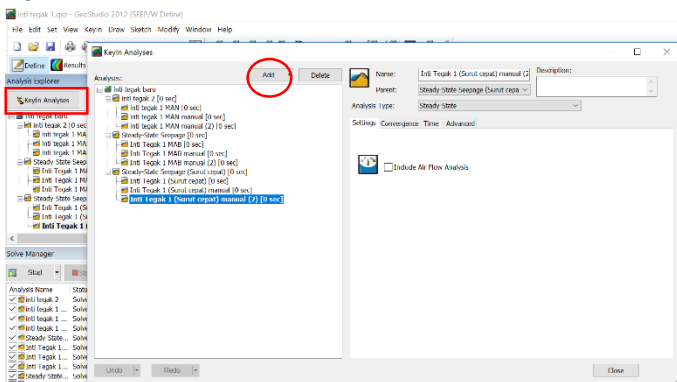
- Klik icon pada lingkaran merah atau Klik Draw> Flux Sections > isi section number. Jika Jika Flux section lebih dari satu, maka

section number diisi dengan nomer yang berbeda, agar membedakan dengan yang awal.



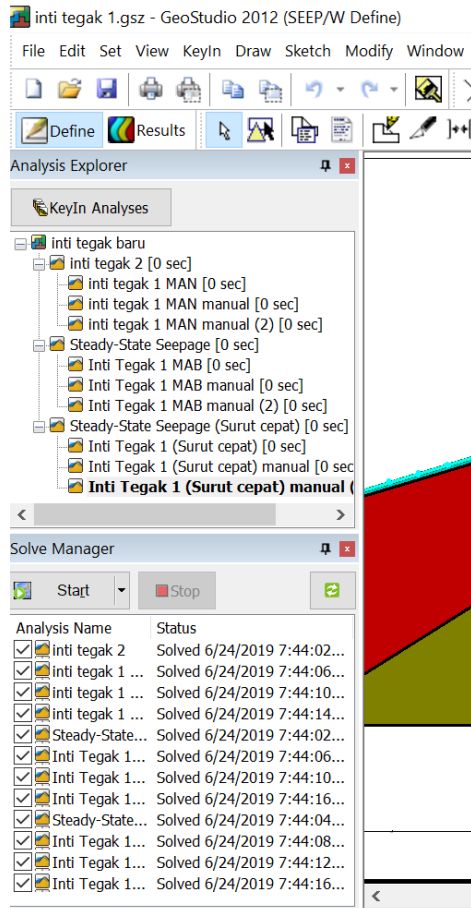
Gambar 19 Penggambaran garis flux pada object

9. Untuk menguji kondisi muka air upstream yang berbeda pada tubuh bendungan yang sama, klik KeyIn Analyses pada Analysis Explorer. Lalu klik add > clone sejumlah yang diinginkan.



Gambar 20 Cara Menduplikat pemodelan

10. Lakukan penyesuaian pada pemodelan yang lain sesuai dengan rencana muka air (diatur pada boundary condition), dan titik flux. Selanjutnya, klik kotak pada solve manager > start. Geo Studio SEEP/W akan merunning hasil dari pemodelan yang telah dilakukan.

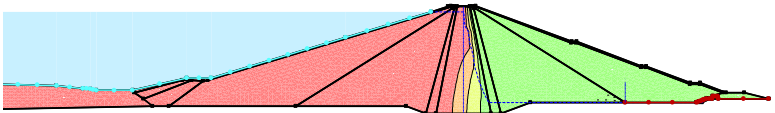


Gambar 21 Running Pemodelan

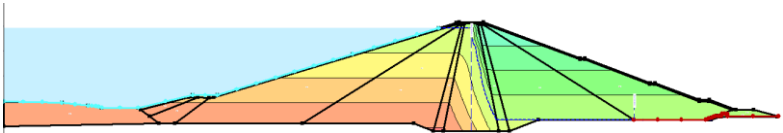
11. Setelah di *run* beberapa saat, akan muncul gambar seperti pada Gambar 23, Gambar 24 dan Gambar 25. Pada hasil *running* bisa dilihat garis aliran filtrasi, kontur berdasarkan *total head/ pore water pressure/ pressure head*. Ketiga kondisi tersebut bisa dilihat dengan mengubah kondisi seperti pada Gambar 22.



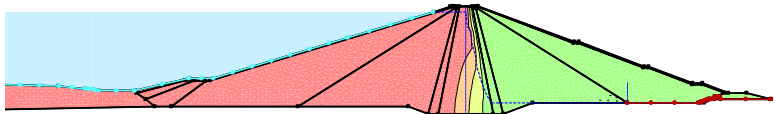
Gambar 22 Mengubah kondisi kontur tubuh bendungan setelah di *running*



Gambar 24 Hasil *running* dengan kondisi *pore-water pressure*



Gambar 23 Hasil *running* dengan kondisi *pressure head*

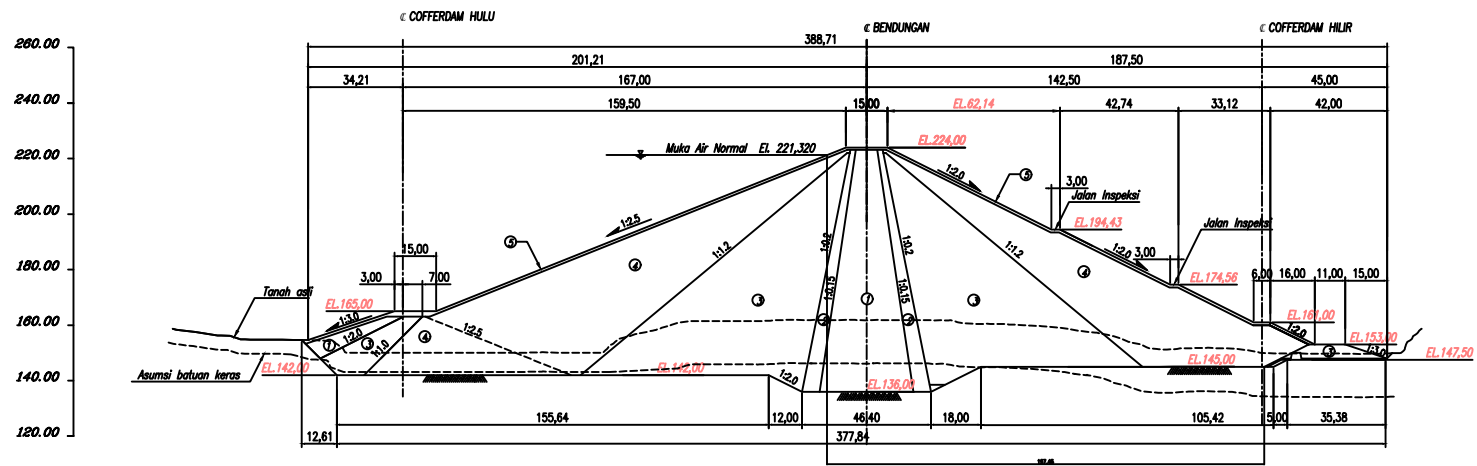


Gambar 25 Hasil *running* pada kondisi *total head*

BIODATA PENULIS

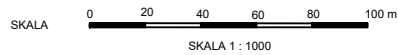


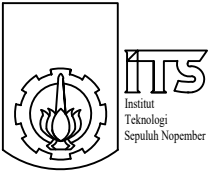
Penulis bernama lengkap Aria Khoirun Nisa' lahir di Tulungagung, 15 maret 1995 merupakan anak ke dua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Kartika IV-33 (Tulungagung), SDN Mergayu II (Tulungagung), SMP Negeri 1 Bandung (Tulungagung), SMA Negeri 1 Trenggalek (Trenggalek). Setelah lulus dari SMA Negeri 1 Trenggalek tahun 2013, Penulis mengikuti ujian masuk Perguruan Tinggi Negeri melalui SMITS dan diterima di D3 Teknik Sipil ITS pada tahun 2013. Setelah menyelesaikan pendidikan diploma pada tahun 2016, penulis melanjutkan pendidikan jenjang S1 melalui ujian masuk Lintas Jalur pada tahun 2017 dan terdaftar dengan NRP 03111745000026. Di Jurusan Teknik Sipil, Penulis mengambil Bidang Studi Hidroteknik. Penulis pernah aktif dalam beberapa kegiatan seminar, kepanitiaan, kepenulisan dan organisasi selama menjadi mahasiswa baik yang diadakan di tingkat Jurusan, Institut maupun kegiatan yang bersifat nasional. Bagi pembaca yang ingin menghubungi penulis, bisa melalui surat elektronik dengan alamat khoirunnisaria@gmail.com.

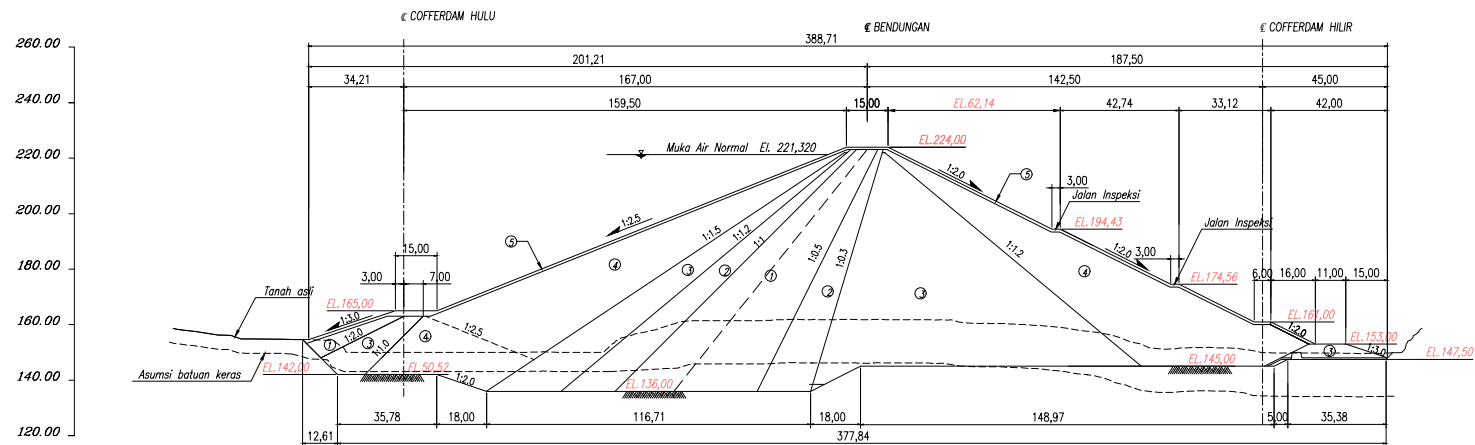


- LEGENDA**
- ① MATERIAL INTI (CLAY)
 - ② MATERIAL FILTER HALUS
 - ③ MATERIAL RANDOM (ZONA TRANSISI)
 - ④ MATERIAL ROCK / STONE
 - ⑤ RIP-RAP

