

**PENGENDALIAN BANJIR
BERBASIS KONSERVASI SUMBER DAYA AIR (Bagian II)
OPTIMASI DESAIN TUBUH EMBUNG
PENGENDALI BANJIR**

Dr Ir. Kustamar, MT

**Dream Litera Buana
Malang, 2018**

**PENGENDALIAN BANJIR
BERBASIS KONSERVASI SUMBER DAYA AIR (Bagian II)
OPTIMASI DESAIN TUBUH EMBUNG
PENGENDALI BANJIR**

©Dream Litera Buana
Malang 2018
59 halaman, 15,5 x 23 cm

ISBN: 798-602-5518-47-8

Penulis: Dr Ir. Kustamar, MT

Tata letak: Endhi Pujo
Desain cover: W. S. Fauzi

Diterbitkan oleh:

CV. Dream Litera Buana

Perum Griya Sampurna, Blok E7/5
Kepuharjo, Karangploso, Kabupaten Malang
Telp. 0812 2229 6506 / 0856 4663 3407

Email: dream.litera@gmail.com

Website: www.dreamlitera.com

Anggota IKAPI No. 158/JTI/2015

Hak cipta dilindungi oleh undang-undang.
Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau
seluruh isi buku ini dengan cara apapun,
tanpa izin tertulis dari penerbit.

Cetakan pertama, September 2018

Distributor:
Dream Litera Buana

KATA PENGANTAR

Embung merupakan bangunan persungai yang sangat penting dan beresiko tinggi. Embung berfungsi mengontrol sedimen dan banjir. Resiko timbul karena unsur ketidakpastian hidrologi dan dinamika perubahan penggunaan lahan. Kedua hal tersebut bermuara pada besarnya debit dan umur efektif embung. Karena hal tersebut, maka embung harus direncanakan dengan cermat.

Unsur efisiensi juga merupakan hal yang harus diperhatikan, sehingga dimensi embung harus optimal, yaitu stabil namun ekonomis. Untuk hal tersebut diperlukan optimasi desain. Optimasi desain dalam buku ini meliputi optimasi kemiringan lereng, pemilihan type untuk embung, dan pemilihan lengkung mercu *spill way*.

Contoh yang disajikan dalam buku ini bersifat nyata, dibangun dari sebagian materi hasil penelitian PENGEMBANGAN MODEL PENGENDALIAN BANJIR BERBASIS KONSERVASI SUMBER DAYA AIR dalam skema penelitian unggulan perguruan tinggi dengan no. kontrak Penelitian ITN.0 3.0741/IX.REK/201 8 dan diperkaya materi yang dihimpun dari beberapa pekerjaan perencanaan embung di bawah kerjasama Institut Teknologi Nasional (ITN) Malang dengan beberapa instansi pemerintah daerah.

Dalam kesempatan ini, penyusun menyampaikan terimakasih kepada:

1. Tim perencanaan embung Ngluyu, Kabupaten Nganjuk.
2. Para mahasiswa yang turut mendukung perencanaan, dan mengambalnya sebagai materi skripsi.

Demikian, semoga buku ini bermanfaat.

Malang, Juli 2018

Penulis,

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Deskripsi Komponen Embung	4
BAB II. PEMILIHAN TIPE TUBUH EMBUNG	8
2.1 Pengembangan Konsep	8
2.2 Kapasitas Tampung Embung	9
2.3 Desain Tubuh Embung	12
2.4 Formasi Garis Depresi dan Jaringan Trayektori Aliran Filtrasi	21
2.5 Debit Aliran Filtrasi (Rembesan) pada Tubuh Embung	26
2.6 Stabilitas Lereng Tubuh Embung	29
2.7 Pemilihan Type Susunan Material Terbaik	34
BAB III. OPTIMASI KEMIRINGAN LERENG TUBUH EMBUNG	35
3.1 Pengembangan Konsep	35
3.2 Desain Tubuh Embung	35
3.3 Analisa Stabilitas Lereng Tubuh Embung	36
3.4 Pemilihan Kemiringan Lereng	46
BAB IV. ALTERNATIF LENGKUNG PELIMPAH	48
4.1 Pengembangan Konsep	48
4.2 Diskripsi Type Mercu Spillway	49
4.3 Koefisien Debit Pelimpah	52
4.4 Kapasitas Pelimpah	53
4.5 Pemilihan Type Mercu	56
DAFTAR PUSTAKA	58
INDEX	59

BAB I

PENDAHULUAN

- 1.1 Latar Belakang
- 1.2 Deskripsi Komponen Embung



1.1 Latar Belakang

Embung merupakan bangunan persungai yang berfungsi sebagai pengendali banjir, dengan cara menampung air dan melepaskan kembali setelah puncak banjir lewat. Desain fisik embung identik dengan bendungan, namun dengan batasan tinggi maksimum 15 m, dan kapasitas tampungan kurang dari 500,000 m³. Embung pada umumnya dibangun di bagian hulu atau anak sungai, yang berfungsi juga sebagai pengontrol transportasi sedimen. Pada beberapa lokasi, embung difungsikan juga sebagai penyedia cadangan air dan pengendali banjir.

Embung memiliki tiga jenis tampungan, yaitu: tampungan mati, dan tampungan efektif, serta tampungan pengendali banjir. Periksa Gambar 1. Masing-masing tampungan memiliki fungsi yang spesifik, yaitu sebagai berikut:

Tampungan Mati

Tampungan mati terdapat pada posisi paling bawah, dibatasi oleh dasar sungai dan muka air rendah. Tampungan mati dialokasikan untuk menampung sedimen, sehingga umur efektif embung ditentukan oleh berapa lama waktu tampungan ini terisi penuh sedimen. Ketentuan ini digunakan dengan anggapan bahwa embung berfungsi sebagai penampung air untuk air irigasi atau air bersih. Dengan demikian jika embung hanya berfungsi sebagai pengendali banjir, maka ketentuan tersebut tidak berlaku.

Analisa beban sedimen terlarut dalam aliran air di sungai, hendaknya tidak hanya didasarkan pada hasil pengukuran kondisi

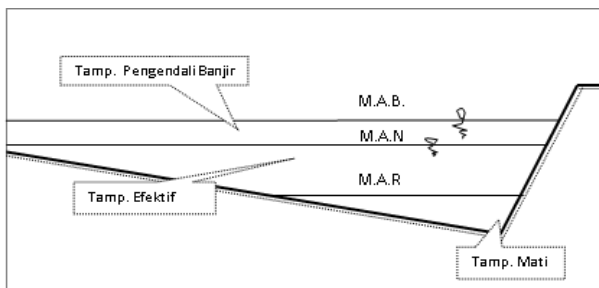
saat ini. Akan tetapi juga mempertimbangkan kondisi yang akan datang, terutama terkait dengan factor penggunaan lahan dan kondisi tutupan lahan.

Tampungan Efektif

Tampungan efektif dialokasikan untuk menampung air yang dicadangkan, atau sebagai penguat kapasitas pengendali banjir. Dalam hal embung berfungsi utama sebagai pengendali banjir, embung dilengkapi pintu penguras yang dapat mengosongkan tampungan efektif. Dengan demikian, pada saat tidak terjadi banjir pintu dibuka agar tampungan efektif dalam kondisi kosong dan dapat menampung air banjir dalam jumlah yang maksimal.

Dalam hal embung berfungsi utama sebagai penyedia cadangan air, desain kapasitas tampungan ini didasarkan pada komulatif selisih antara debit air sungai dengan kebutuhan air. Besar kapasitas tampungan efektif menggambarkan berapa besar volume air yang cadangkan, untuk memenuhi kebutuhan air sesuai dengan distribusi waktunya. Dengan demikian, tampungan efektif berfungsi menyesuaikan distribusi waktu antara fluktuasi debit sungai dengan debit kebutuhan.

Sungai dengan fluktuasi debit yang tinggi tentu memerlukan embung dengan kapasitas tampungan efektif yang besar. Hal ini sulit didapatkan manakala topografi cekungan alur sungai tidak membentuk “mangkok”. Dengan demikian jika secara alami tidak ditemui, maka tidak menutup kemungkinan harus dilakukan pengerukan dan pelebaran alur sungai. Material hasil galian akan lebih efektif jika dapat digunakan sebagai material timbunan tubuh embung.



Gambar 1.1. Zonasi Tampungan Embung

Tampungan Pengendali Banjir

Tampungan pengendali banjir, dibatasi dari muka air normal hingga muka air banjir maksimum. Pada spillway berpintu, kapasitas kendali dapat ditingkatkan dengan mengoperasikan pintu spillway.

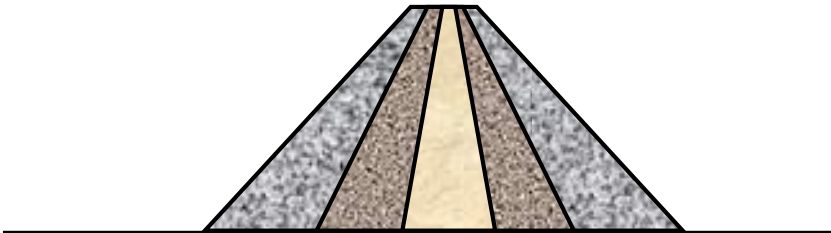
Embung terdiri dari tubuh embung, sistem penampung air, sistem pengelak banjir, sistem pengambilan air. Material pembentuk tubuh embung, dapat dipilih berupa urugan tanah atau pasangan batu kali, atau beton. Pemilihan material tersebut dilakukan dengan pertimbangan: keberadaan material, dan lebar sungai. Ketersediaan material berpengaruh terhadap biaya konstruksi, sedangkan lebar sungai berpengaruh terhadap kebutuhan lebar spillway. Sungai yang relative sempit akan habis untuk alokasi spillway. Dengan demikian, akan lebih tepat jika digunakan material pasangan batu kali atau beton.

Tubuh embung urugan tanah, terdapat dua pilihan, yaitu: urugan tanah homogen (Gambar 1.2), dan urugan tanah berlapis/ zonal (Gambar 1.3). Pemilihan kedua type ini dilakukan dengan pertimbangan volume dan gradasi material yang tersedia, dan kemampuannya dalam mereduksi debit rembesan.

Stabilitas tubuh embung ditinjau dari kemampuannya dalam: menahan gaya geser, menahan gaya longsor, serta mereduksi debit rembesan. Debit rembesan yang melebihi batasan, dapat menyebabkan kerusakan tubuh embung dan bobolnya embung.



Gambar 1.2. Tubuh Embung Type Urugan Homogen



Gambar 1.3. Tubuh Embung Type Urugan Zonal

1.2 Deskripsi Komponen Embung

1.2.1. Tubuh Embung

Tubuh embung merupakan bangunan melintang sungai yang berfungsi ganda, yaitu sebagai bangunan penyangga dan sekaligus sebagai penahan rembesan air. Terdapat 2 jenis tubuh embung, yaitu type urugan tanah dan type pasangan batu kali/ beton.

Embung urugan terdiri dari beberapa tipe antara lain adalah urugan homogen dan urugan zonal. Apabila di sekitar lokasi perencanaan embung terdapat bahan-bahan material yang relative seragam, massif, dan dalam jumlah besar tubuh embung yang sesuai adalah tipe urugan homogeny, dan sebaliknya.

Berdasarkan letak dan kedudukan dari zone kedap airnya, maka tipe embung/ bendungan urugan zonal ini masih dapat dibedakan menjadi 3 yaitu:

1. Embung/ Bendungan urugan zonal dengan tirai kedap air atau embung tirai (*front core fill type dam*), ialah bendungan zonal dengan zona kedap air yang membentuk lereng udik embung tersebut.
2. Embung/Bendungan urugan zonal dengan inti kedap air miring atau bendungan inti miring (*inclined-core fill type dam*), bendungan zonal yang zona kedap airnya terletak di dalam tubuh bendungan dan berkedudukan miring ke arah hilir.
3. Embung/Bendungan urugan zonal dengan inti kedap air tegak atau bendungan inti tegak (*central-core fill type dam*), ialah bendungan zonal yang zona kedap airnya terletak di dalam tubuh bendungan dengan kedudukan vertikal.

1.2.2. Sistem Penampung Air

Sistem penampung air pada embung dibuat pada cekungan alur sungai yang dibendung dengan tubuh embung. Besar kapasitas embung sangat dipengaruhi oleh besar dan bentuk cekungan alur sungai, serta tinggi tebingnya. Dalam perencanaan desain embung, kapasitas embung digambarkan dalam grafik hubungan antara elevasi dan volume tampungan, yang pada umumnya disebut lengkung kapasitas embung.