POTONGAN MELINTANG STA. 9



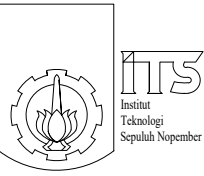
	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
	Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS	Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo	BENDUNGAN TIPE ZONA INTI TEGAK			Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT	Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)	1

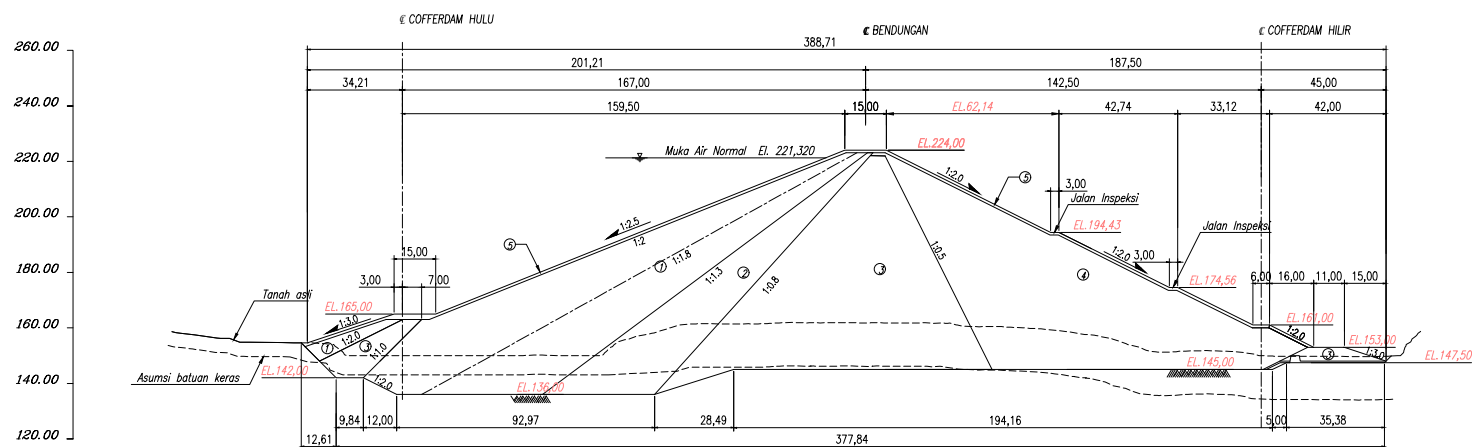


- L E G E N D A**
- ① MATERIAL INTI (CLAY)
 - ② MATERIAL FILTER HALUS
 - ③ MATERIAL RANDOM (ZONA TRANSISI)
 - ④ MATERIAL ROCK / STONE
 - ⑤ RIP-RAP

POTONGAN MELINTANG STA. 9

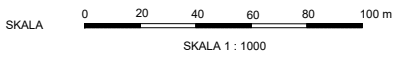


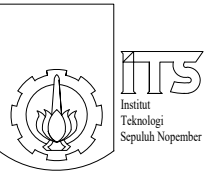
	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
	Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS	Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo	BENDUNGAN TIPE ZONA INTI MIRING		Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT	Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)	2	20

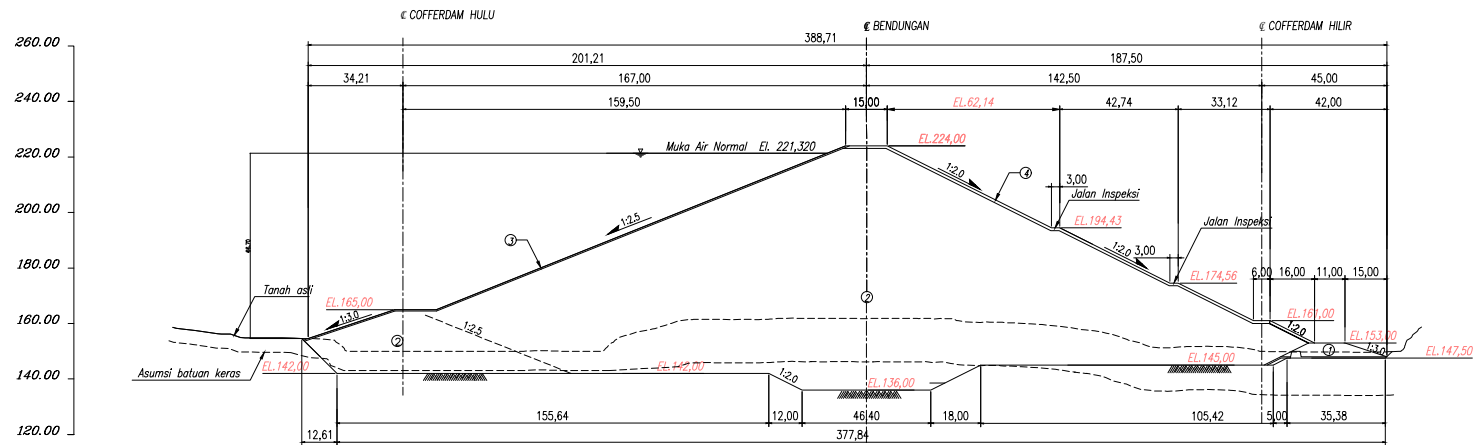


- LEGENDA**
- ① MATERIAL INTI (CLAY)
 - ② MATERIAL FILTER HALUS
 - ③ MATERIAL RANDOM (ZONA TRANSISI)
 - ④ MATERIAL ROCK / STONE
 - ⑤ RIP-RAP

POTONGAN MELINTANG STA. 9



	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
	Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS	Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo	BENDUNGAN TIPE ZONA INTI TIRAI			Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT	Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)	3



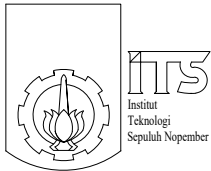
POTONGAN MELINTANG STA. 9

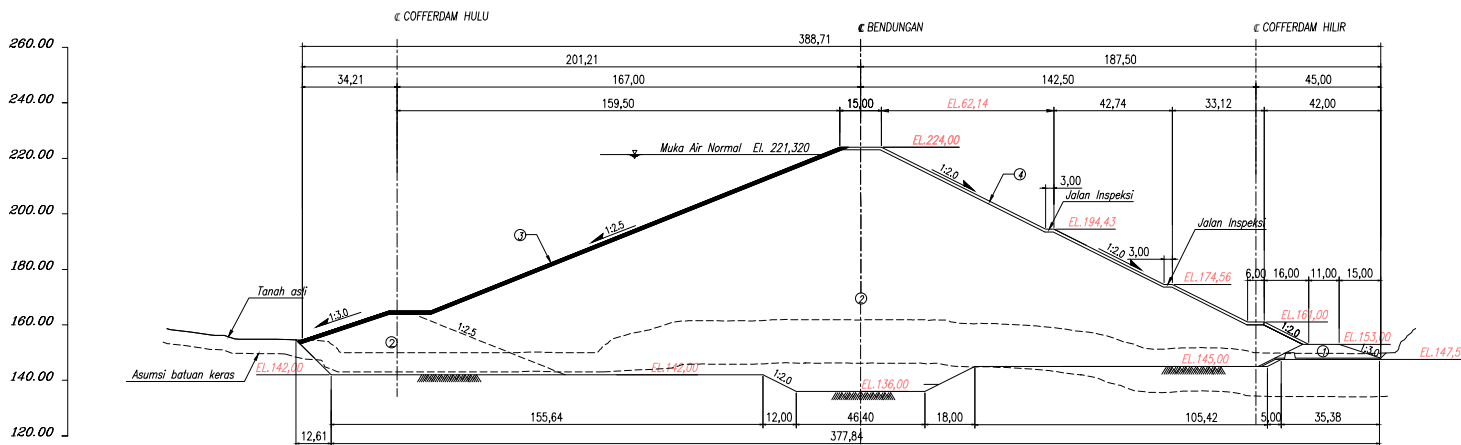
SKALA

 SKALA 1 : 1000

LEGENDA

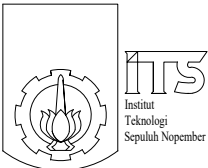
- ① MATERIAL RANDOM
- ② MATERIAL ROCK / STONE
- ③ MEMBRAN BETON ASPAL
- ④ RIP RAP

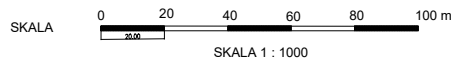
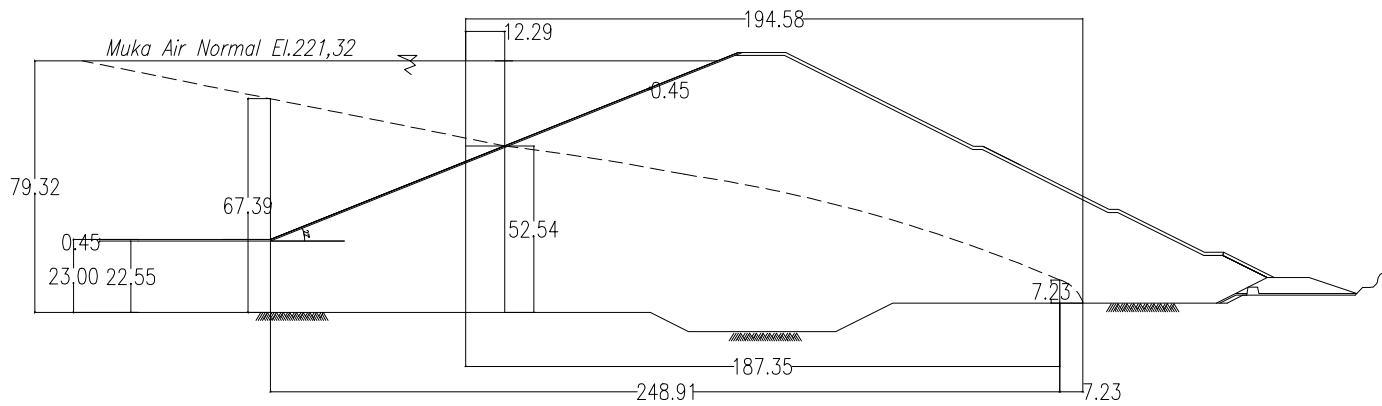
	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
	Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS	Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo	BENDUNGAN TIPE MEMBRAN BETON			Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT	Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)	4

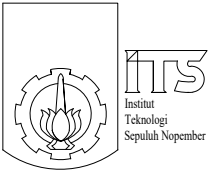


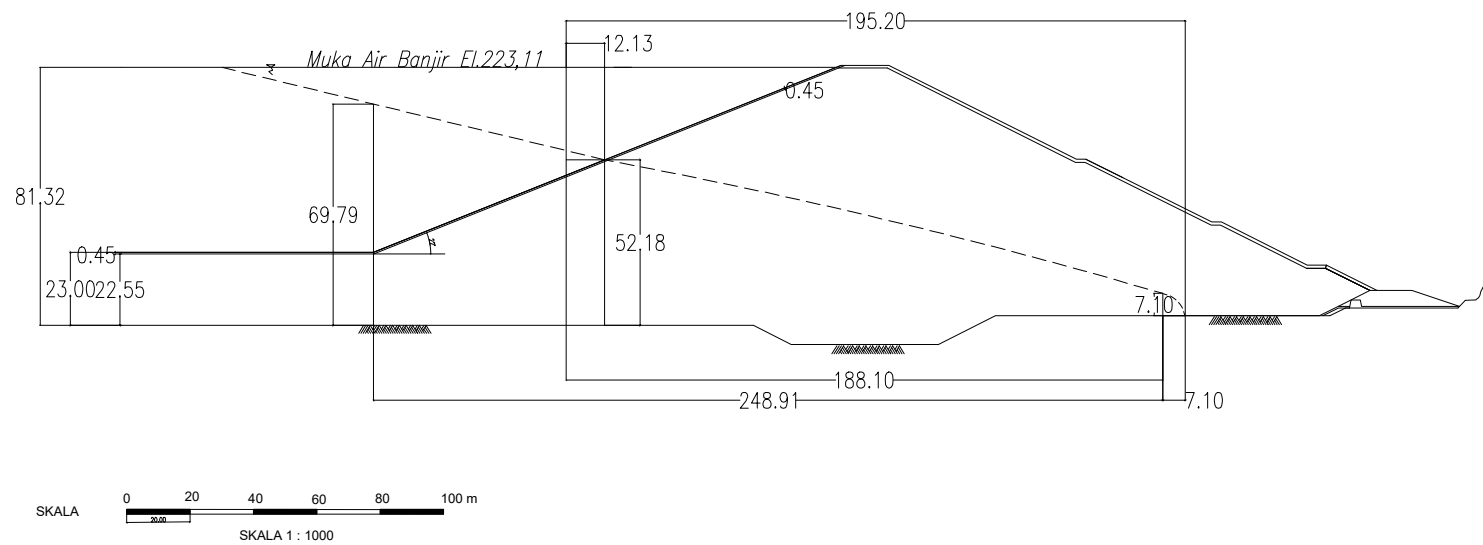
POTONGAN MELINTANG STA. 9

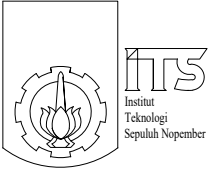
SKALA
 0 20 40 60 80 100 m
 SKALA 1 : 1000

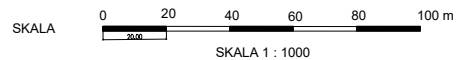
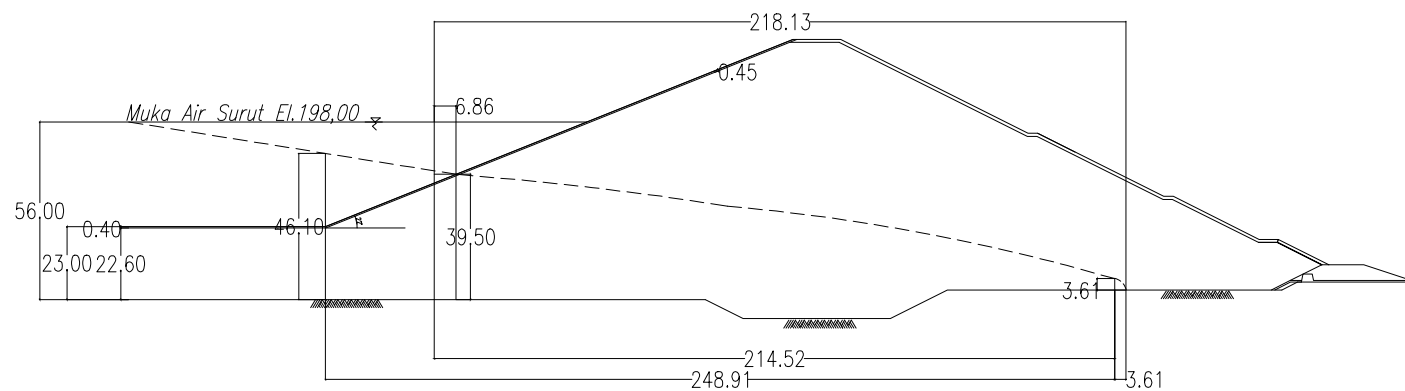
	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
	Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS	Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo	BENDUNGAN TIPE MEMBRAN BETON ASPAL		Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT	Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)	5	20

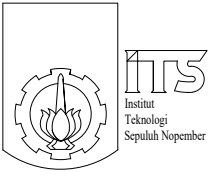


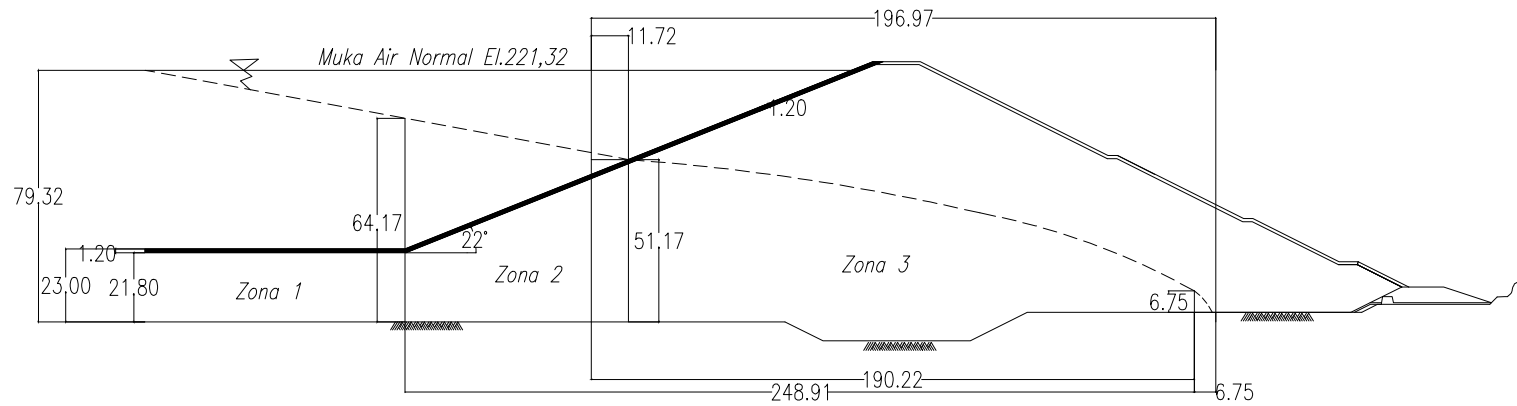
	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
 <p>Institut Teknologi Sepuluh Nopember</p>	<p>Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS</p>	<p>Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo</p>	<p>BENDUNGAN TIPE MEMBRAN BETON KONDISI MUKA AIR NORMAL (MAN)</p>		<p>Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT</p>	<p>Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)</p>	<p>6</p>	<p>20</p>

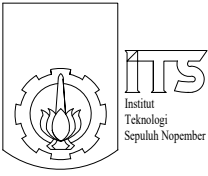


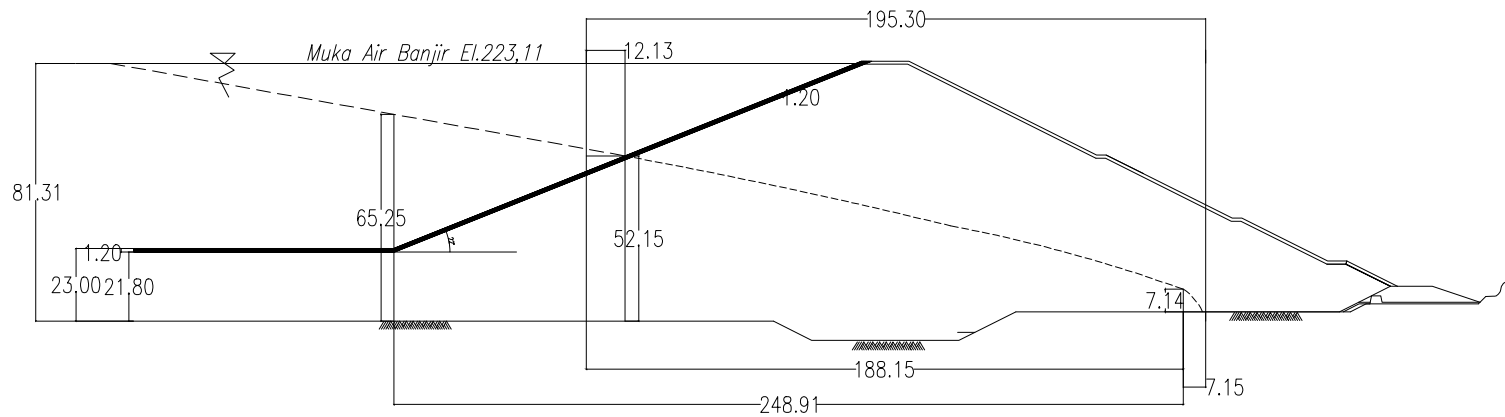
	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
 <p>Institut Teknologi Sepuluh Nopember</p>	<p>Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS</p>	<p>Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo</p>	<p>BENDUNGAN TIPE MEMBRAN BETON KONDISI MUKA AIR BANJIR (MAB)</p>		<p>Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT</p>	<p>Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)</p>	<p>7</p>	<p>20</p>