Perhitungan kapasitas tampungan didasarkan pada peta topografi dan beda tinggi konturnya. Kemudian dicari luas permukaan genangan embung yang dibatasi garis kontur. Berdasarkan data luas permukaan genangan dan ketinggian kontur, selanjutnya dapat dihitung volume yang

dibatasi oleh dua garis kontur yang berurutan dengan menggunakan persamaan pendekatan volume sebagai berikut (Soedibyo, 1993) :

$$V_n = \frac{1}{3} \times \Delta h \times (F_{n-1} + F_n + \sqrt{F_n \times F_{n-1}}) \dots\dots\dots (1)$$

Dengan :

- V_n = Volume genangan pada elevasi ke -n (m³)
- Δh = Beda tinggi antara dua kontur / elevasi (m)
- F_{n-1} = Luas genangan sebelum elevasi ke-n (m²)
- F_n = Luas genangan pada elevasi ke-n (m²)

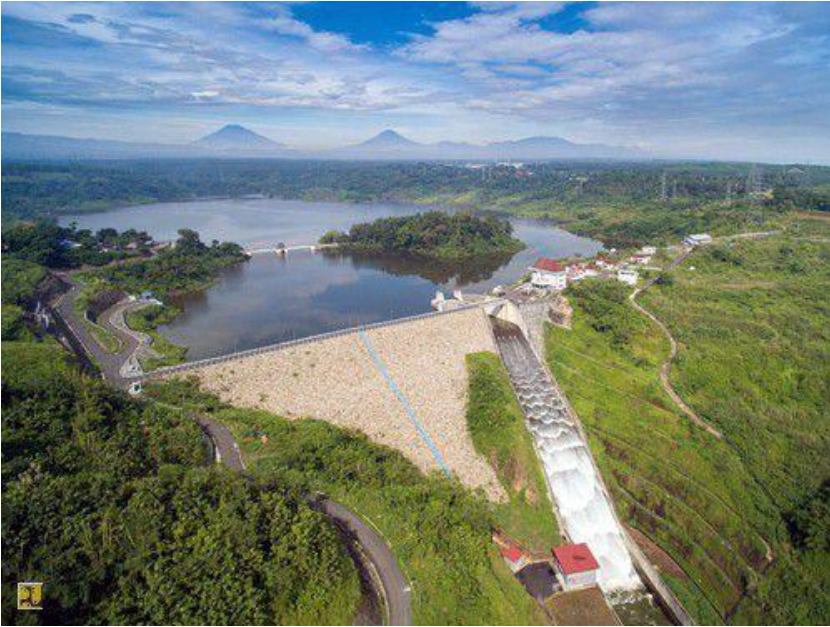
1.2.3. Sistem Penyalur Banjir

Dalam perencanaan suatu embung/ bendungan, harus direncanakan sistem penyaluran kelebihan air ke hilir (Gambar 1.4). Fungsi utama bangunan pelimpah (spillway) pada sebuah waduk adalah untuk melepaskan kelebihan air atau air banjir yang tidak dapat lagi ditampung oleh waduk. Spillway harus memiliki kapasitas untuk mengalirkan banjir besar tanpa merusak bendungan ataupun bangunan-bangunan pelengkap lainnya.

Spillway juga harus mampu menjaga muka air waduk tetap di bawah tinggi maksimum yang ditetapkan. Kapasitas sistem penyalur banjir besarnya tergantung pada desain banjir rencana pelimpah itu, kapasitas pengaliran dari bangunan pelepasan, dan simpanan yang tersedia.

Penetapan nilai desain debit banjir rencana berkaitan dengan tingkat pengamanan yang harus dipenuhi oleh waduk, yang pada akhirnya tergantung pada jenis embung/ bendungan, letaknya, serta risikonya jika tubuh embung/ bendungan jebol.

Komponen-komponen dari sebuah spillway yang lengkap meliputi: *Entrance channel*, merupakan bagian tempat masuknya air dari waduk. Air itu selanjutnya akan disalurkan menuju *control structure*. *Control structure*, merupakan bagian yang mengontrol aliran air yang keluar dari waduk. *Discharge channel*, merupakan saluran yang membawa aliran air (setelah melewati control structure) menuju saluran pembuang yang berada di hilir embung/ bendungan. *Terminal structure*, merupakan komponen yang berguna meredam energi dari aliran air yang deras untuk mencegah terjadinya *erosi* dan *scouring* di saluran pembuang atau saluran hilir. *Outlet channel*, merupakan saluran yang membawa aliran air keluar menuju sungai.



Gambar 1.4. Waduk dan Sistem Penyalur Banjir

Spillway dapat diklasifikasikan sebagai pelimpah yang dapat terkendali (*controlled spillway*) dan tidak terkendali (*uncontrolled spillway*); spillway yang terkendali dilengkapi dengan pintu air mercu atau sarana-sarana lainnya, sehingga laju atau kecepatan aliran air keluarinya dapat diatur

Macam-macam spillway yang dikenal antara lain: Overflow dan free – overfall (straight drop) spillway. Sebagai bangunan besar, waduk harus dilengkapi dengan bangunan pengaman yang salah satunya berupa spillway. Spillway berfungsi untuk melimpahkan air waduk apabila air waduk berlebihan sehingga melampaui batas tinggi maksimal.

Tinggi air yang berlebih dapat menimbulkan gaya tekan hidrostatis yang membahayakan, dan air yang melimpas di atas mercu tubuh embung/bendungan tye urugan berpotensi mengikis dan menghancurkan.

Terdapat berbagai macam jenis spillway, baik yang berpintu maupun tidak, yaitu: side channel spillway, chute spillway dan Syphon Spillway. Jenis - jenis ini dirancang dalam upaya untuk mendapatkan jenis Spillway yang mampu mengalirkan air sebanyak - banyaknya. Pemilihan jenis spillway ini disamping terletak pada pertimbangan hidrolika, juga pertimbangan ekonomis serta operasional dan pemeliharannya.

1.2.4. Sistem Pengambilan air

Sistem pengeambilan air berfungsi untuk menyadap aliran sungai serta mengontrol pemasukan air dan sedimen. Bagian ini dilengkapi dengan pintu yang dapat dibuka dan ditutup, sehingga besar kecilnya air yang disadap dapat dikontrol.

Kontrol terhadap kuantitas dan kualitas air hasil penyadapan, sistem dilengkapi dengan sarana penyaring sampah sebelum air sampai bagian depan pintu. Pintu air dapat dipasang di tubuh embung, atau di menara pengambilan.



Gambar 5. Menara Pengambilan Air

2.1. Pengembangan Konsep

Embung merupakan bangunan persungaaian yang berfungsi sebagai pengendali banjir, dengan cara menampung air dan melepaskan kembali setelah puncak banjir lewat. Desain fisik embung identik dengan bendungan, namun dengan batasan tinggi maksimum 15 m, dan kapasitas tampungan kurang dari 500,000 m³. Embung pada umumnya dibangun di bagian hulu atau anak sungai, yang berfungsi juga sebagai pengontrol transportai sedimen. Pada beberapa lokasi, embung difungsikan juga sebagai penyedia cadangan air dan pe-ngendali banjir.

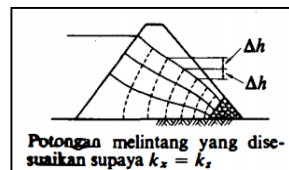
Embung memiliki tiga jenis tampungan, yaitu: tampungan mati, dan tampungan efektif, serta tampungan pe-ngendali banjir. Masing-masing tampungan memiliki fungsi yang spesifik, yaitu sebagai berikut:

Tampungan mati terdapat pada posisi paling bawah, dibatasi oleh dasar sungai dan muka air rendah. Tampungan mati dialokasikan untuk menampung sedimen, sehingga umur efektif embung ditentukan oleh berapa lama waktu tampungan ini terisi penuh sedimen. Ketentuan ini digunakan dengan anggapan bahwa embung berfungsi sebagai penampung air untuk air irigasi atau air bersih. Dengan demikian jika embung hanya berfungsi sebagai pengendali banjir, maka ketentuan tersebut tidak berlaku.

Analisa beban sedimen terlarut dalam aliran air di sungai, hendaknya tidak hanya didasarkan pada hasil pengukuran kondisi saat ini. Akan tetapi juga mempertimbangan kondisi yang akan datang, terutama terkait dengan faktor penggunaan

PEMILIHAN TIPE TUBUH EMBUNG

- 2.1 Pengembangan Konsep
- 2.2 Kapasitas Tampungan Embung
- 2.3 Desain Tubuh Embung
- 2.4 Formasi Garis Depresi dan Jaringan Trayektori Aliran Filtrasi
- 2.5 Debit Aliran Filtrasi (Rembesan) pada Tubuh Embung
- 2.6 Stabilitas Lereng Tubuh Embung
- 2.7 Pemilihan Tipe Susunan Material Terbaik



lahan dan kondisi tutupan lahan. Dengan demikian prediksi umur efektif embung akan semakin akurat.

Pemilihan type tubuh embung merupakan kegiatan awal dalam merencanakan desain tubuh embung, dilanjutkan dengan perencanaan kemiringan lereng. Demikian juga dengan perencanaan pelimpah, diawali pemilihan jenis pelimpah dan dilanjutkan dengan perencanaan desainnya.

Desain embung yang paling ekonomis dapat diperoleh dengan melakukan optimasi. Dengan merubah beberapa factor penentu, simulasi dilakukan untuk mendapatkan hasil perencanaan terbaik. Pemilihan jenis tubuh embung dilakukan dengan pertimbangan ketersediaan jenis material. Pada tubuh embung type urugan tanah, penentuan antara alternative homogen atau zona selain didasarkan pada ketersediaan material, juga didasarkan pada kemampuan embung dalam mereduksi rembesan air. Sedangkan pemilihan kemiringan lereng, didasarkan pada stabilitas lereng dan efisiensi volume timbunan.

2.2. Kapasitas Tampungan Embung

2.2.1. Kurva Kapasitas

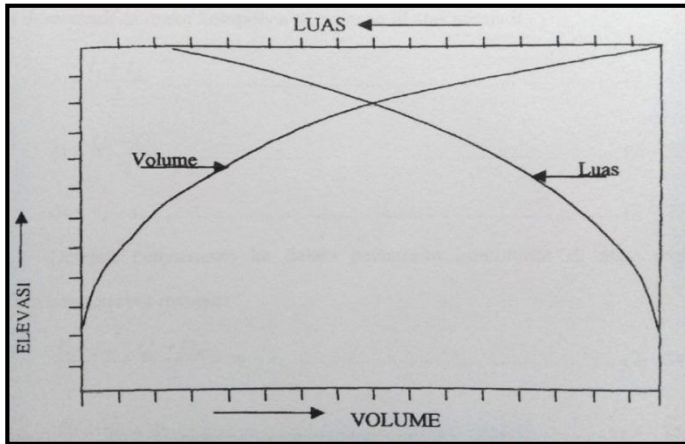
Kurva kapasitas embung merupakan grafik yang menghubungkan luas daerah genangan dan volume tampungan terhadap elevasinya. Karena fungsi utama embung adalah untuk menyediakan tampungan, maka indicator utama kinerja embung adalah kapasitas tampungan.

Perhitungan kapasitas tampungan didasarkan pada peta topografi dan beda tinggi konturnya. Kemudian dicari luas permukaan genangan embung yang dibatasi garis kontur, lalu dicari volume yang dibatasi oleh dua garis kontur yang berurutan dengan menggunakan persamaan pendekatan volume sebagai berikut (Soedibyo, 1993) :

$$V_n = \frac{1}{3} \times \Delta h \times (F_{n-1} + F_n + \sqrt{F_n \times F_{n-1}}) \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan :

- V_n = Volume genangan pada elevasi ke -n (m³)
- Δh = Beda tinggi antara dua kontur / elevasi (m)
- F_{n-1} = Luas genangan sebelum elevasi ke-n (m²)
- F_n = Luas genangan pada elevasi ke-n (m²)



Gambar 2.1. Kurva Kapasitas dan Luas Genangan Waduk

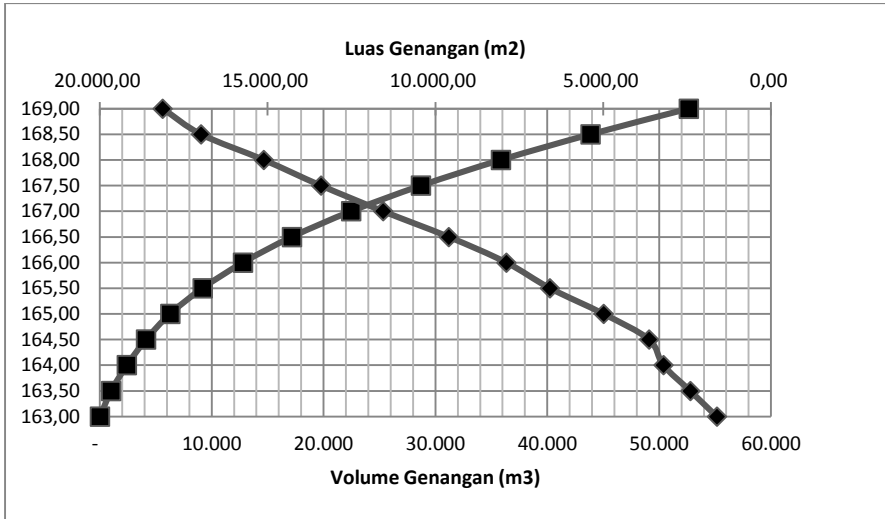
Analisa kapasitas tampungan didapatkan dari analisa peta topografi sungai. Dari analisa ini didapatkan grafik hubungan antara elevasi dengan luas dan volume suatu embung. Dalam buku ini, sebagai contoh ditampilkan hasil perhitungan dari perencanaan embung Ngluyu, Kabupaten Nganjuk, Jawa Timur.

Tabel 2.1 Hubungan antara Elevasi, Luas Genangan dan Volume Genangan Embung Ngluyu

Elevasi	Luas Genangan	Volume Genangan	Kom. Volume Genangan
(m)	(m²)	(m³)	(m³)
163.00	1,617.638	-	-
163.50	2,409.237	1,007	1,007
164.00	3,207.617	1,404	2,411
164.50	3,634.751	1,711	4,122
165.00	4,992.453	2,157	6,278
165.50	6,587.980	2,895	9,173
166.00	7,887.742	3,619	12,792
166.50	9,607.415	4,374	17,166
167.00	11,564.415	5,293	22,459

167.50	13,416.088	6,245	28,704
168.00	15,116.420	7,133	35,837
168.50	16,989.679	8,027	43,864
169.00	18,132.344	8,781	52,644

Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 2.2. Hubungan antara Elevasi, Luas Genangan dan Volume Genangan pada Embung Ngluyu

Sumber : Hasil Perhitungan

2.2.2. Kapasitas Tampungan Mati

Tampungan mati (*dead storage*) adalah volume air yang terletak di bawah permukaan genangan minimum. Air pada tampungan mati tidak dapat dimanfaatkan untuk pengoperasian embung. Dari hasil perhitungan didapatkan debit sedimen rerata/tahun sebesar 2,9465 m³/tahun, dengan umur rencana efektif embung 10 tahun, sehingga didapatkan volume *dead storage* sebesar 29,465 m³. Dari hasil interpolasi volume *dead storage* didapatkan elevasi *dead storage* ±163,01 m. Perhitungan tampungan mati selengkapnya ada pada tabel 2.2. berikut ini.