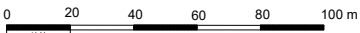


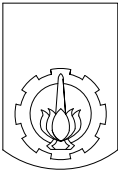
	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
 <p>Institut Teknologi Sepuluh Nopember</p>	<p>Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS</p>	<p>Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo</p>	<p>BENDUNGAN TIPE MEMBRAN BETON MUKA AIR SURUT TIBA-TIBA (<i>RAPID DRAW DOWN</i>)</p>		<p>Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT</p>	<p>Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)</p>	<p>8</p>	<p>20</p>

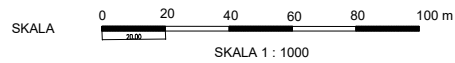
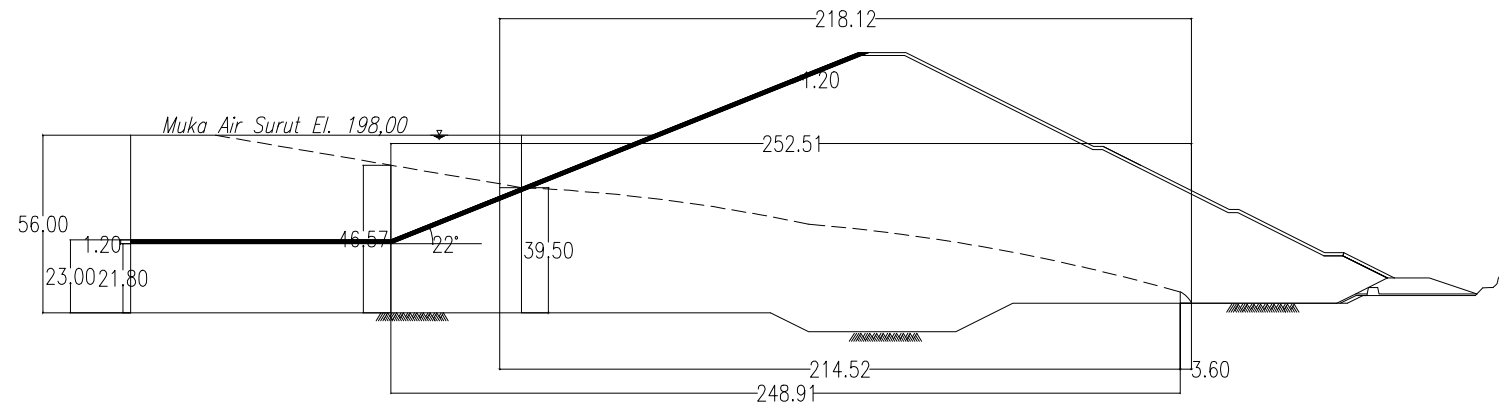


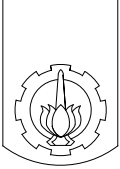
	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
 <p>Institut Teknologi Sepuluh Nopember</p>	<p>Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS</p>	<p>Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo</p>	<p>BENDUNGAN TIPE MEMBRAN BETON ASPAL KONDISI MUKA AIR NORMAL (MAN)</p>		<p>Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT</p>	<p>Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)</p>	<p>9</p>	<p>20</p>

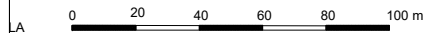
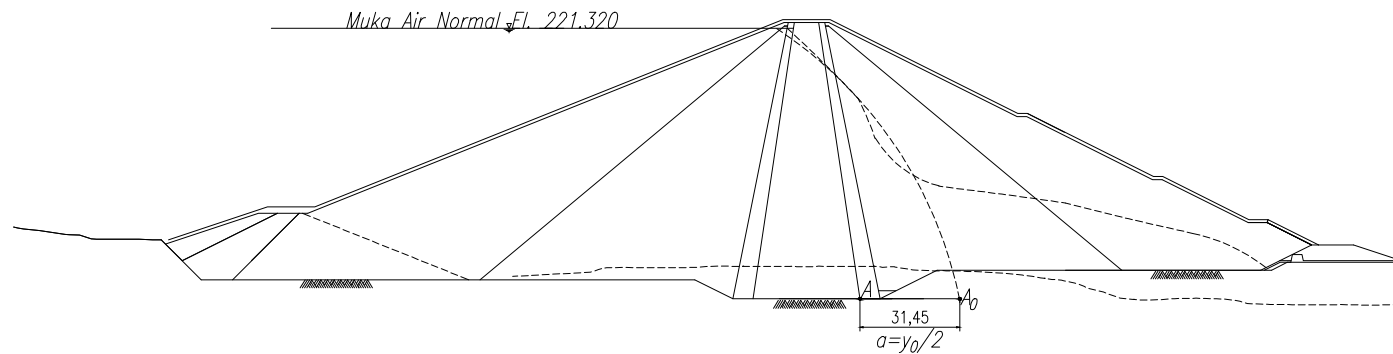
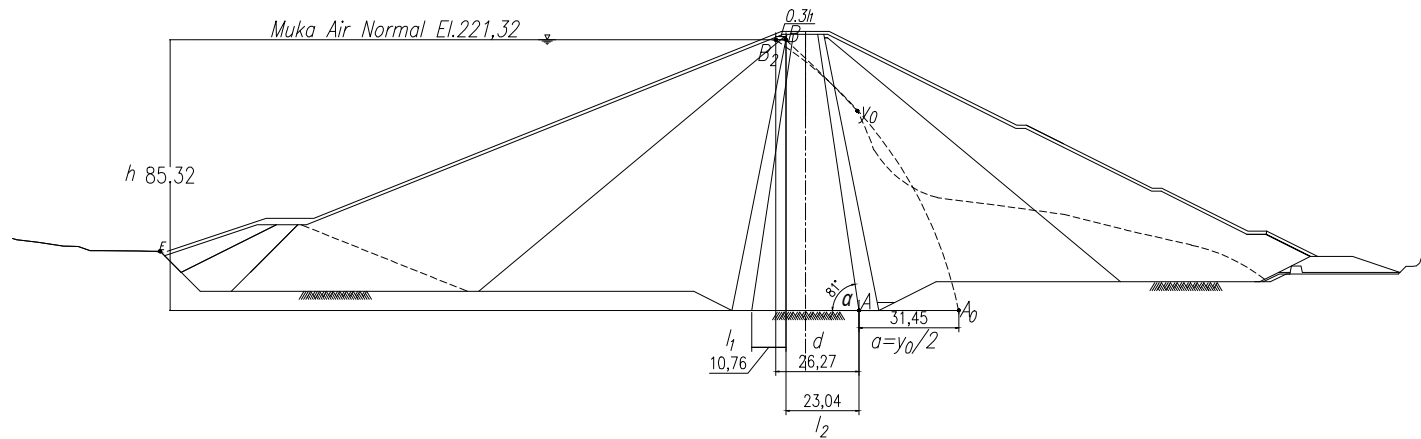


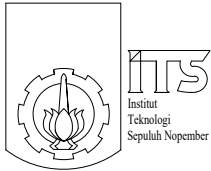
SKALA

 SKALA 1 : 1000

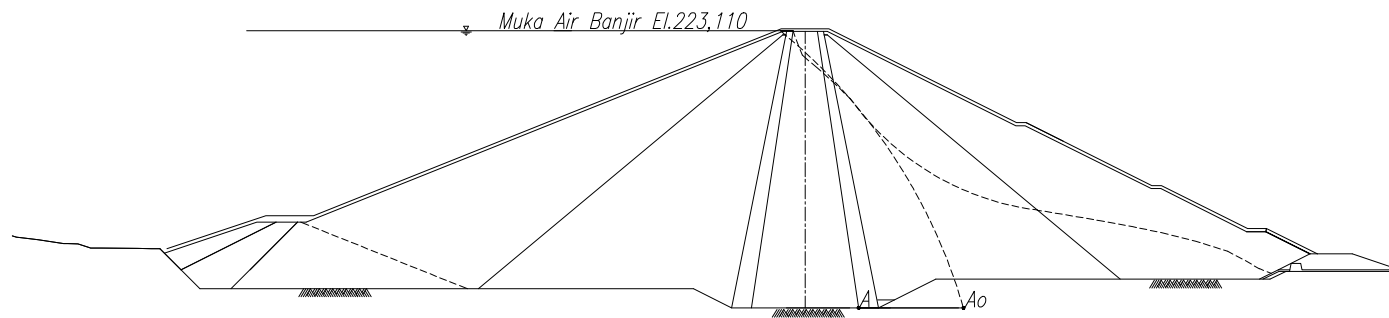
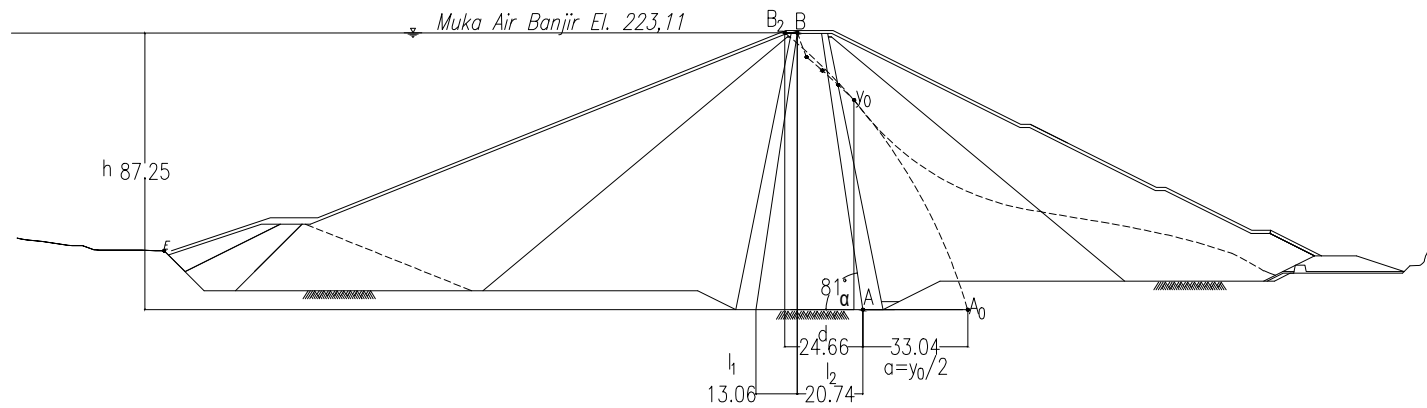
	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
 Institut Teknologi Sepuluh Nopember	Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS	Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo	BENDUNGAN TIPE MEMBRAN BETON ASPAL KONDISI MUKA AIR BANJIR (MAB)		Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT	Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)	10	20

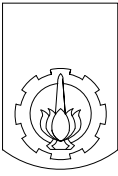
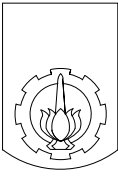


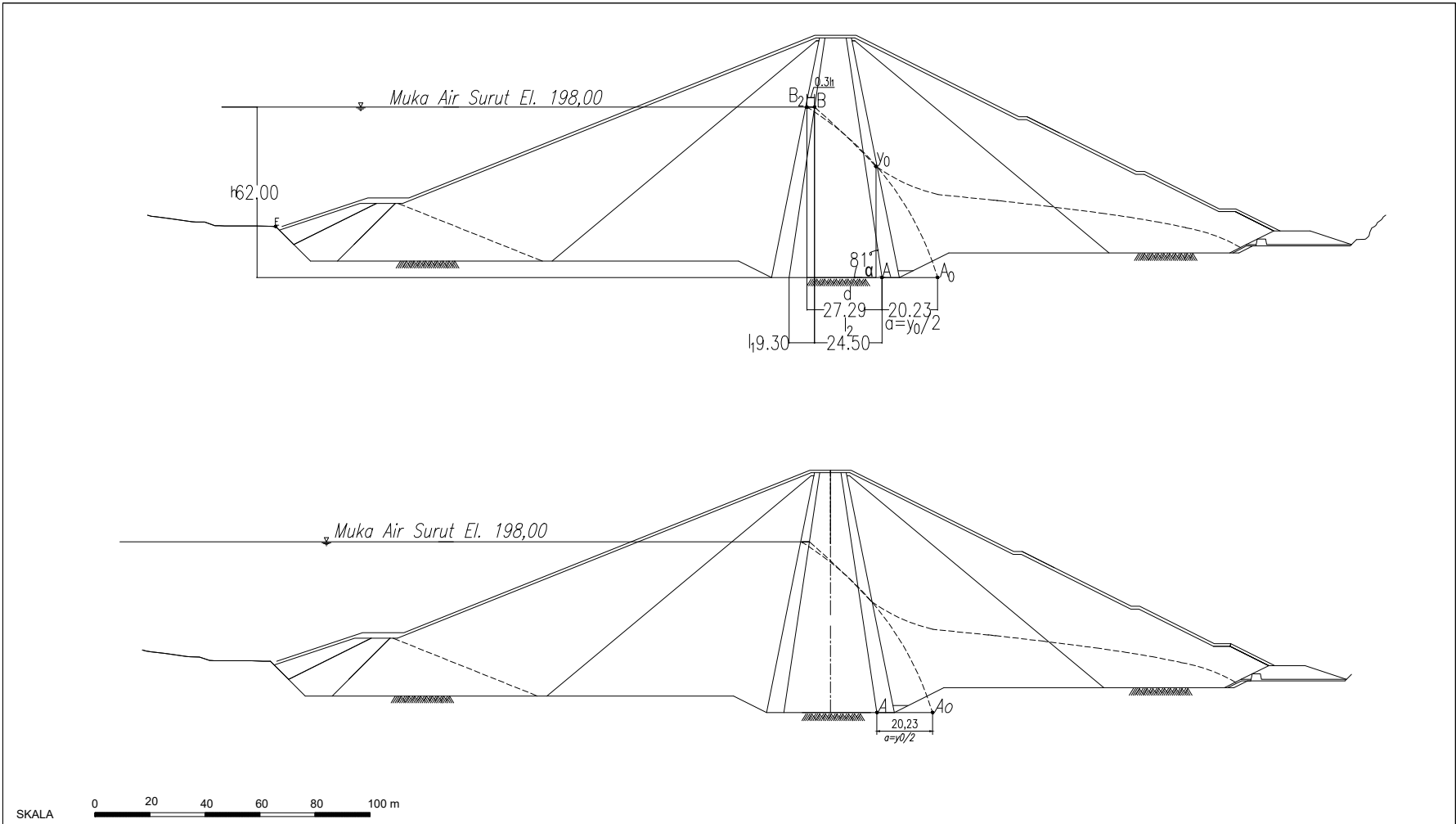
	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
 <p data-bbox="376 1268 459 1364"> ITS Institut Teknologi Sepuluh Nopember </p>	<p data-bbox="533 1295 683 1359"> Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS </p>	<p data-bbox="734 1268 925 1380"> Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo </p>	<p data-bbox="952 1279 1151 1391"> BENDUNGAN TIPE MEMBRAN BETON ASPAL KONDISI MUKA AIR SURUT TIBA-TIBA (<i>RAPID DRAW DOWN</i>) </p>		<p data-bbox="1265 1264 1489 1284">Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc</p> <p data-bbox="1265 1316 1505 1337">Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT</p>	<p data-bbox="1568 1305 1684 1348"> Aria Khoirun Nisa' (03111745000026) </p>	<p data-bbox="1774 1295 1818 1348">11</p>	<p data-bbox="1908 1300 1960 1353">20</p>

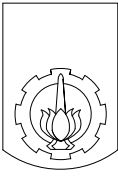


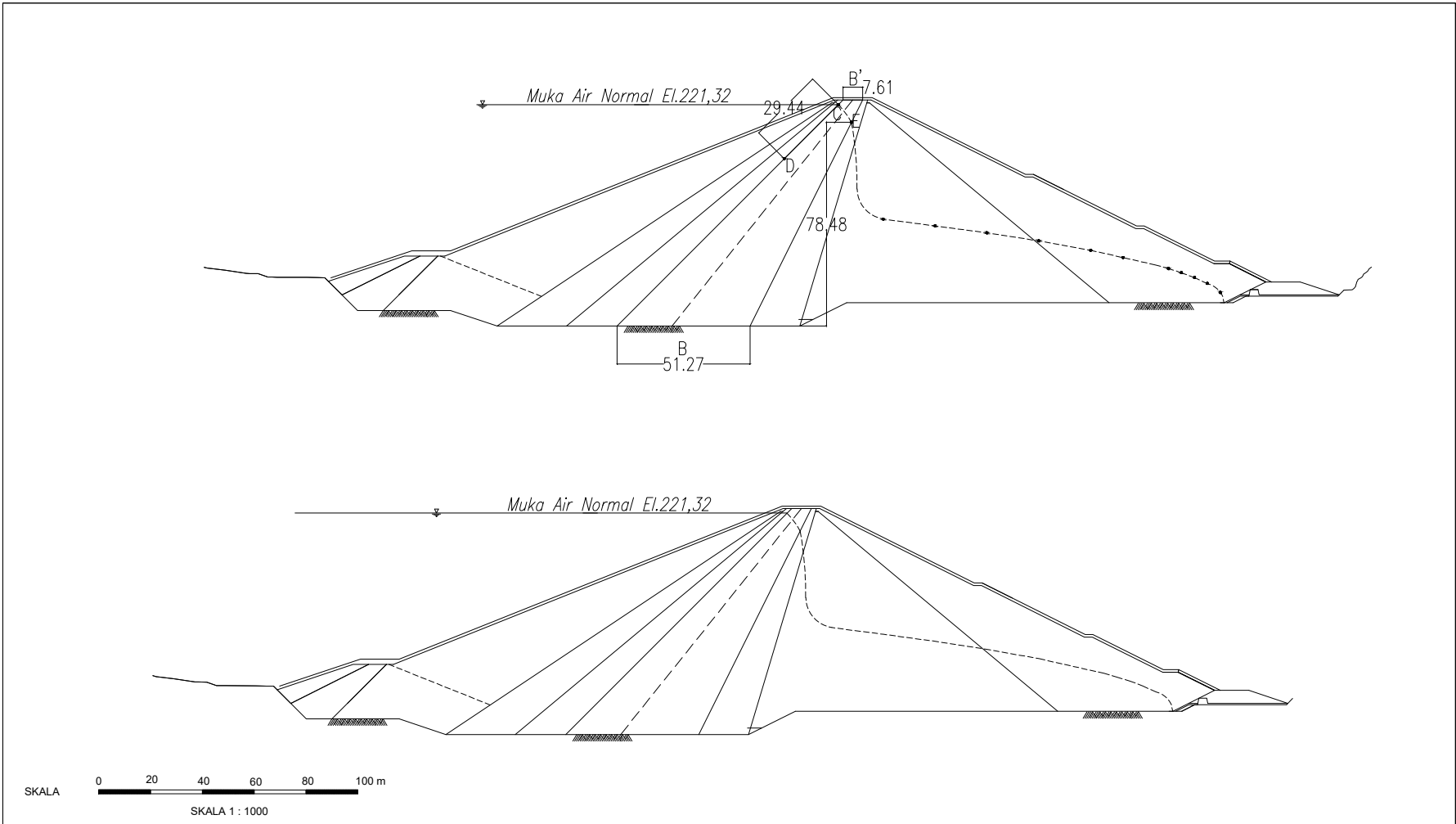
JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
 Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS	Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo	BENDUNGAN TIPE ZONA INTI TEGAK KONDISI MUKA AIR NORMAL (MAN)		Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc	Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)	12	20
				Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT			