Tabel 2.2. Analisa Tampungang Mati Embung Ngluyu

Elevasi	Luas Genangan	Luas Genangan Rata-rata	Vol. Tampungang	Total Vol Tampungang	El. Dead Storage	El. Mercu Spillway
(m)	(m ²)	(m ²)	(m ³)	(m ³)	(m)	(m)
163.00	1617.64					
163.50	2409.24	2013.44	1007	1006.72		
164.00	3207.62	2808.43	1404	2410.93		
164.50	3634.75	3421.18	1711	4121.52	163,01	165,50
165.00	4992.45	4313.60	2157	6278.33		
165.50	6587.98	5790.22	2895	9173.43		
166.00	7887.74	7237.86	3619	12792.36		
166.50	9607.42	8747.58	4374	17166.15		
167.00	11564.42	10585.92	5293	22459.11		
167.50	13416.09	12490.25	6245	28704.24		
168.00	15116.42	14266.25	7133	35837.36		
168.50	16989.68	16053.05	8027	43863.89		
169.00	18132.34	17561.01	8781	52644.39		

Sumber : Hasil Perhitungan

2.2.3. Kapasitas Tampungang Efektif

Tampungang air pada embung bekerja secara efektif pada musim penghujan dan kemudian dioperasikan selama musim kemarau untuk melayani kebutuhan air baku. Total tampungang efektif Embung Ngluyu didapatkan dari potensi topografi embung tersebut. Dari gambar 4.5 Hubungan antara Elevasi, Luas Genangan dan Volume Genangan pada Embung Ngluyu, dapat diketetahui bahwa elevasi muka air normal $\pm 165,50$ m, sehingga dari hasil interpolasi didapatkan volumenya sebesar 9173,43 m³. Sehingga volume tampungang efektifnya = 9173,43 – 29,465 (volume tampungang mati) = 9143,969 m³.

2.3. Desain Tubuh Embung

2.3.1. Tinggi Embung

2.3.1.1. Tinggi Jagaan Embung

Tinggi jagaan adalah jarak vertikal antara muka air banjir dan puncak tubuh embung. Tinggi jagaan pada embung dimaksudkan untuk memberikan keamanan tubuh embung terhadap perluapan karena banjir dan menjaga limpasan air dari kemungkinan terjadinya gelombang air atau

naiknya permukaan air yang timbul akibat angin dan gempa. Tinggi jagaan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan-persamaan sebagai berikut:

1. Alternatif I

$$H_{f1} \geq \Delta h + (h_w \text{ atau } \frac{h_e}{2}) + h_a + h_i \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

2. Alternatif II

$$H_{f2} \geq h_w + \frac{h_e}{2} + h_a + h_i \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

dengan :

H_f = tinggi jagaan

Δh = tinggi kemungkinan kenaikan permukaan air waduk yang terjadi akibat timbulnya banjir abnormal

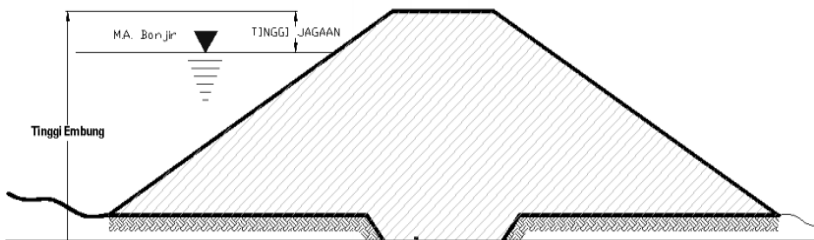
h_w = tinggi ombak akibat tiupan angin

h_e = tinggi ombak akibat gempa

h_a = tinggi kemungkinan kenaikan permukaan air waduk, apabila terjadi kemacetan-kemacetan pada pintu bangunan pelimpah.

h_i = tinggi tambahan yang didasarkan pada tingkat urgensi dari waduk

Dari persamaan-persamaan diatas dapat dipilih besarnya tinggi jagaan yang sesuai dengan embung.



Gambar 2.3 Penentuan Tinggi Jagaan (*free board*)
(Sumber : www.google.com)

Untuk mendapatkan tinggi jagaan sesuai dengan rumus diatas, maka perlu dicari nilai-nilai berikut ini :

- a. Tinggi kenaikan permukaan air yang disebabkan oleh banjir abnormal (Δh) dihitung berdasarkan persamaan berikut ini :

$$\Delta h = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha Q_0}{Q} \cdot \frac{h}{1 + \frac{A \times h}{Q \times T}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dengan :

Q_0 = debit banjir rencana (m^3/det)

Q = kapasitas rencana (m^3/det)

$\alpha = 0,2$ untuk bangunan pelimpah terbuka

$\alpha = 1,0$ untuk bangunan pelimpah tertutup

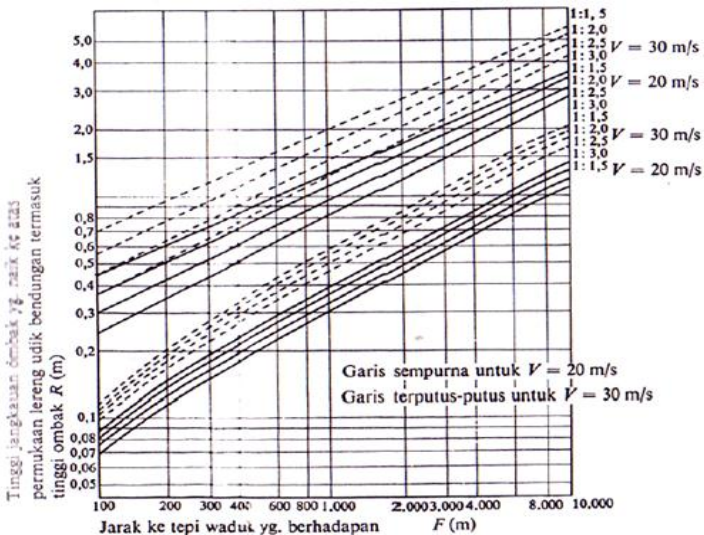
h = kedalaman pelimpah rencana (m)

A = luas permukaan air waduk pada elevasi banjir rencana (km^2)

T = durasi terjadinya banjir abnormal (1 s/d 3 jam)

- b. Tinggi ombak yang disebabkan oleh angin (h_w)

Tinggi ombak yang disebabkan oleh angin ini perhitungannya dipengaruhi oleh panjangnya lintasan ombak (F) dan kecepatan angin diatas permukaan air waduk. Perhitungan panjang lintasan ombak (h_w) ini menggunakan grafik metode SMB yang dikombinasikan dengan metode Saville.



Gambar 2.4 Grafik Perhitungan Metode SMB
(Sumber : Suyono Sosrodarsono, 1989)

- a. Tinggi ombak yang disebabkan oleh gempa (h_e), perhitungannya menggunakan tabel-tabel berikut ini :

Tabel 2.3 Faktor Koreksi

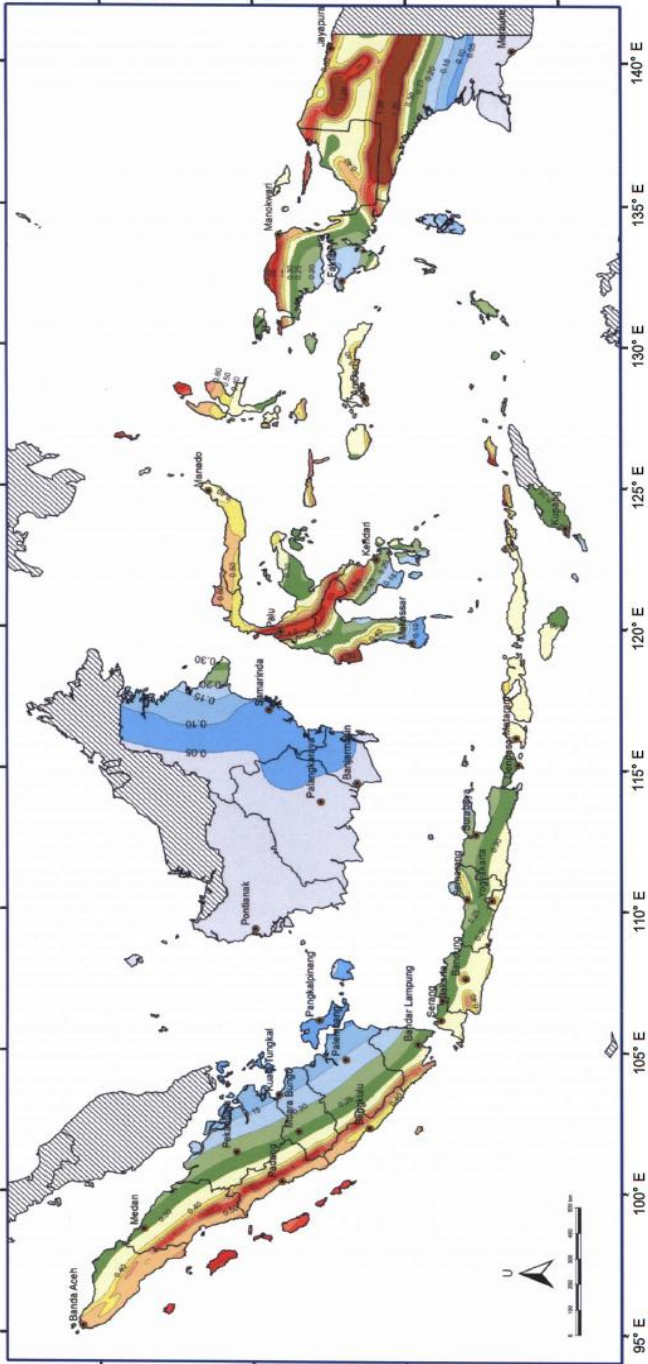
Tipe Batuan	Faktor (V)
Rock Foundation	0,9
Divilium (Rock Fill Dam)	1,0
Aluvium	1,1
Soft Aluvium	1,2

Sumber : Suyono Sosrodarsono, 1989

Tabel 2.9 Percepatan Dasar Gempa

Periode Ulang (tahun)	Percepatan Dasar Gempa (A_c) (cm/dt^2)
10	98,42
20	119,63
50	151,72
100	181,21
200	215,81
500	271,35
1000	322,35
5000	482,80
10000	564,54

Sumber : Suyono Sosrodarsono, 1989



Gambar 2.7 Peta Zonasi Gempa Indonesia Dengan Nilai Koefisien Gempa
 (Sumber : Kementerian Pekerjaan Umum)

- b. Kenaikan permukaan air waduk yang disebabkan oleh ketidaknormalan operasi pintu bangunan (h_a).
Nilai (h_a) ditentukan sebesar = 0,5 m (Suyono Sosrodarsono, 1989)
- c. Angka tambahan tinggi jagaan yang didasarkan pada tipe embung (h_i).

Mengingat limpasan melalui mercu embung sangat riskan, maka untuk embung tip urugan tanah, tipe ini angka tambahan tinggi jagaan (h_i) ditentukan sebesar 1,0 m (Suyono Sosrodarsono, 1989)

Sebelum menghitung tinggi jagaan (H_f) Embung Ngluyu, harus diketahui nilai-nilai berikut ini terlebih dahulu :

- a. Tinggi Kenaikan Permukaan Air yang Disebabkan oleh Banjir Abnormal (Δh)

$$\Delta h = \frac{2}{3} \times \frac{\alpha Q_0}{Q} \times \frac{h}{1 + \frac{Ah}{QT}}$$

$$\Delta h = \frac{2}{3} \times \frac{0,2 \times 13,213}{9,693} \times \frac{2,49}{1 + \frac{0,007887 \times 2,49}{9,693 \times 3}}$$

$$\Delta h = 0,453 \text{ m}$$

- b. Tinggi Ombak yang Disebabkan oleh Angin (h_w)
Tinggi ombak yang disebabkan oleh angin pada bangunan embung, pengaruhnya kecil, sehingga diasumsikan nilai $h_w = 0,025 \text{ m}$.
- c. Tinggi Ombak yang Disebabkan oleh Gempa (h_e)
Data-data yang diperlukan untuk perhitungan tinggi ombak yang disebabkan oleh gempa antara lain : koefisien gempa (z) = 0,8 ; percepatan dasar gempa (A_c) = 151,72 cm/dt² ; faktor koreksi (V) = 1,1 ; percepatan gravitasi (g) = 980 cm/ dt². Perhitungan intensitas seismis *horizontal* dihitung adalah sebagai berikut :

$$e = z \cdot A_c \cdot \frac{V}{g}$$

$$e = 0,8 \times 151,72 \times \left(\frac{1}{980} \right)$$

$$e = 0,124$$

Sedangkan tinggi ombak yang disebabkan oleh gempa adalah sebagai berikut :

$$h_0 = \frac{e \cdot \tau}{\pi} \sqrt{g \cdot h_0}$$

$$\begin{aligned}
h_0 &= \text{kedalaman air di dalam embung} \\
&= \text{elevasi HWL} - \text{elevasi dasar kolam} \\
&= +166 - (+163) \\
&= +3 \text{ m} \\
&= \frac{0,124 \times 1}{3,14} \sqrt{9,8 \times 7,99} = 0,349 \text{ m}
\end{aligned}$$

Sehingga, tinggi puncak ombak di atas permukaan air rata-rata ($\frac{h_e}{2}$)
 $= 0,175 \text{ m}$

d. Kenaikan Permukaan Air Embung yang Disebabkan oleh Ketidaknormalan Operasi Pintu Bangunan (h_a)
 Kenaikan permukaan air embung yang disebabkan oleh ketidaknormalan operasi pintu bangunan sebagai standar biasanya diambil $h_a = 0,5 \text{ m}$ (Suyono Sosrodarsono, 1981).

e. Angka Tambahan Tinggi Jagaan yang Didasarkan pada Tipe Bendungan (h_i)
 Limpasan melalui mercu embung embung urugan akan sangat berbahaya, maka untuk bendungan type ini angka tambahan tinggi jagaan (h_i) diambil sebesar 1,0 m (Suyono Sosrodarsono, 1981).

Berdasarkan data-data perhitungan diatas, yaitu :

$$\Delta h = 0,453 \text{ m}$$

$$h_w = 0,025 \text{ m}$$

$$\frac{h_e}{2} = 0,175 \text{ m}$$

$$h_a = 0,5 \text{ m}$$

$$h_i = 1,0 \text{ m}$$

Maka tinggi jagaan dapat ditentukan dengan hasil sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
H_f &= 0,453 + 0,025 + 0,5 + 1,0 \\
&= 1,978 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_f &= 0,453 + 0,175 + 0,5 + 1,0 \\
&= 2,128 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_f &= 0,025 + 0,175 + 0,5 \\
&= 0,7 \text{ m}
\end{aligned}$$

Dari ketiga alternatif tinggi jagaan tersebut, diambil tinggi jagaan dengan angka tertinggi yaitu 2,218 m.

2.3.1.1. Total Tinggi Embung

Tinggi tubuh embung harus ditentukan dengan mempertimbangkan kebutuhan tampungan air dan keamanan tubuh embung terhadap perluapan air banjir. Dengan demikian tinggi tubuh embung sebesar tinggi tampungan banjir dan tinggi jagaan (H_f) ditambah penambahan tinggi timbunan akibat penurunan. (Suyono Sosrodarsono,1989).

$$H = H_{mercu\ spillway} + H_{banjir} + H_{jagaan} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dari hasil perhitungan tinggi jagaan diatas, selanjutnya dapat diketahui besarnya tinggi embung yaitu sebagai berikut ini :

$$\begin{aligned} H &= H_{mercu\ spillway} + H_{banjir} + H_{jagaan} \\ &= 2,5 + 1,2 + 2,218 \\ &= 5,918\ m \end{aligned}$$

2.3.2. Kemiringan Lereng Embung

Kemiringan lereng harus ditentukan sedemikian rupa agar stabil terhadap longsoran. Hal ini sangat tergantung pada jenis material urugan yang dipakai. Kestabilan urugan harus diperhitungkan terhadap surut cepatnya muka air kolam rembesan dan harus tahan terhadap gempa.

Kemiringan lereng Embung Ngluyu ditentukan berdasarkan tabel 2.4 Kemiringan Lereng yang Dianjurkan, untuk tipe urugan tanah homogen yaitu bagian hulu 1: 3 dan bagian hilir 1: 3, sedangkan untuk tipe urugan tanah zonal yaitu bagian hulu 1 : 1,25 dan bagian hilir 1 : 1,75.

Tabel 2.4 Kemiringan Lereng yang Dianjurkan

Material Urugan	Materian Utama	Vertikal : Horizontal	
		Hulu	Hilir
A. Urugan Homogen	CH	1 : 3	1 : 3
	CL		
	SC		
	GC		
	GM		
	SM		
B. Urugan Majemuk a. Urugan batu dengan inti lempung atau dinding diafragma	Pecahan Batu	1 : 1,50	1 : 1,25

b. Kerikil-kerikil dengan inti lempung atau dinding diafragma	Kerikil-kerakal	1 : 2,50	1 : 1,75
---	-----------------	----------	----------

Sumber: Suyono Sosrodarsono, 1989

2.3.3. Lebar Mercu Embung

Lebar mercu dari embung tipe urugan ditentukan berdasarkan pertimbangan sebagai berikut ini :

- Bahan timbunan asli (alam) dan jarak minimum garis rembesan melalui timbunan pada elevasi muka air normal.
- Pengaruh tekanan gelombang di bagian permukaan lereng hulu.
- Tinggi dan tingkat kepentingan dari konstruksi bendungan.
- Kemungkinan puncak bendungan untuk jalan penghubung.
- Pertimbangan praktis dalam pelaksanaan konstruksi.

Rumus yang digunakan untuk menentukan lebar puncak pada bendungan urugan persamaan berikut ini (Suyono Sosrodarsono, 1989):

$$b = 3,6H^{1/3} - 3,0 \dots\dots\dots (2.6)$$

Dengan :

b = lebar puncak (meter)

H = tinggi bendungan (meter)

Untuk bendungan-bendungan kecil (Embung), yang di atasnya akan dimanfaatkan untuk jalan raya, lebar minimumnya adalah 4 meter, sementara untuk jalan biasa cukup 2,5 meter. Lebar bendungan kecil dapat digunakan pedoman dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2.11 Lebar Puncak Bendungan Kecil (Embung) yang Dianjurkan

Tinggi Embung (m)	Lebar Puncak (m)
2,0 – 4,5	2,50
4,5 – 6,0	2,75
6,0 – 7,5	3,00
7,5 – 9,0	4,00

Sumber: Suyono Sosrodarsono, 1989

Lebar mercu Embung Ngluyu dapat ditentukan dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 b &= 3,6(H^{1/3}) - 3,0 \\
 &= 3,6 \times 5,918^{1/3} - 3,0 \\
 &= 3,512 \text{ m}
 \end{aligned}$$

2.4. Formasi Garis Depresi dan Jaringan Trayektori Aliran Filtrasi

Air di dalam kolam embung akan meresap masuk kedalam pori atau rongga di dasar dan dinding kolam embung. Besarnya resapan ini tergantung dari sifat lulus air material dasar dan dinding kolam. Sedangkan sifat ini tergantung pada jenis butiran tanah atau struktur batu pembentuk dasar dan dinding kolam. Besarnya rembesan dapat diperkirakan dengan menggunakan sekelompok garis aliran dan garis ekipotensial disebut jaringan trayektori aliran filtrasi (*seepage flow-net*).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk membuat jaringan trayektori aliran filtrasi pada bendungan urugan dan metode yang paling sesuai dan sederhana adalah metode grafis yang diperkenalkan oleh Forchheimer (*Forchheimer's diagram atical solution*).

Garis ekipotensial adalah garis-garis yang mempunyai tinggi energi potensial yang sama (h konstan). Permaebilitas lapisan lolos air dianggap isotropis ($k_x = k_z = k$). Dalam penggambaran jaring arus, garis aliran dan garis ekipotensial di gambarkan secara coba-coba (*trial and error*).

Flow net mempunyai sifat sebagai berikut :

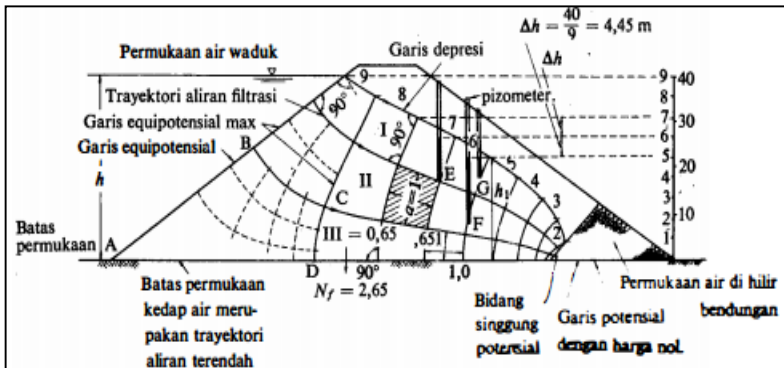
- a. Semua garis aliran dan semua garis ekipotensial saling berpotongan tegak lurus membentuk kotak-kotak bujur sangkar.
- b. Selisih potensial antara 2 garis ekipotensial yang berurutan selalu sama (Δh).

Debit yang lewat setiap alur satuan meter lebar menjadi :

$$Q = \frac{N_f}{N_e} \times k \times H \dots\dots\dots(2.7)$$

dengan :

- Q = debit rembesan persatuan lebar
- k = koefisien permeabilitas
- H = kedalaman air
- N_f = jumlah garis aliran
- N_d = jumlah penurunan dari garis ekipotensial



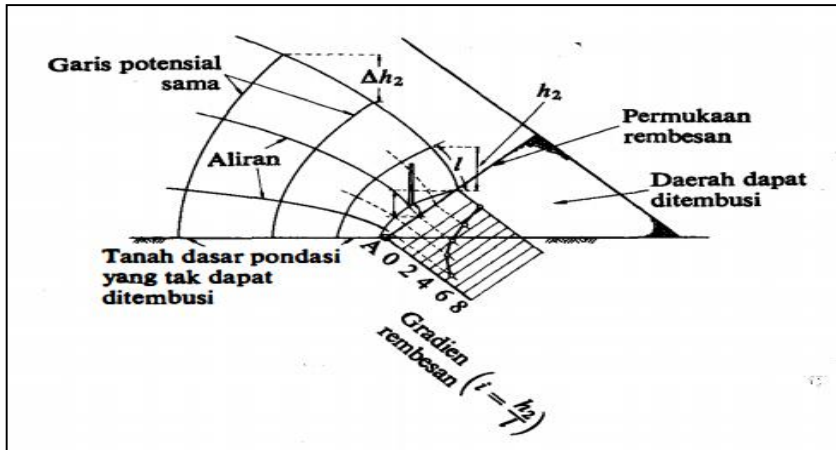
Gambar 2.5 Jaringan Trayektori Aliran Filtrasi Dalam Tubuh Bendungan (dengan jumlah potensial = 9)

(Sumber : Suyono Sosrodarsono, 1989)

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

- Trayektori aliran filtrasi dengan garis equi-potensial berpotongan secara tegak lurus, sehingga akan membentuk bidang-bidang yang mendekati bentuk-bentuk bujur sangkar atau persegi panjang.
- Jadi apabila diperhatikan bentuk bidang ABCD (gambar 2.5) hanya mendekati bentuk bujur sangkar, akan tetapi apabila dibagi-bagi lagi menjadi bagian yang lebih kecil, maka bentuk bujur sangkarnya akan semakin nyata.
- Biasanya bidang-bidang yang terbentuk oleh pertolongan trayektori aliran filtrasi 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 sisi panjangnya mendekati harga yang sama.
- Pada bidang di bawah tekanan atmosfer, dengan aliran filtrasi tersembul keluar, bukan merupakan trayektori aliran filtrasi dan bukan pula merupakan garis equi-potensial, karenanya tidak akan terbentuk bidang-bidang berbentuk persegi panjang dan trayektori aliran filtrasi dengan permukaan tersebut tidak akan berpotongan secara vertikal.
- Garis depresi yang berpotongan dengan bidang di bawah tekanan atmosfer (titik tertinggi tersembulnya aliran filtrasi), tertera pada gambar 2.6

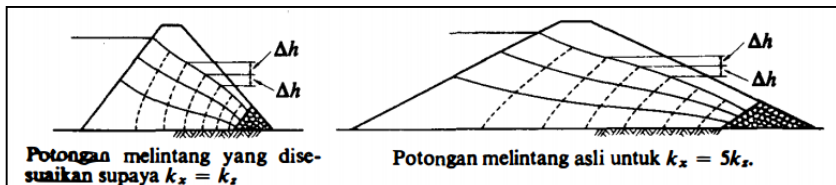
- f. Titik perpotongan antara garis-garis equi-potensial dengan garis depresi adalah dengan interval (lh) yang diperoleh dengan membagi tinggi tekanan air (perbedaan antara elevasi permukaan air dalam waduk dan permukaan air di bagian hilir bendungan) dengan suatu bilangan integer (bilangan bulat).



Gambar 2.9 Gradian rembesan

(Sumber : Suyono Sosrodarsono, 1989)

Jaringan trayektori aliran filtrasi digambar sebagai bidang-bidang persegi panjang yang sisi horizontalnya diperpendek sebesar $\sqrt{k_v/k_h}$ kali.



Gambar 2.10 Tubuh Bendungan (dimana $k_x = 5k_z$)

(Sumber : Suyono Sosrodarsono, 1989)

2.4.1. Formasi Garis Depresi dan Jaringan Trayektori Aliran Filtrasi Tubuh Embung Tipe Urugan Homogen

Dari elevasi muka air banjir pada tubuh embung urugan homogen dapat ditentukan nilai $h = 3,7$ m; $l_1 = 11,1$ m ; $l_2 = 28,4$ m, $\alpha = 18^\circ$. Sehingga didapatkan:

$$d = 0,31 l_1 + l_2 = (0,3 \times 11,1) + 28,4 = 31,73 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} Y_0 &= \sqrt{h^2 + d^2} - d \\ &= \sqrt{(3,7)^2 + (31,73)^2} - (31,73) \\ &= 0,215 \text{ m} \end{aligned}$$

Untuk parabola bentuk dasarnya adalah sebagai berikut :

$$y = \sqrt{2y_0 \cdot x + y_0^2} = \sqrt{2 \times 0,215 x + 0,215^2}$$

x (m)	0	5	10	15	20	25	30	31,73
y (m)	0,215	1,482	2,085	2,549	2,940	3,286	3,598	3,700

Untuk $\alpha = 18^\circ$, harga $a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\left(\frac{d}{\cos \alpha}\right)^2 - \left(\frac{h}{\sin \alpha}\right)^2}$ maka dapat ditentukan nilai :

$$a + \Delta_\alpha = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha} = \frac{0,215}{0,049} = 4,388 \text{ m}$$

$$a = \frac{31,73}{\cos 18} - \sqrt{\left(\frac{31,73}{\cos 18}\right)^2 - \left(\frac{3,7}{\sin 18}\right)^2} = 2,223 \text{ m}$$

Sehingga didapatkan nilai :

$$a = 2,223 \text{ m} , \text{ jarak A - C}$$

$$\Delta_\alpha = 4,388 - 2,223 = 2,165 \text{ m, jarak C - C}_0$$

2.4.2. Formasi Garis Depresi dan Jaringan Trayektori Aliran Filtrasi Tubuh Embung Tipe Urugan Zonal dengan Inti Kedap Air Tegak (Vertikal)

A. Garis Depresi pada Zona Lulus Air (Agregat Kasar)

Dari elevasi muka air banjir pada tubuh embung urugan zonal bagian zona lulus air, dapat ditentukan nilai $h = 3,7 \text{ m}$; $l_1 = 9,282 \text{ m}$; $l_2 = 19,718 \text{ m}$, $\alpha = 22^\circ$. Sehingga didapatkan :

$$d = 0,31 l_1 + l_2 = (0,3 \times 9,282) + 19,718 = 22,503 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} Y_0 &= \sqrt{h^2 + d^2} - d \\ &= \sqrt{(3,7)^2 + (22,503)^2} - (22,503) \\ &= 0,302 \text{ m} \end{aligned}$$