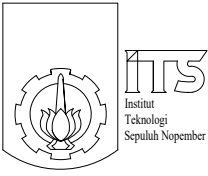


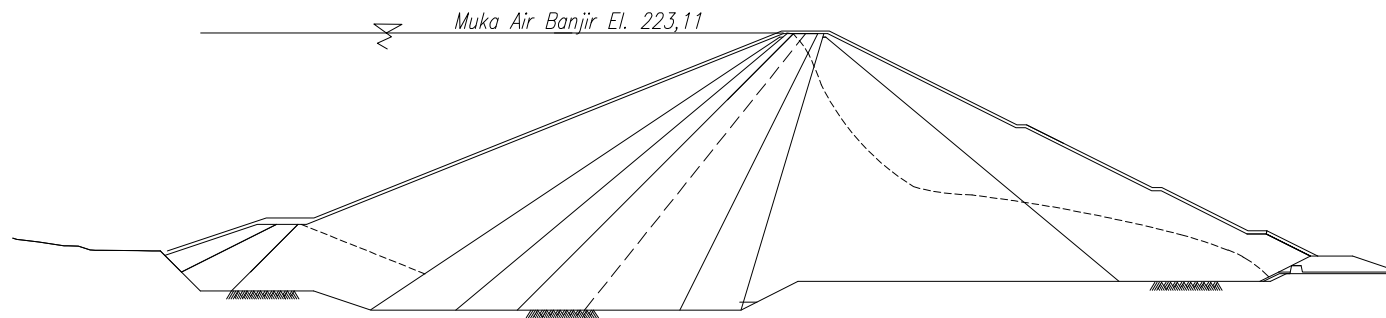
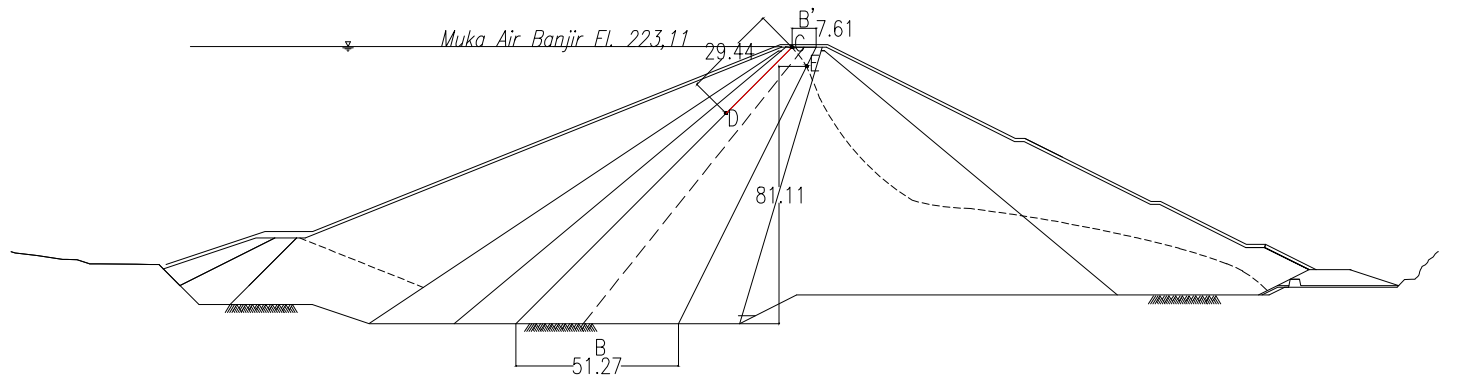
	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
	Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS	Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo	BENDUNGAN TIPE ZONA INTI TEGAK KONDISI MUKA AIR BANJIR (MAB)		Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT	Aria Khoirun Nisa' (031174500026)	13	20



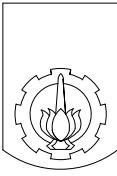
SKALA	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
 Institut Teknologi Sepuluh Nopember	Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS	Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo	BENDUNGAN TIPE ZONA INTI TEGAK KONDISI MUKA AIR SURUT TIBA-TIBA (<i>RAPID DRAW DOWN</i>)		Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT	Aria Khoirun Nisa' (031174500026)	14	20

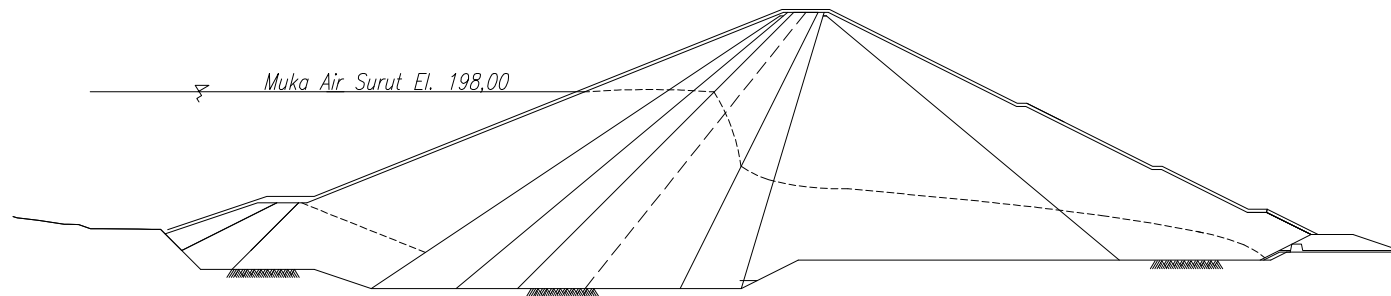
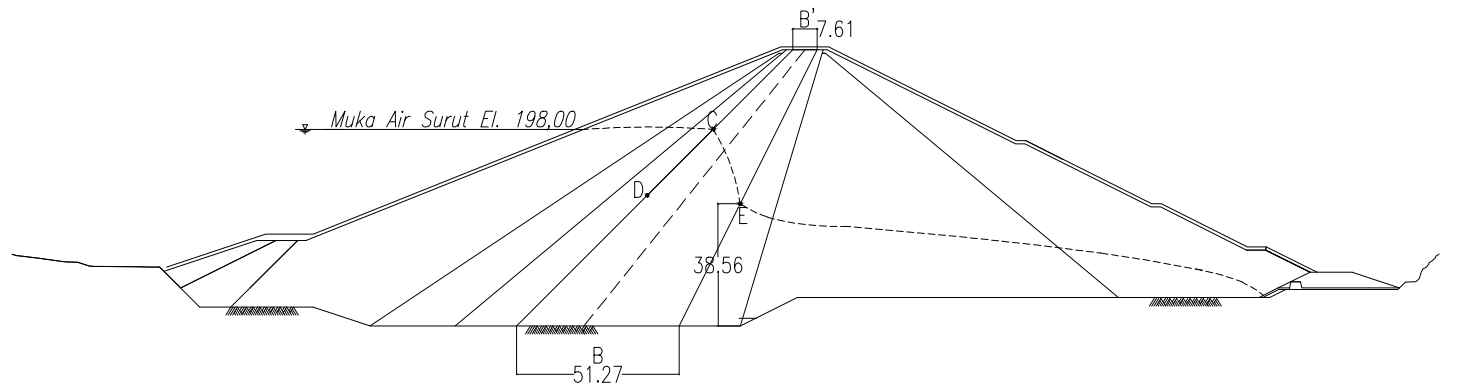


	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
 <p>Institut Teknologi Sepuluh Nopember</p>	<p>Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS</p>	<p>Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo</p>	<p>BENDUNGAN TIPE ZONA INTI MIRING KONDISI MUKA AIR NORMAL (MAN)</p>		<p>Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT</p>	<p>Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)</p>	<p>15</p>	<p>20</p>

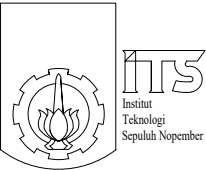


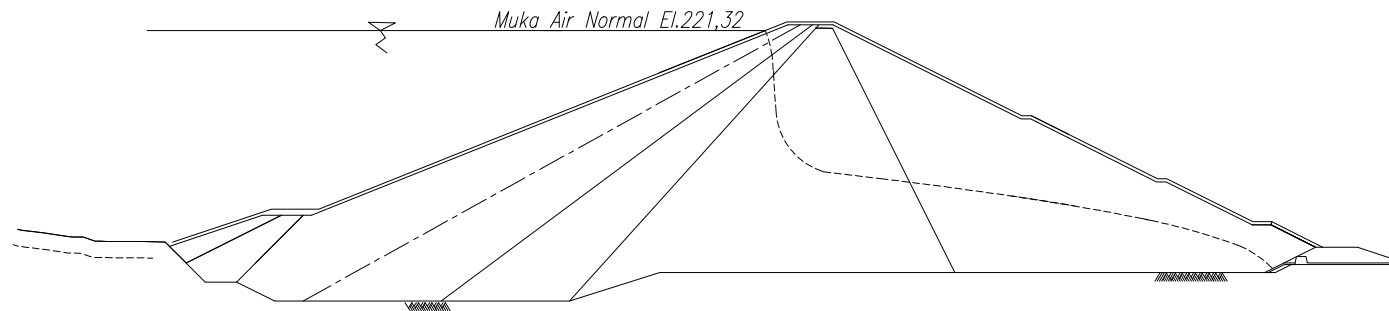
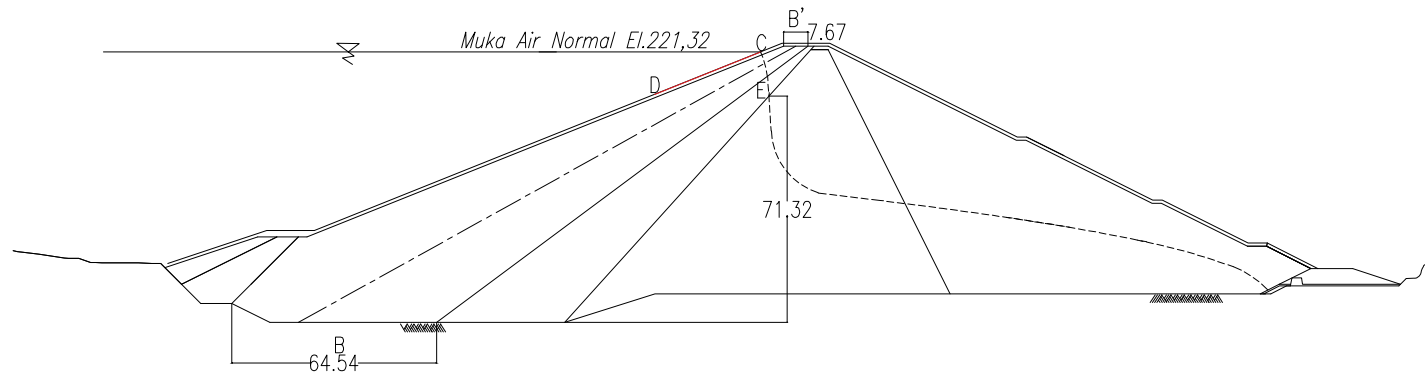
SKALA 0 20 40 60 80 100 m
SKALA 1 : 1000