Untuk parabola bentuk dasarnya adalah sebagai berikut :

$$y = \sqrt{2y_0 \cdot x + y_0^2} = \sqrt{2 \times 0,302 x + 0,302^2}$$

Sehingga dapat diperoleh koordinat parabola sebagai berikut ini :

x (m)	0	5	10	15	20	22,503
y (m)	0,302	1,764	2,476	3,025	3,489	3,699

Untuk $\alpha = 22^\circ$, harga $a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\left(\frac{d}{\cos \alpha}\right)^2 - \left(\frac{h}{\sin \alpha}\right)^2}$ maka dapat ditentukan nilai :

$$a + \Delta_\alpha = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha} = \frac{0,302}{0,073} = 4,147 \text{ m}$$

$$a = \frac{22,503}{\cos 22} - \sqrt{\left(\frac{22,503}{\cos 22}\right)^2 - \left(\frac{3,7}{\sin 22}\right)^2} = 2,096 \text{ m}$$

Sehingga didapatkan nilai :

$$a = 2,096 \text{ m}, \text{ jarak A - C}$$

$$\Delta_\alpha = 4,147 - 2,096 = 2,051 \text{ m}, \text{ jarak C - C}_0$$

B. Garis Depresi pada Zona Kedap Air (Agregat Halus)

Dari elevasi muka air banjir pada tubuh embung urugan zonal bagian zona kedap air, dapat ditentukan nilai $h = 3,004 \text{ m}$; $l_1 = 0,9925 \text{ m}$; $l_2 = 5,762 \text{ m}$, $\alpha = 75^\circ$. Sehingga didapatkan :

$$d = 0,31 l_1 + l_2 = (0,3 \times 0,9925) + 5,762 = 6,060 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} Y_0 &= \sqrt{h^2 + d^2} - d \\ &= \sqrt{(3,004)^2 + (6,060)^2} - (6,060) \\ &= 0,704 \text{ m} \end{aligned}$$

Untuk parabola bentuk dasarnya adalah sebagai berikut :

$$y = \sqrt{2y_0 \cdot x + y_0^2} = \sqrt{2 \times 0,704 x + 0,704^2}$$

Sehingga dapat diperoleh koordinat parabola sebagai berikut ini :

x (m)	0	1	2	3	4	5	6	6,060
y (m)	0,704	1,380	1,820	2,172	2,475	2,745	2,991	3,004

Untuk $\alpha = 75^\circ$, $c = \frac{a}{a+\Delta a} = 0,28$, maka dapat ditentukan nilai :

$$a + \Delta a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha} = \frac{0,704}{0,741} = 0,950 \text{ m}$$

$$0,28 = \frac{\Delta a}{0,950}$$

Sehingga didapatkan nilai :

$$a = 0,28 \times 0,950 = 0,266 \text{ m}, \text{ jarak A - C}$$

$$\Delta a = 0,950 - 0,266 = 0,684 \text{ m}, \text{ jarak C - C}_0$$

2.5. Debit Aliran Filtrasi (Rembesan) pada Tubuh Embung

2.5.1. Perhitungan Debit Aliran Filtrasi (Rembesan) pada Tubuh Embung Tipe Urugan Homogen

Dari gambar Jaringan Trayektori Aliran Filtrasi (*Seepage Flownet*) Tubuh Embung Tipe Urugan Homogen, dapat diketahui bahwa nilai

$N_f = 3$; $N_e = 24$; $H = 3,7$ m; $L = 39,5$ m dan dari uji mekanika tanah didapatkan nilai $k = 2,582 \times 10^{-5}$ cm/det atau $2,582 \times 10^{-7}$ m/det. Maka debit aliran filtrasi (rembesan) pada tubuh embung tipe urugan homogen adalah sebesar :

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{N_f}{N_e} \times k \times H \times L \\
 &= \frac{3}{24} \times (2,582 \cdot 10^{-7}) \times 3,700 \times 39,50 \\
 &= 4,716 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det} \\
 &= 4,716 \times 10^{-6} \times (24 \times 60 \times 60) \\
 &= 0,407 \text{ m}^3/\text{hari}
 \end{aligned}$$

Kapasitas aliran filtrasi yang diijinkan adalah 2% - 5% dari volume tampungan waduk (Soedibyo, 1993) :

$$\begin{aligned}
 Q_{ijin} &= 5\% \times \text{volume tampungan efektif} \\
 &= 0,05 \times 9143,969 \\
 &= 457,1985 \text{ m}^3/\text{det} \\
 &= \frac{457,1985}{(24 \times 60 \times 60)} = 0,005292 \text{ m}^3/\text{hari}
 \end{aligned}$$

Dari aliran filtrasi yang terjadi $Q = 0,407 \text{ m}^3/\text{hari} > Q_{f_{ijin}} = 0,005292 \text{ m}^3/\text{hari}$, sehingga stabilitas embung urugan homogen terhadap aliran filtrasi dalam kondisi aman.

2.5.2. Perhitungan Debit Aliran Filtrasi (Rembesan) pada Tubuh Embung Tipe Urugan Zonal

a. Zona Lulus Air (Agregat Kasar)

Dari gambar Jaringan Trayektori Aliran Filtrasi (*Seepage Flownet*) Tubuh Embung Tipe Urugan Zonal dengan Inti Kedap Air Vertikal, pada bagian zona lulus air dapat diketahui bahwa nilai $N_f = 3$; $N_e = 4$; $H = 3,7$ m; $L = 13,527$ m dan dari uji mekanika tanah didapatkan nilai $k = 1,068 \times 10^{-5}$ cm/det atau $1,068 \times 10^{-7}$ m/det. Maka debit aliran filtrasi (rembesan) pada tubuh embung tipe urugan homogen adalah sebesar :

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{N_f}{N_e} \times k \times H \times L \\
 &= \frac{3}{9} \times (1,068 \cdot 10^{-7}) \times 3,700 \times 13,527 \\
 &= 4,009 \times 10^{-6} m^3/det \\
 &= 4,009 \times 10^{-6} \times (24 \times 60 \times 60) \\
 &= 0,346 m^3/hari
 \end{aligned}$$

Kapasitas aliran filtrasi yang diijinkan adalah 2% - 5% dari volume tampungan waduk (Soediby, 1993) :

$$\begin{aligned}
 Q_{ijin} &= 5\% \times volume\ tampungan\ efektif \\
 &= 0,05 \times 9143,969 \\
 &= 457,1985 m^3/det \\
 &= \frac{457,1985}{(24 \times 60 \times 60)} = 0,005292 m^3/hari
 \end{aligned}$$

Dari aliran filtrasi yang terjadi $Q = 0,346 m^3/hari > Q_{ijin} = 0,005292 m^3/hari$, sehingga stabilitas embung urugan zona lulus air pada terhadap aliran filtrasi dalam kondisi aman.

b. Zona Kedap Air (Agregat Halus)

Dari gambar Jaringan Trayektori Aliran Filtrasi (*Seepage Flownet*) Tubuh Embung Tipe Urugan Zonal dengan Inti Kedap Air Vertikal, pada bagian zona kedap air dapat diketahui bahwa nilai $N_f = 3$; $N_e = 7$; $H = 3,004$ m; $L = 6,754$ m dan dari uji mekanika tanah didapatkan nilai $k = 9,685 \times 10^{-6}$ cm/det atau $9,685 \times 10^{-8}$ m/det. Maka debit aliran filtrasi (rembesan) pada tubuh embung tipe urugan homogen adalah sebesar :

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{N_f}{N_e} \times k \times H \times L \\
 &= \frac{3}{7} \times (9,685 \cdot 10^{-7}) \times 3,004 \times 6,755 \\
 &= 8,421 \times 10^{-7} m^3/det \\
 &= 8,421 \times 10^{-7} \times (24 \times 60 \times 60) \\
 &= 0,0728 m^3/hari
 \end{aligned}$$

Kapasitas aliran filtrasi yang diijinkan adalah 2% - 5% dari volume tampungan waduk (Soediby, 1993) :

$$\begin{aligned}
Q_{ijin} &= 5\% \times \text{volume tampungan efektif} \\
&= 0,05 \times 9143,969 \\
&= 457,1985 \text{ m}^3/\text{det} \\
&= \frac{457,1985}{(24 \times 60 \times 60)} = 0,005292 \text{ m}^3/\text{hari}
\end{aligned}$$

Dari aliran filtrasi yang terjadi $Q = 0,0728 \text{ m}^3/\text{hari} > Q_{f_{ijin}} = 0,005292 \text{ m}^3/\text{hari}$, sehingga stabilitas embung urugan zona lulus air pada terhadap aliran filtrasi dalam kondisi aman.

2.6. Stabilitas Lereng Tubuh Embung

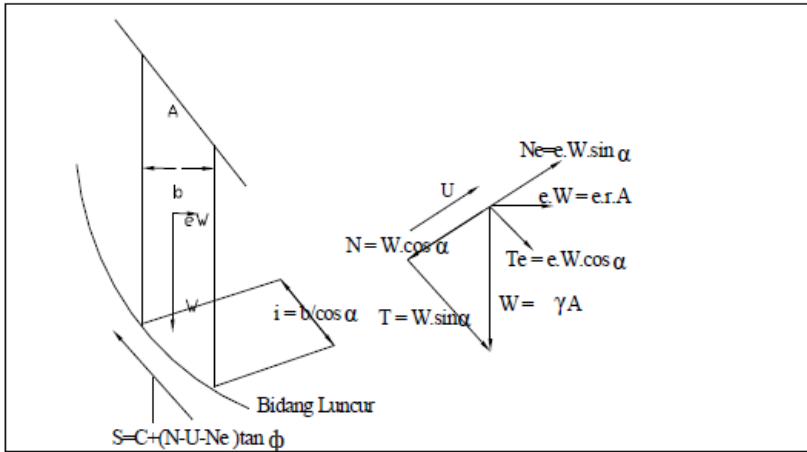
Stabilitas lereng embung urugan dapat dihitung menggunakan metode irisan bidang luncur bundar yang didasarkan pada bidang longsor bentuk lingkaran. Faktor keamanan dari kemungkinan terjadinya longsor dapat diperoleh dengan menggunakan rumus keseimbangan sebagai berikut (Soediby, 1993) :

$$\begin{aligned}
F_s &= \frac{\sum\{C.l+(N-U-Ne)\tan\phi\}}{\sum(T+Te)} \\
&= \frac{\sum C.l+\sum\{\gamma.A(\cos\alpha-e.\sin\alpha)-V\}\tan\phi}{\sum \gamma.A(\sin\alpha+e.\cos\alpha)} \dots\dots\dots(2.8)
\end{aligned}$$

Dengan :

- F_s = faktor keamanan
- N = beban komponen vertikal yang timbul dari berat setiap irisan bidang luncur (= $\gamma . A . \cos \alpha$)
- T = beban komponen tangensial yang timbul dari berat setiap irisan bidang luncur (= $\gamma . A . \sin \alpha$)
- U = tekanan air pori yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur
- Ne = komponen vertikal beban seismic yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur (= $e . \gamma . A . \sin \alpha$)
- Te = komponen tangensial beban seismic yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur (= $e . \gamma . A . \cos \alpha$)
- ϕ = sudut gesekan dalam bahan yang membentuk dasar setiap irisan bidang luncur.
- C = Angka kohesi bahan yang membentuk dasar setiap irisan bidang luncur
- e = intensitas seismic horizontal
- γ = berat isi dari setiap bahan pembentuk irisan bidang luncur

- A = luas dari setiap bahan pembentuk irisan bidang luncur
- α = sudut kemiringan rata-rata dasar setiap irisan bidang luncur
- V = tekanan air pori



Gambar 2.11 Cara menentukan harga-harga N dan T

(Sumber : Suyono Sosrodarsono, 1989)

Prosedur perhitungan metode irisan bidang luncur bundar (Soedibyo, 1993):

1. Andaikan bidang luncur bundar dibagi menjadi beberapa irisan vertikal dan walaupun bukan merupakan persyaratan yang mutlak, biasanya setiap irisan lebarnya dibuat sama. Disarankan agar irisan bidang luncur tersebut dapat melintasi perbatasan dari dua buah zone penimbunan atau supaya memotong garis depresi aliran filtrasi.
2. Gaya-gaya yang bekerja pada setiap irisan adalah sebagai berikut :
 - a. Berat irisan (W), dihitung berdasarkan hasil perkalian antara luas irisan (A) dengan berat isi bahan pembentuk irisan (γ), jadi $W = A \cdot \gamma$.
 - b. Beban berat komponen vertikal yang pada dasar irisan (N) dapat diperoleh dari hasil perkalian antara berat irisan (W) dengan cosinus sudut rata-rata tumpuan (α) pada dasar irisan yang bersangkutan jadi $N = W \cdot \cos \alpha$
 - c. Beban dari tekanan hidrostatis yang bekerja pada dasar irisan (U) dapat diperoleh dari hasil perkalian antara panjang dasar irisan (b) dengan tekanan air rata-rata ($U / \cos \alpha$) pada dasar irisan tersebut, jadi $U = \frac{U \cdot b}{\cos \alpha}$

- d. Berat beban komponen tangensial (T) diperoleh dari hasil perkalian antara berat irisan (W) dengan sinus sudut rata-rata tumpuan dasar irisan tersebut jadi $T = W \sin \alpha$
 - e. Kekuatan tahanan kohesi terhadap gejala peluncuran (C) diperoleh dari hasil perkalian antara angka kohesi bahan (c') dengan panjang dasar irisan (b) dibagi lagi dengan $\cos \alpha$, jadi $C = \frac{c'.b}{\cos \alpha}$
3. Kekuatan tahanan geseran terhadap gejala peluncuran irisan adalah kekuatan tahanan geser yang terjadi pada saat irisan akan meluncur meninggalkan tumpuannya.
 4. Kemudian jumlahkan semua kekuatan-kekuatan yang menahan (T) dan gaya-gaya yang mendorong (S) dari setiap irisan bidang luncur, dengan T dan S dari masing-masing irisan dinyatakan sebagai $T = W \sin \alpha$ dan $S = C + (N - U) \tan \phi$
 5. Faktor keamanan dari bidang luncur tersebut adalah perbandingan antara jumlah gaya pendorong dan jumlah gaya penahan yang dirumuskan :

$$F_s = \frac{\sum S}{\sum T} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dengan :

- F_s = faktor aman
- $\sum S$ = jumlah gaya pendorong
- $\sum T$ = jumlah gaya penahan

Stabilitas lereng embung urugan dihitung menggunakan metode irisan bidang luncur bundar yang didasarkan pada bidang longsor bentuk lingkaran. Dari hasil pengujian tanah didapatkan data berupa : $\gamma_{dry} = 2,040 \text{ gr/cm}^3$ dan $\gamma_{wet} = 2,550 \text{ gr/cm}^3$. Untuk menentukan aman atau tidaknya pada stabilitas lereng tubuh embung, dapat dilihat dari nilai faktor keamanan (F_s), apabila nilai $F_s \geq 1,2$, maka lereng tubuh embung dianggap aman, sedangkan apabila $F_s < 1,2$, maka lereng tubuh embung dianggap tidak aman. Perhitungan stabilitas lereng tubuh embung pada 2 alternatif perencanaan tubuh embung adalah sebagai berikut:

Tabel 2.14 Analisa Stabilitas Lereng pada Tubuh Embung Urugan Homogen

No	A	W	sin α	cos α	T	N	Ne	U	Tan θ	(N-Ne-U) tan θ	C . L
	(m ²)	(t/m)			(t/m)	(t/m)	(t/m)	(t/m)		(t/m)	(t/m)
1	1.704	3.475	0.242	0.970	0.841	3.372	0.084	0.104	0.500	1.592	4.204
2	3.076	6.276	0.375	0.927	2.351	5.819	0.235	0.278	0.500	2.653	4.614
	1.555	3.966									
3	2.041	4.164	0.545	0.839	2.268	3.492	0.227	0.111	0.500	1.577	4.956
	3.672	9.363									
4	0.481	0.982	0.695	0.719	0.682	0.706	0.068		0.500	0.319	5.342
	5.266	13.429									
5	5.667	14.451	0.848	0.530	12.255	7.658	1.226		0.800	5.146	5.654
6	4.808	12.259	0.951	0.309	11.659	3.788	1.166		0.800	2.098	5.935
7	3.325	8.477	0.998	0.070	8.457	0.591	0.846		0.800	-0.203	6.131
8	1.167	2.976	0.978	-0.208	2.911	-0.619	0.291		0.800	-0.728	6.543
Jumlah					41.424	24.808	4.142	0.493		12.453	43.379

Sumber : Hasil Perhitungan

Dari tabel tersebut maka dapat dihitung nilai F_s dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 F_s &= \frac{C \cdot l + (N - U - N_e) \times \tan\theta}{(T - T_e)} \\
 &= \frac{43,379 + 12,453}{41,424 + 0,10 \times 24,808}
 \end{aligned}$$

$$= 1,272$$

$$F_s = 1,272 > 1,2$$

Karena nilai $F_s > 1,2$ maka lereng tubuh embung urungan homogen dianggap aman.

Tabel 2.14 Analisa Stabilitas Lereng pada Tubuh Embung Urungan Zonal

No	A	W	sin a	cos a	T	N	Ne	U	tan e	$\frac{(N-N_e-U)}{\tan e}$	C . L
	(m ²)	(t/m)			(t/m)	(t/m)	(t/m)	(t/m)		(t/m)	(t/m)
1	1.755	3.580	0.292	0.956	1.047	3.424	0.105	0.121	0.500	1.599	4.211
2	2.938	5.994	0.438	0.899	2.627	5.387	0.263	0.304	0.500	2.410	4.501
	1.246	3.177									
3	1.826	3.725	0.588	0.809	2.190	3.014	0.219	0.101	0.500	1.347	4.934
	3.207	8.178									
4	0.647	1.320	0.731	0.682	0.965	0.900	0.097		0.500	0.402	5.302
	4.545	11.590									
5	4.659	11.880	0.866	0.500	10.289	5.940	1.029		0.800	3.929	5.623
6	3.987	10.167	0.956	0.292	9.723	2.972	0.972		0.800	1.600	5.945
7	2.716	6.926	1.000	0.017	6.925	0.121	0.692		0.800	-0.457	6.290
8	1.007	2.568	0.956	-0.292	2.456	-0.751	0.246		0.800	-0.797	6.301
Jumlah					36.221	21.007	3.622	0.526		10.033	43.107

Sumber : Hasil Perhitungan

Dari tabel tersebut maka dapat dihitung nilai F_s dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 F_s &= \frac{C \cdot l + (N - U - N_e) \times \tan \theta}{(T - T_e)} \\
 &= \frac{35,607 + 10,033}{43,107 + 0,10 \times 21,007} \\
 &= 1,387
 \end{aligned}$$

$$F_s = 1,387 > 1,2$$

Karena nilai $F_s > 1,2$ maka lereng tubuh embung urugan zonal dianggap aman.

2.7. Pemilihan Type Susunan Material Terbaik

Pemilihan Type Susunan Materian yang paling sesuai dilakukan dengan indicator kemampuan tubuh embung mereduksi debit rembesan air. Indikator ini sangat penting, mengingat :

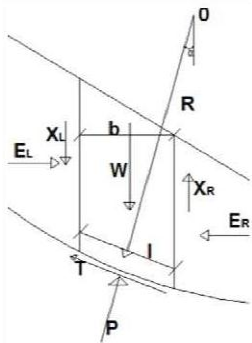
1. Fungsi utama embung adalah menyimpan sementara air di waduk
2. Rembesan air pada tubuh embung yang melebihi batasan standard maksimum akan membawa butiran material tubuh embung type urugan. Hal ini jika terjadi maka akan sangat membahayakan stabilitas tubuh embung.

Berdasarkan hasil analisa dan indicator tersebut, maka tipe yang paling tepat untuk mereduksi debit rembesan adalah tipe zonal dengan inti kedap air vertical.

BAB III

OPTIMASI KEMIRINGAN LERENG TUBUH EMBUNG

- 3.1 Pengembangan Konsep
- 3.2 Desain Tubuh Embung
- 3.3 Analisa Stabilitas Lereng Tubuh Embung
- 3.4 Pemilihan Kemiringan Lereng



3.1. Pengembangan Konsep

Pedoman Perencanaan embung telah memberikan arahan terkait dengan kemiringan lereng tubuh embung, baik kemiringan lereng bagian hulu maupun bagian hilir. Namun dalam proses perencanaan, tetap harus dilakukan analisa stabilitasnya. Dengan demikian pedoman penentuan kemiringan lereng tersebut lebih bersifat pada arahan (bukan standard), sehingga tidak menutup kemungkinan belum dihasilkan desain yang optimal (ekonomis). Untuk hal tersebut, dalam bab ini disajikan langkah optimasi dengan jalan melakukan simulasi beberapa pasangan kemiringan lereng.

Alternatif kemiringan lereng dibuat dengan batasan bahwa ketinggian, serta lebar dasar dan lebar puncak embung tetap. Dengan demikian, maka akan diperoleh volume tubuh embung yang sama. Indikator yang digunakan untuk memilih pasangan kemiringan lereng yang terbaik ialah angka keamanan yang paling tinggi. Harapan yang ingin dicapai ialah diperolehnya desain yang paling aman, dengan biaya yang sama.

3.2. Desain Tubuh Embung

Berdasarkan analisa pada bab sebelumnya, tubuh embung direkomendasikan type urugan zonal dengan desain sebagai berikut:

- Tinggi Tubuh Embung = 6 m
- Lebar dasar embung = 4 m
- Lebar puncak embung = 22 m
- Kemiringan lereng hulu = 1 : 1,25
- Kemiringan lereng hilir = 1 : 1,75

3.3. Analisa Stabilitas Lereng Tubuh Embung

Analisa stabilitas lereng tubuh embung dilakukan dengan beberapa metode, yaitu :

1. *Ordinary / Filleneus*
2. *Fill Dam No Taishin Sekkei Shishin*
3. *Janbu*
4. *Bishop*

3.3.1. Analisa Stabilitas Lereng Dengan Metode *Ordinary / Filleneus*

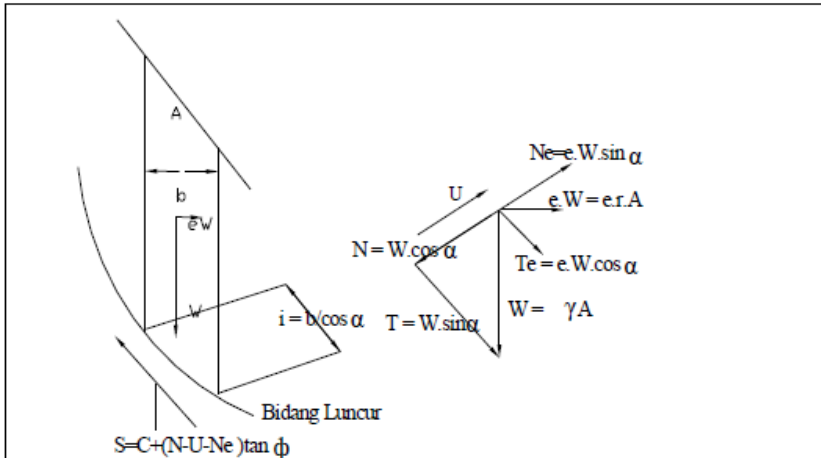
Stabilitas lereng embung urugan dapat dihitung menggunakan metode irisan bidang luncur bundar yang didasarkan pada bidang longsor bentuk lingkaran. Faktor keamanan dari kemungkinan terjadinya longsor dapat diperoleh dengan menggunakan rumus keseimbangan sebagai berikut (Soedibyo, 1993) :

$$\begin{aligned}
 F_s &= \frac{\sum\{C.l+(N-U-Ne)\tan\emptyset\}}{\sum(T+Te)} \\
 &= \frac{\sum C.l+\sum\{\gamma.A(\cos\alpha-e.\sin\alpha)-V\}\tan\emptyset}{\sum \gamma.A(\sin\alpha+e.\cos\alpha)} \dots\dots\dots(3.1)
 \end{aligned}$$

Dengan :

- F_s = faktor keamanan
- N = beban komponen vertikal yang timbul dari berat setiap irisan bidang luncur (= $\gamma . A . \cos \alpha$)
- T = beban komponen tangensial yang timbul dari berat setiap irisan bidang luncur (= $\gamma . A . \sin \alpha$)
- U = tekanan air pori yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur
- Ne = komponen vertikal beban seismic yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur (= $e . \gamma . A . \sin \alpha$)
- Te = komponen tangensial beban seismic yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur (= $e . \gamma . A . \cos \alpha$)
- \emptyset = sudut gesekan dalam bahan yang membentuk dasar setiap irisan bidang luncur.
- C = Angka kohesi bahan yang membentuk dasar setiap irisan bidang luncur
- e = intensitas seismis horizontal
- γ = berat isi dari setiap bahan pembentuk irisan bidang luncur

- A = luas dari setiap bahan pembentuk irisan bidang luncur
- α = sudut kemiringan rata-rata dasar setiap irisan bidang luncur
- V = tekanan air pori



Gambar 3.1 Cara menentukan harga-harga N dan T

(Sumber : Suyono Sosrodarsono, 1989)

Prosedur perhitungan metode irisan bidang luncur bundar (Soedibyo, 1993):

1. Andaikan bidang luncur bundar dibagi menjadi beberapa irisan vertikal dan walaupun bukan merupakan persyaratan yang mutlak, biasanya setiap irisan lebarnya dibuat sama. Disarankan agar irisan bidang luncur tersebut dapat melintasi perbatasan dari dua buah zone penimbunan atau supaya memotong garis depresi aliran filtrasi.
2. Gaya-gaya yang bekerja pada setiap irisan adalah sebagai berikut :
 - a. Berat irisan (W), dihitung berdasarkan hasil perkalian antara luas irisan (A) dengan berat isi bahan pembentuk irisan (γ), jadi $W = A \cdot \gamma$.
 - b. Beban berat komponen vertikal yang pada dasar irisan (N) dapat diperoleh dari hasil perkalian antara berat irisan (W) dengan cosinus sudut rata-rata tumpuan (α) pada dasar irisan yang bersangkutan jadi $N = W \cdot \cos \alpha$
 - c. Beban dari tekanan hidrostatis yang bekerja pada dasar irisan (U) dapat diperoleh dari hasil perkalian antara panjang dasar irisan (b)

dengan tekanan air rata-rata ($U/\cos\alpha$) pada dasar irisan tersebut, jadi $U = \frac{U \cdot b}{\cos\alpha}$

- d. Berat beban komponen tangensial (T) diperoleh dari hasil perkalian antara berat irisan (W) dengan sinus sudut rata-rata tumpuan dasar irisan tersebut jadi $T = W \sin \alpha$
- e. Kekuatan tahanan kohesi terhadap gejala peluncuran (C) diperoleh dari hasil perkalian antara angka kohesi bahan (c') dengan panjang dasar irisan (b) dibagi lagi dengan $\cos \alpha$, jadi $C = \frac{c' \cdot b}{\cos\alpha}$