	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
 <p data-bbox="369 1268 459 1364">ITS Institut Teknologi Sepuluh Nopember</p>	<p data-bbox="526 1292 683 1364">Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS</p>	<p data-bbox="728 1268 929 1380">Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo</p>	<p data-bbox="952 1276 1153 1364">BENDUNGAN TIPE ZONA INTI MIRING KONDISI MUKA AIR BANJIR (MAB)</p>		<p data-bbox="1265 1260 1500 1284">Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc</p> <p data-bbox="1265 1316 1500 1340">Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT</p>	<p data-bbox="1556 1300 1691 1348">Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)</p>	<p data-bbox="1769 1292 1825 1348">16</p>	<p data-bbox="1904 1292 1960 1348">20</p>

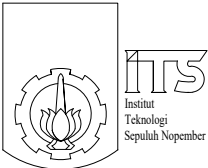


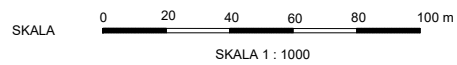
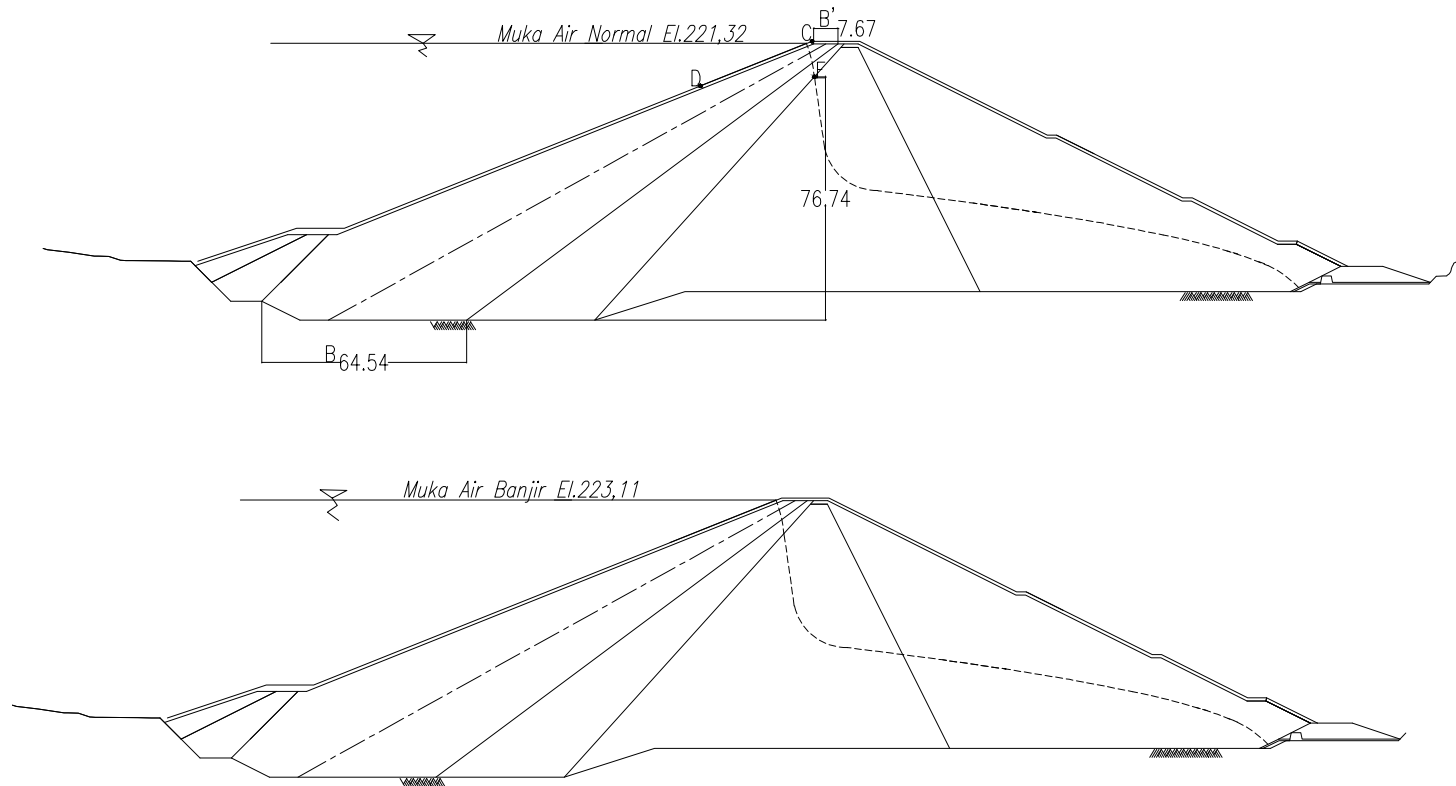
SKALA 0 20 40 60 80 100 m
SKALA 1 : 1000

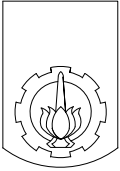
	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
	Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS	Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo	BENDUNGAN TIPE ZONA INTI MIRING KONDISI MUKA AIR SURUT TIBA-TIBA (<i>RAPID DRAW DOWN</i>)		Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT	Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)	17	20

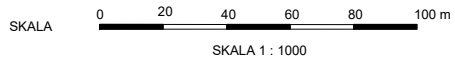
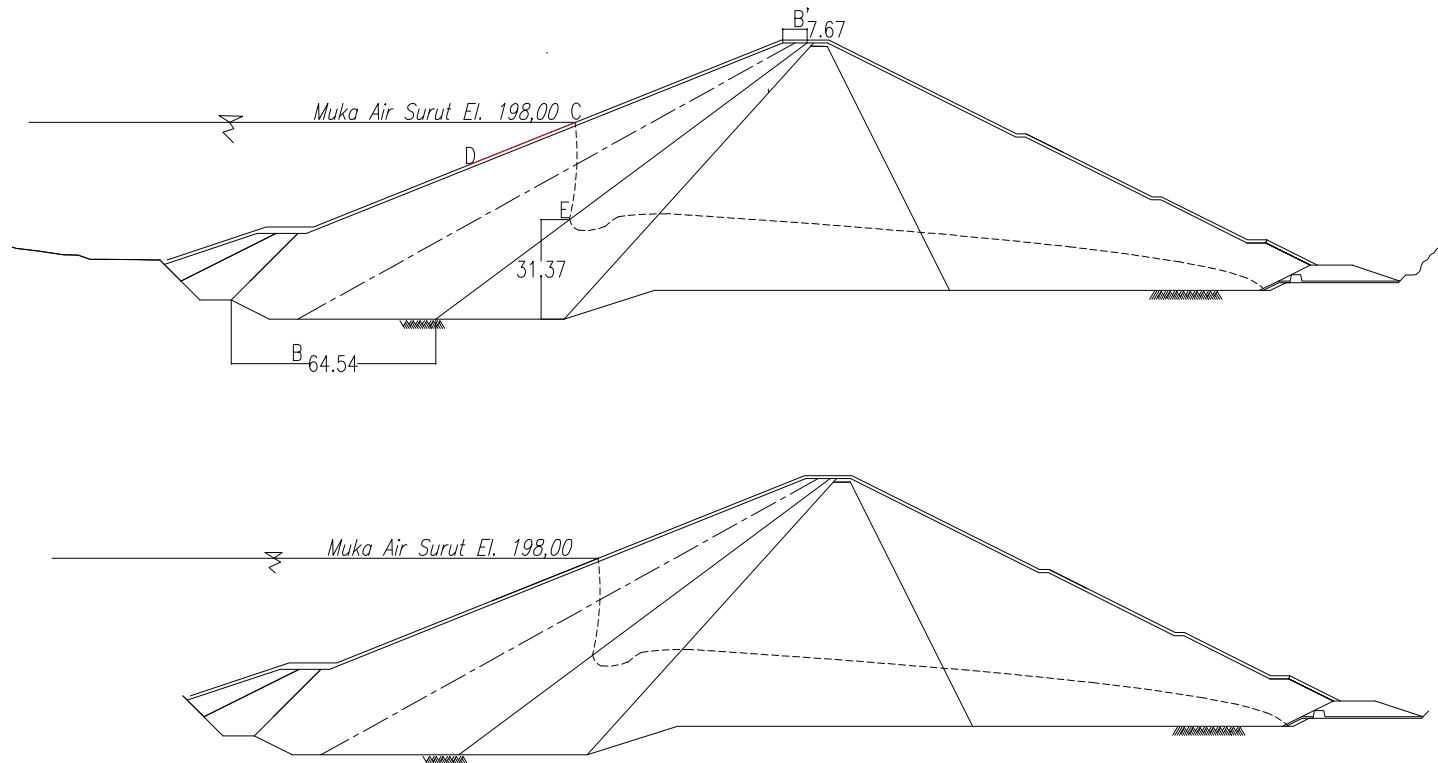


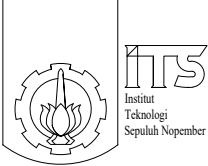
SKALA 0 20 40 60 80 100 m
SKALA 1 : 1000

	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
	Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS	Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo	BENDUNGAN TIPE ZONA INTI TIRAI KONDISI MUKA AIR NORMAL (MAN)			Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT	Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)	18



	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
 Institut Teknologi Sepuluh Nopember	Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS	Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo	BENDUNGAN TIPE ZONA INTI TIRAI KONDISI MUKA AIR BANJIR (MAB)		Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT	Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)	19	20



	JURUSAN	TUGAS	JUDUL GAMBAR	SKALA	DOSEN PEMBIMBING	MAHASISWA	NO. GBR.	JML. GBR.
	Program S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil FTSLK - ITS	Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (<i>seepage</i>) Pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo	BENDUNGAN TIPE ZONA INTI TIRAI KONDISI MUKA AIR SURUT TIBA-TIBA (<i>RAPID DRAW DOWN</i>)		Dr. Ir., WASIS WARDOYO ,M.Sc Dr. TRIHANYNDIO RENDY S, ST.,MT	Aria Khoirun Nisa' (03111745000026)	20	20