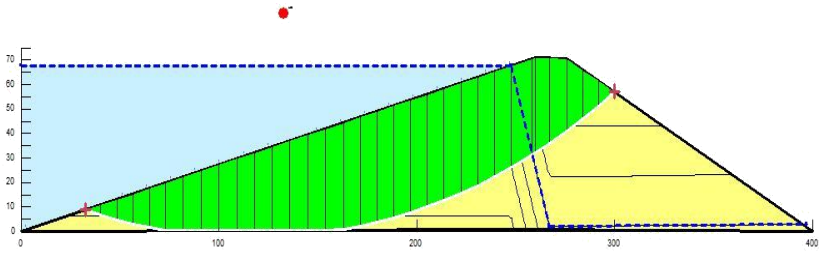
3. Kekuatan tahanan geseran terhadap gejala peluncuran irisan adalah kekuatan tahanan geser yang terjadi pada saat irisan akan meluncur meninggalkan tumpuannya.
4. Kemudian jumlahkan semua kekuatan-kekuatan yang menahan (T) dan gaya-gaya yang mendorong (S) dari setiap irisan bidang luncur, dengan T dan S dari masing-masing irisan dinyatakan sebagai $T = W \sin \alpha$ dan $S = C + (N - U) \tan \phi$
5. Faktor keamanan dari bidang luncur tersebut adalah perbandingan antara jumlah gaya pendorong dan jumlah gaya penahan yang dirumuskan :

$$F_s = \frac{\sum S}{\sum T} \dots\dots\dots (3.2)$$

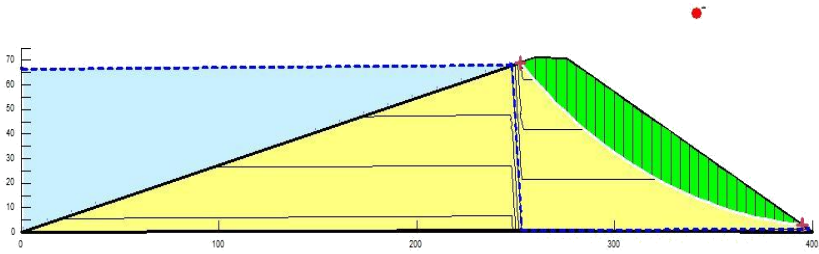
Dengan :

- F_s = faktor aman
- $\sum S$ = jumlah gaya pendorong
- $\sum T$ = jumlah gaya penahan

Dari hasil pengujian tanah didapatkan data berupa : $\gamma_{dry} = 2,040 \text{ gr/cm}^3$ dan $\gamma_{wet} = 2,550 \text{ gr/cm}^3$. Skema bidang gelincir diperlihatkan pada Gambar 3.4 dan Gambar 3.5. Proses analisa stabilitas lereng diperlihatkan pada table berikut:



Gambar 3.4. Skema Bidang Gelincir Bagian Hulu Metode *Filleneus*



Gambar 3.5. Skema Bidang Gelincir Bagian Hilir Metode *Filleneus*

Tabel 3.1. Analisa Stabilitas Lereng pada Tubuh Embung Urugan

No	A	W	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	T	N	Ne	U	$\tan \theta$	$\frac{(N-N_e-U)}{\tan \theta}$	C . L
	(m ²)	(t/m)			(t/m)	(t/m)	(t/m)	(t/m)		(t/m)	(t/m)
1	1.704	3.475	0.242	0.970	0.841	3.372	0.084	0.104	0.500	1.592	4.204
2	3.076	6.276	0.375	0.927	2.351	5.819	0.235	0.278	0.500	2.653	4.614
	1.555	3.966									
3	2.041	4.164	0.545	0.839	2.268	3.492	0.227	0.111	0.500	1.577	4.956
	3.672	9.363									
4	0.481	0.982	0.695	0.719	0.682	0.706	0.068		0.500	0.319	5.342
	5.266	13.429									
5	5.667	14.451	0.848	0.530	12.255	7.658	1.226		0.800	5.146	5.654
6	4.808	12.259	0.951	0.309	11.659	3.788	1.166		0.800	2.098	5.935
7	3.325	8.477	0.998	0.070	8.457	0.591	0.846		0.800	-0.203	6.131
8	1.167	2.976	0.978	-0.208	2.911	-0.619	0.291		0.800	-0.728	6.543
Jumlah					41.424	24.808	4.142	0.493		12.453	43.379

Sumber : Hasil Perhitungan

Dari tabel tersebut maka dapat dihitung nilai F_s dengan perhitungan sebagai berikut :

$$F_s = \frac{C.l + (N - U - N_e) \times \tan \theta}{(T - T_e)} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$= \frac{43,379 + 12,453}{41,424 + 0,10 \times 24,808}$$

$$= 1,272$$

$F_s = 1,272 > 1,2$

Selanjutnya, hasil analisa Stabilitas Lereng metode *Ordinary / Filleneus* dari berbagai pasangan kemiringan lereng dicantumkan pada table 3.2.

Tabel 3.2. Koefisien Keamanan Stabilitas Lereng metode *Ordinary / Filleneus*

Alt	Kemiringan Lereng		FS Lereng	
	Hulu	Hilir	Hulu	Hilir
			Fs	Fs
1	1 : 3,75	1 : 1,75	1,263	0,68
2	1 : 3,5	1 : 2	1,076	0,761
3	1 : 2,5	1 : 3	1,076	0,878
4	1 : 2,75	1 : 2,62	1,068	0,84
5	1 : 3,25	1 : 2,16	1,124	0,722

Sumber : Hasil Perhitungan

3.3.2. Analisa Stabilitas Lereng dengan Metode *Fill Dam No Taishin Sekkei Shishin*

Analisa Stabilitas Lereng dengan Metode *Fill Dam No Taishin Sekkei Shishin* menggunakan persamaan sebaga berikut:

$$F_s = \frac{m - k \times \gamma \times \tan \phi}{1 - k \times \gamma \times m} \dots\dots\dots (3.4)$$

Dengan :

- m = kemiringan lereng
- k = koefisien gempap
- ϕ = sudut geser dalam

Hasil analisa dicantumkan pada table 3.3.

Tabel 3.3. Koefisien Keamanan Stabilitas Lereng Metode *Fill Dam No Taishin Sekkei Shishin*

Alt	Kemiringan Lereng		FS Lereng	
	Hulu	Hilir	Hulu	Hilir
			Fs	Fs
1	1 : 3,75	1 : 1,75	2,22	1,22
2	1 : 3,5	1 : 2	2,12	1,35
3	1 : 2,5	1 : 3	1,69	1,922
4	1 : 2,75	1 : 2,62	1,81	1,75
5	1 : 3,25	1 : 2,16	2,02	1,51

Sumber : Hasil Perhitungan

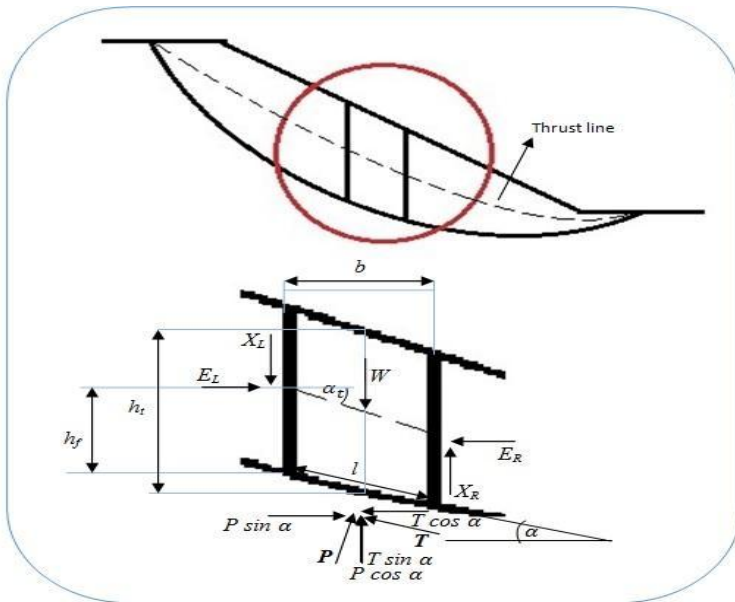
3.3.3. Analisa Stabilitas Lereng Dengan Metode *Janbu*

Rumus – rumus dasar telah dikembangkan untuk menganalisa daya dukung dan masalah tekanan tanah oleh Janbu 1957. Ini merupakan metode irisan (slice) pertama dimana seluruh keseimbangan gaya dan keseimbangan momen dipenuhi.

Janbu merumuskan persamaan umum Keseimbangan dengan menyelesaikan secara vertikal dan sejajar pada dasar tiap – tiap irisan. Dengan memperhitungkan seluruh keseimbangan gaya maka rumus untuk faktor keamanan F_f diperoleh sebagai berikut (Anderson dan Richards, 1987). Gaya-gaya yang bekerja pada bidang luncur diilustrasikan pada gambar 3.6.

Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai pefisien keamanan adalah sebagai berikut:

$$F_f = \frac{\sum\{c' + (p - ul) \tan \phi'\} \sec \alpha}{\sum(W - (X_R - X_L)) \tan \phi} \dots\dots\dots (3.5)$$



Gambar 3.6. Gaya-gaya yang bekerja pada suatu Potongan

Dengan Notasi :

W = Berat total pada irisan

E_L = Gaya antar irisan yang bekerja secara horisontal pada penampang kiri

E_R = Gaya antar irisan yang bekerja secara horisontal pada penampang kanan

X_L = Gaya antar irisan yang bekerja secara vertikal pada penampang kiri

X_R = Gaya antar irisan yang bekerja secara vertikal pada penampang kanan

P = Gaya normal total pada irisan

T = Gaya geser pada dasar irisan

h_t = Tinggi rata-rata dari irisan

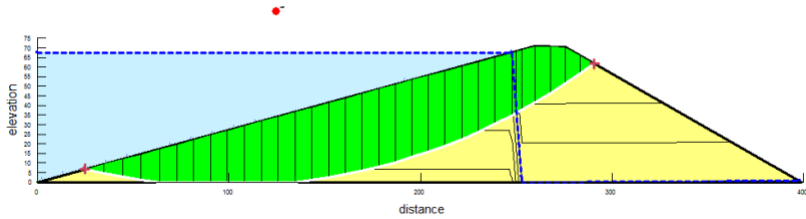
h_f = Asumsi letak thrust line

b = Lebar dari irisan

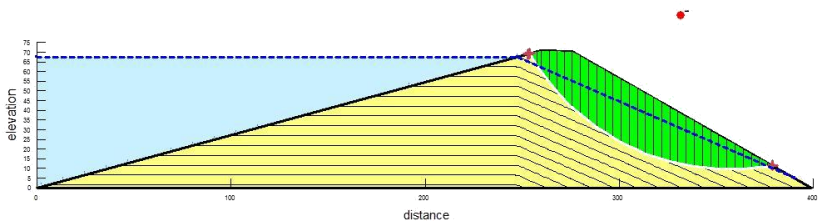
l = Panjang dari irisan

α = Kemiringan lereng

αt = Sudut thrust line



Gambar 3.7. Bidang Longsor Lereng bagian hulu metode Janbu



Gambar 3.8. Bidang Longsor Lereng bagian hilir metode Janbu

Hasil analisa Stabilitas Lereng *Janbu* dari berbagai pasangan kemiringan lereng dicantumkan pada table 3.4.

Tabel 3.4. Koefisien Keamanan Stabilitas Lereng metode *Janbu*

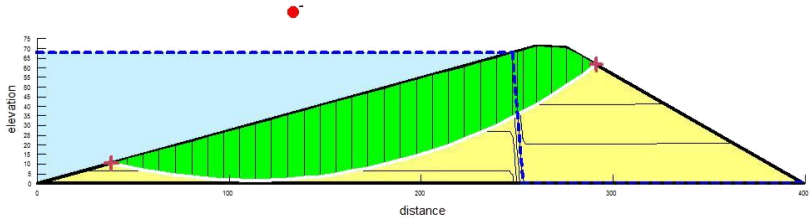
Alt	Kemiringan Lereng		FS Lereng	
	Hulu	Hilir	Hulu	Hilir
			F _s	F _s
1	1 : 3,75	1 : 1,75	0,68	0,681
2	1 : 3,5	1 : 2	0,761	0,7
3	1 : 2,5	1 : 3	0,878	0,872
4	1 : 2,75	1 : 2,62	0,84	0,804
5	1 : 3,25	1 : 2,16	0,722	0,801

Sumber : Hasil Perhitungan

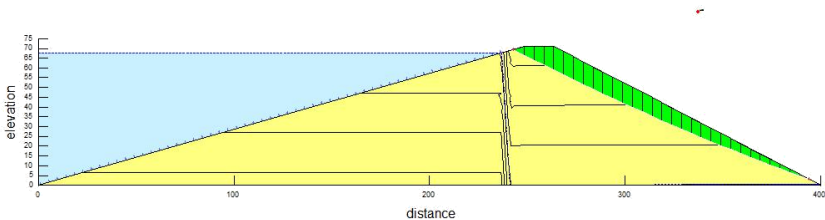
Keterangan :

$$F_f = \frac{\{c'l + (p-ul) \tan \phi\}}{W \sin \alpha} \dots\dots\dots (3.6)$$

- W = Berat total pada irisan
- EL, ER = Gaya antar irisan yang bekerja secara horisontal pada penampang kiri dan kanan
- XL, XR = Gaya antar irisan yang bekerja secara vertikal pada penampang kiri dan kanan
- P = Gaya normal total pada irisan
- T = Gaya geser pada dasar irisan
- b = Lebar dari irisan
- l = Panjang dari irisan
- α = Sudut Kemiringan lereng



Gambar 3.10. Bidang Gelincir Lereng Bagian Hulu Metode Bishop



Gambar 3.11. Bidang Gelincir Lereng Bagian Hilir Metode Bishop

Tabel 3.5. Koefisien Keamanan Stabilitas Lereng Metode *Bishop*

Alt	Kemiringan Lereng		FS Lereng	
	Hulu	Hilir	Hulu	Hilir
			Fs	Fs
1	1 : 3,75	1 : 1,75	1,272	0,783
2	1 : 3,5	1 : 2	1,198	0,848
3	1 : 2,5	1 : 3	1,071	0,944
4	1 : 2,75	1 : 2,62	1,062	0,903
5	1 : 3,25	1 : 2,16	1,168	0,856

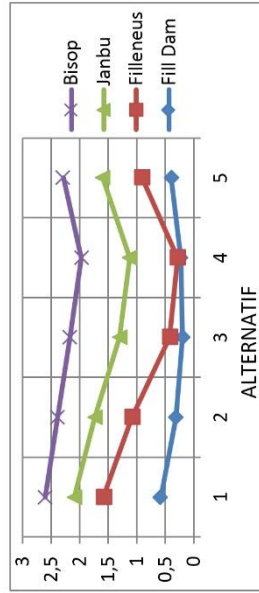
Sumber : Hasil Analisa

3.4. Pemilihan Kemiringan Lereng

Pemilihan pasangan kemiringan lereng paling optimal digunakan indikator harga mutlak selisih antara nilai FS lereng bagian hulu dengan FS bagilereng an hilir. Proses analisa dilakukan pada table 3.6. dan Gambar 3.9.