PROGRAM STUDI S-1 JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - ITS
LEMBAR KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR (WAJIB DIISI)

Jurusan Teknik Sipil Lt.2, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
Telp.031-5946094, Fax.031-5947284



Form AK/TA-04
rev01

NAMA PEMBIMBING	: Dr. Ir. Wasis Wardoyo, MSc / Dr. Trihanipdio Rendy S., ST.MT
NAMA MAHASISWA	: ARIA KHOIRUN NISA'
NRP	: 03111745000026
JUDUL TUGAS AKHIR	: ALTERNATIF PERENCANAAN TUBUH BENDUNGAN UNTUK MEMINIMALISIR LAJU REMBESAN (SEEPAGE) PADA BENDUNGAN BENDU, KABUPATEN PONOROGO
TANGGAL PROPOSAL	: 3 Januari 2019
NO. SP-MMTA	: 15158 / IT2.VI.4.1 / PP.05.02.00/2019

NO	TANGGAL	KEGIATAN		PARAF ASISTEN
		REALISASI	RENCANA MINGGU DEPAN	
1	8 / 2019 / 02	<ul style="list-style-type: none"> • Memodelkan bendungan dengan Geo Studio SEEP/ w. Tipe 2D, zonal inti tegak. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pelajari literatur tentang hydraulic conductivity. • Cari jurnal tentang hydraulic section. • Cari jurnal tentang estimasi fungsi permeabilitas dg variasi kondisi k. 	#
2	4 / 2019 / 03	<ul style="list-style-type: none"> • Memahami fungsi estimate hydraulic conductivity pada Geo Studio SEEP/w. • Merencanakan jurnal yang akan digunakan. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baca referensi tentang "Hydraulic Conductivity of saturated soil". • Pahami "Soil water characteristic Curve" • Pahami hubungan Volumetri water content dan Saturatad Volumetri water content- 	#
3	12 / 2019 / 03	<ul style="list-style-type: none"> • Memahami literatur yang dipelajari → Soil water characteristic Curve. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cari permeabilitas berbagai jenis tanah dari paper yang sudah dipublikasikan (jurnal). 	#
4	23 / 2019 / 03	<ul style="list-style-type: none"> • Merangkum jurnal sesuai kebutuhan data tugas akhir 	<ul style="list-style-type: none"> • Cari Curva swcc yang tanahnya sand dan/ clay. • Modelkan dg Geo Studio • Desain Maindam sesuai sm 	#



PROGRAM STUDI S-1 JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - ITS
LEMBAR KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR (WAJIB DIISI)

Jurusan Teknik Sipil Lt.2, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 601111
Telp.031-5946094, Fax.031-5947284



Form AK/TA-04
rev01

NAMA PEMBIMBING	: Dr. Ir. Wasis Wardoyo, MSc / Dr. Trihanuyndio Rendy S., ST, MT
NAMA MAHASISWA	: ARIA KHOIRUN NISA'
NRP	: 03111745000026
JUDUL TUGAS AKHIR	: ALTERNATIF PERENCANAAN TUBUH BENDUNGAN UNTUK MEMINIMALISER LAJU REMBESAN (SEEPAGE) PADA BENDUNGAN BENDU, KABUPATEN PUNJOREJO
TANGGAL PROPOSAL	: 3 Januari 2019
NO. SP-MMTA	: 15158/IT2.VI.4.1 / PP.05.02.00/2019

NO	TANGGAL	KEGIATAN		PARAF ASISTEN
		REALISASI	RENCANA MINGGU DEPAN	
5	10/04 2019	• Memodelkan tiga tipe mairidam berdasarkan kondisi muka air dengan Geo Studio.	• Buat variasi data tanah dengan patokan sesuai jurnal. • Susunan tanah masuk BAB IV.	#
6	16/04 2019	• Membuat variasi data tanah pada pemodelan Geo Studio.	• Pelajari tentang pelaksanaan timbunan. • Pelajari karakter flek material.	#
7	23/04 2019	• Mendata hasil rembesan dari pemodelan pada Geo Studio	• Membuat pemodelan rembesan manual berdasarkan literatur. • Bandingkan dengan hasil Geo Studio. • Cek flux pada tiap lapisan tanah.	fn
8	25/04 2019	• Pemodelan garis filtrasi dengan pendekatan rumus (Penggambaran manual)	• Membuat formasi garis depresi (metode cassagrande) • Membuat garis equipotensial	fn



PROGRAM STUDI S-1 JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - ITS
LEMBAR KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR (WAJIB DIISI)

Jurusan Teknik Sipil Lt.2, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 601111
Telp.031-5946094, Fax.031-5947284



Form AK/TA-04
rev01

NAMA PEMBIMBING	: Dr. Ir. Wasis Wardoyo, M.Sc / Dr. Trihanandio Rendy S., ST.MT
NAMA MAHASISWA	: ARIA KHOIRUN NISA'
NRP	: 03111745000026
JUDUL TUGAS AKHIR	: ALTERNATIF PERENCANAAN TUBUH BENDUNGAN UNTUK MEMINIMALISIR LAJU REMBESAN (SEEPAGE) PADA BENDUNGAN BENDU, KABUPATEN PAKSI
TANGGAL PROPOSAL	: 3 Januari 2019
NO. SP-MMTA	: 15158 / IT2.VI.4.1 / PP.05.02.00 / 2019

NO	TANGGAL	KEGIATAN		PARAF ASISTEN
		REALISASI	RENCANA MINGGU DEPAN	
9	30/2019 04	<ul style="list-style-type: none"> Membuat formasi garis depresi dan coba-coba garis aliran. Formasi garis depresi pada 3 tipe zonal dan 3 kondisi muka air, selesai. 	<ul style="list-style-type: none"> Menggambarkan kondisi manual di geo Studio Menghitung rembesan dengan Rumus Darcy. 	jn
10	10/2019 05	<ul style="list-style-type: none"> Perhitungan ekuivalensi untuk mendapatkan debit rembesan. Merencanakan design upstream blanket. 	<ul style="list-style-type: none"> Menyelesaikan perhitungan manual pada 3 tipe dan 3 variasi muka air. Menyelesaikan perhitungan mandam tipe upstream blanket. 	jn
11	17/2019 05		<ul style="list-style-type: none"> Coba hitung rembesan tiap lapis tanah dg rumus. Pelajari rumus Darcy $q = \frac{Nf}{Nd} k.n.$ 	JH

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
 FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN
 PROGRAM SARJANA (S1) DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL FTSLK - ITS

**BERITA ACARA PENYELENGGARAAN UJIAN
 SEMINAR DAN LISAN
 TUGAS AKHIR**

Pada hari ini **Kamis** tanggal **11 Juli 2019** jam **09:00 WIB** telah diselenggarakan **UJIAN SEMINAR DAN LISAN TUGAS AKHIR** Program Sarjana (S1) Departemen Teknik Sipil FTSLK-ITS bagi mahasiswa:

NRP	Nama	Judul Tugas Akhir
03111745000026	Aria Khoirun Nisa'	Alternatif Perencanaan Tubuh Bendungan untuk Meminimalisir Laju Rembesan (Seepage) pada Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo

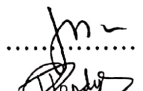
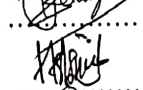

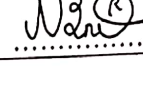
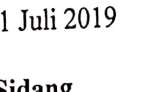
1. Dengan perbaikan/penyempurnaan yang harus dilakukan adalah :

- Masalah - Kesimpulan tabel cocok ✓
- Redaksional diperbaiki ✓
- satuan² harus lengkap ✓
- menerangkan grafik ✓
- BC - bmu - masalah & kung diterangkan ✓

2. Rentang nilai dari hasil diskusi Tim Penguji Tugas Akhir adalah **(A)** AB / B / BC / C / D / E

3. Dengan hasil ujian (wajib dibacakan oleh Ketua Sidang di depan Peserta Ujian dan Penguji) :

- Lulus Tanpa Perbaikan Mengulang Ujian Seminar dan Lisan
 Lulus Dengan Perbaikan Mengulang Ujian Lisan

Tim Penguji (Anggota)	Tanda Tangan
Dr. Ir. Wasis Wardoyo, MSc (Pembimbing 1)	
Dr. Trihanyndio Rendy Satrya, ST. MT (Pembimbing 2)	
Nastasia Festy Margini, ST. MT	
Dr. Mahendra Andiek Maulana, ST. MT	
Novi Andriany Teguh, ST. MSc	

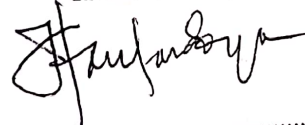
Surabaya, 11 Juli 2019

Mengetahui,
 Ketua Program Studi S1



Dr. techn. Umboro Lasminto, ST. MSc
 NIP 19721202 199802 1 001

Ketua Sidang



(.....)
 Nama terang

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Aria Khoirun Nisa' lahir di Tulungagung, 15 maret 1995 merupakan anak ke dua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Kartika IV-33 (Tulungagung), SDN Mergayu II (Tulungagung), SMP Negeri 1 Bandung (Tulungagung), SMA Negeri 1 Trenggalek (Trenggalek). Setelah lulus dari SMA Negeri 1 Trenggalek tahun 2013, Penulis mengikuti ujian masuk Perguruan Tinggi Negeri melalui SMITS dan diterima di D3 Teknik Sipil ITS pada tahun 2013. Setelah menyelesaikan pendidikan diploma pada tahun 2016, penulis melanjutkan pendidikan jenjang S1 melalui ujian masuk Lintas Jalur pada tahun 2017 dan terdaftar dengan NRP 03111745000026. Di Jurusan Teknik Sipil, Penulis mengambil Bidang Studi Hidroteknik. Penulis pernah aktif dalam beberapa kegiatan seminar, kepanitiaan, kepenulisan dan organisasi selama menjadi mahasiswa baik yang diadakan di tingkat Jurusan, Institut maupun kegiatan yang bersifat nasional. Bagi pembaca yang ingin menghubungi penulis, bisa melalui surat elektronik dengan alamat khoirunnisaria@gmail.com.