Tabel 3.6. Rekapitulasi Hasil Analisa FS

Alt	Kemiringan Lereng		Metode Fill Dam No Taishin Sekkei Shishin				Metode Ordinary / Filleneus				Metode Janbu				Metode Bisop					
	Hulu	Hilir	Hulu	Hilir	Delta	Hulu	Hilir	Delta	Hulu	Hilir	Delta	Hulu	Hilir	Delta	Hulu	Hilir	Delta	Hulu	Hilir	Delta
	Fs	D Fs	Fs	D Fs	D Fs	Fs	D Fs	D Fs	Fs	D Fs	D Fs	Fs	D Fs	D Fs	Fs	D Fs	D Fs	Fs	D Fs	D Fs
1	1:3,75	1:1,75	2,22	1,22	1,00	1,263	0,68	0,583	0,272	0,783	0,511	0,272	0,783	0,511	0,272	0,783	0,511	0,272	0,783	0,511
2	1:3,5	1:02	2,12	1,35	0,77	1,076	0,761	0,315	0,198	0,848	0,650	0,198	0,848	0,650	0,198	0,848	0,650	0,198	0,848	0,650
3	1:2,5	1:03	1,69	2	0,232	1,076	0,878	0,198	0,071	0,944	0,873	0,071	0,944	0,873	0,071	0,944	0,873	0,071	0,944	0,873
4	1:2,75	1:2,62	1,81	1,75	0,06	1,068	0,84	0,228	0,062	0,903	0,841	0,062	0,903	0,841	0,062	0,903	0,841	0,062	0,903	0,841
5	1:3,25	1:2,16	2,02	1,51	0,51	1,124	0,722	0,402	0,168	0,856	0,688	0,168	0,856	0,688	0,168	0,856	0,688	0,168	0,856	0,688



Gambar 3.12. Grafik Nilai FS Masing-masing Alternatif Kemiringan Lereng

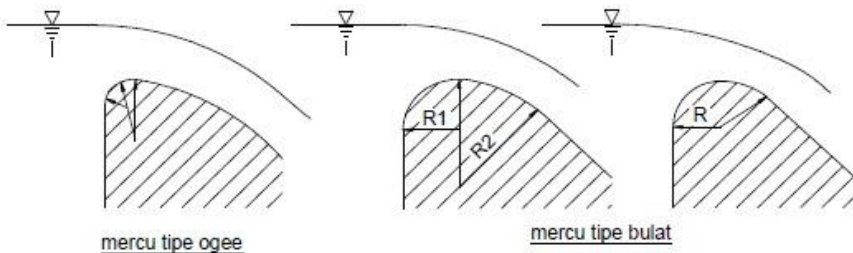
4.1. Pengembangan Konsep

Pelimpah merupakan fasilitas penyaluran kelebihan air dari suatu waduk, un tuk menjaga agar elevasi muka air banjir (MAB) tidak melampaui ambang batas maksimal. Tubuh embung type urugan tanah akan sangat berbahaya jika air melimpas di atasnya (over topping). Demikian juga dengan tanggul di sisi sungainya. Desain pelimpah yang baik ialah jika memiliki kapasitas penyaluran air yang terbesar. Berbagai upaya optimasi dapat dilakukan agar mendapatkan desain terbaik tersebut, yaitu dengan meaksimal-kan lebar efektif pelimpah dan meminimal-kan elevasi muka air yang terjadi. Dalam bab ini, upaya maksimalisasi kapasitas debit dilakukan dengan mencoba jenis lengkung mercu, yaitu: type ogee dan type bulat.

Pemilihan ke dua jenis lengkung tersebut terdapat kecenderungan bahwa lengkung mercu type ogee digunakan pada pelimpah, sedangkan type lengkung bulat digunakan pada mercu bendung. Dalam bab ini dilakukan uji coba perbandingan kapasitas debit dari keduanya.

ALTERNATIF LINGKUNG PELIMPAH

- 4.1 Pengembangan Konsep
- 4.2 Diskripsi Type Mercu Spillway
- 4.3 Koefisien Debit Pelimpah
- 4.4 Kapasitas Pelimpah
- 4.5 Pemilihan Type Mercu



Gambar 4.1. Mercu Spill Way

4.2. Diskripsi Type Mercu Spillway

4.2.1. Mercu Ogee

Bentuk mercu Tipe Ogee ini adalah tirai luapan bawah dari bendung ambang tajam aerasi. Sehingga mercu ini tidak akan memberikan tekanan sub atmosfer pada permukaan mercu sewaktu bendung mengalirkan air pada debit rencananya. Untuk bagian hulu mercu bervariasi sesuai dengan kemiringan permukaan hilir. Salah satu alasan dalam perencanaan digunakan Tipe Ogee adalah karena tanah disepanjang kolam olak, tanah berada dalam keadaan baik, maka tipe mercu yang cocok adalah tipe mercu ogee karena memerlukan lantai muka untuk menahan penggerus. Untuk merencanakan permukaan mercu Ogee bagian hilir, US. Army Corps of Engineers telah mengembangkan persamaan berikut :

$$Y/hd = (I/k) \cdot (X/hd)^n \dots\dots\dots (4-1)$$

Dimana:

X dan Y = koordinat-koordinat permukaan hilir;

Hd = tinggi energy rencana diatas mercu;

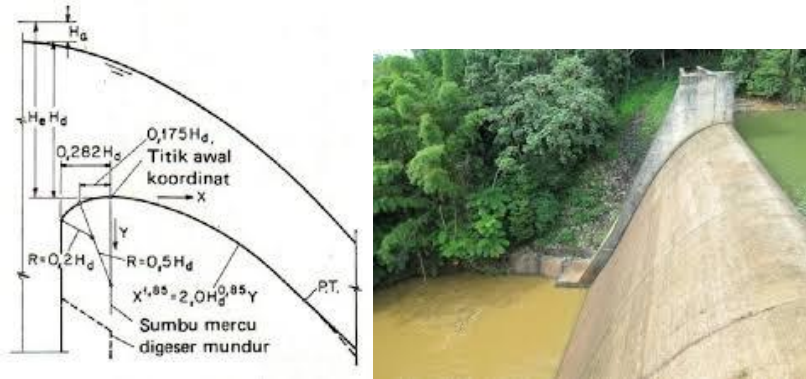
K dan n = parameter yang tergantung pada kecepatan aliran dan kemiringan hilir.

Tabel 4.1. Harga k dan n

Kemiringan permukaan hilir	K	N
Vertikal	2.000	1.850
1 - 0.33	1.936	1.836
1 - 0.67	1.939	1.810
1 – 1	1.873	1.776

Sumber :Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan 02

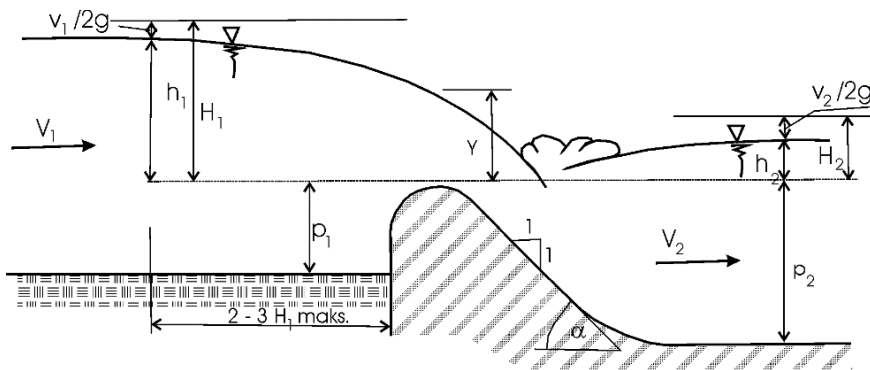
Bagian hulu mercu bervariasi sesuai dengan kemiringan permukaan hilir, seperti terlihat pada gambar berikut :



Gambar 4.1. Profil Lengkung Mercu type Ogee

4.2.2 Mercu bulat

Bendung dengan mercu bulat memiliki harga koefisiensi debit yang jauh lebih tinggi (44%) dibandingkan dengan koefisiensi bendung ambang lebar. Pada sungai, ini akan banyak memberikan keuntungan karena bangunan ini akan mengurangi tinggi muka air hulu selama banjir. Harga koefisiensi debit menjadi lebih tinggi karena lengkung streamline dan tekanan negatif pada mercu. Tekanan pada mercu adalah fungsi perbandingan antara H_1 dan r (H_1 / r) (lihat Gambar 4.2)



Gambar 4.2. Mercu Tipe Bulat

4.2.3.1 Debit yang melalui pelimpah (Tipe Lengkung Mercuri Bulat) :

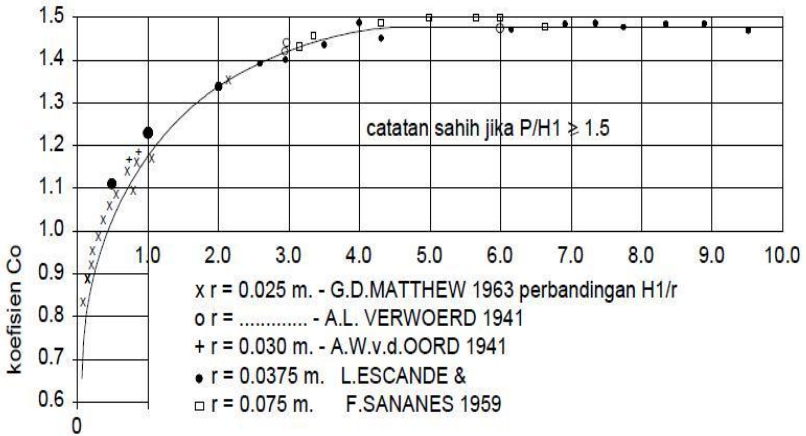
$$Q = \frac{2}{3} \times C \times Leff \times \sqrt{2/3 \times g \times h^{3/2}} \dots\dots\dots (4-2)$$

Dimana :

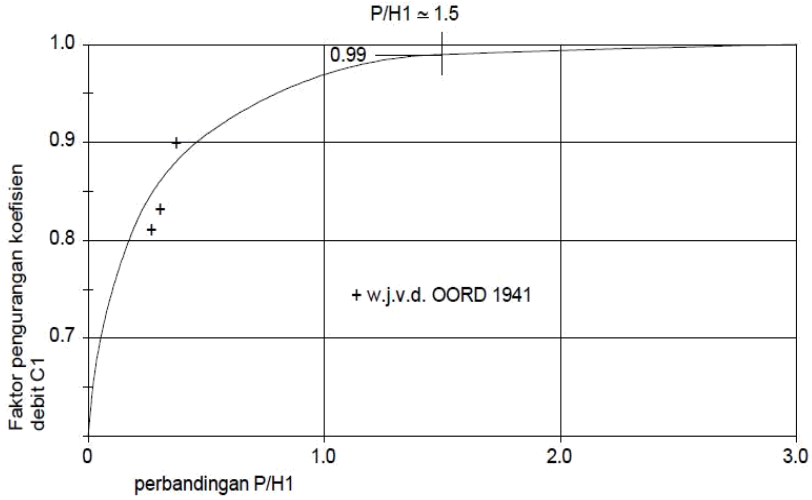
- Q = debit aliran (m³/s)
- Cd = koefisien debit (Cd = CoC1C2)
- B = lebar efektif ambang (m)
- h = tinggi energi di atas ambang (m)
- g = percepatan grafitasi (m/s)

Koefisien debit Cd adalah hasil dari :

- C0 yang merupakan fungsi H /r (lihat gambar 4.3)
- C1 yang merupakan fungsi p/H1 (lihat gambar 4.4)
- C2 yang merupakan fungsi p/H1 dan kemiringan muka hulu



Gambar 4.3. Harga-harga koefisien C0 untuk bendung ambang bulat sebagai fungsi perbandingan H1/r



Gambar 4.4. Koefisien C1 sebagai fungsi perbandingan p/h1

4.3. Koefisien Debit Pelimpah

Harga koefisien limpahan diatas pelimpah dapat diperoleh dari rumus Iwasaki sebagai berikut (Suyono Sosrodarsono, 1989 ; 182). Perhitungan koefisien dilakukan dengan cara coba-coba (trial and Error) dengan menggunakan rumus-rumus sebagai berikut:

$$H_d = \left(\frac{Q}{C_d \times L} \right)^{2/3} \dots\dots\dots (4-3)$$

$$H_d = \left(\frac{8,40}{2,2 \times 2,0} \right)^{2/3} = 1,174 \text{ m}$$

Pada saat $h = H_d$ dan $C = C_d$, maka :

$$C = \left[1,60 \times \left(\frac{1 + 2a(h/H_d)}{1 + a(h/hd)} \right) \right]$$

$$a = \frac{0.6 - \{0,0416 \times (hd/w)^{0,99}\}}{1 + \{0,0416 \times (hd/w)^{0,99}\}} = \frac{0.6 - \{0,0416 \times (1,174/3,0)^{0,99}\}}{1 + \{0,0416 \times (1,174/3,0)^{0,99}\}} = 0,5691$$

Harga C pada saat h = hd adalah

$$C = \left[1,60 \times \left(\frac{1 + 2.0,5691(1,174/1,174)}{1 + 0,5691(1,174/1,174)} \right) \right] = 2,180 = 2,200 \text{ (dibulatkan)}$$

Karena “C” asumsi sudah sama dengan C hitung maka perhitungan dapat dilanjutkan.

4.4. Kapasitas Pelimpah

Untuk h = 0, pada elevasi puncak pelimpah yaitu +165,50 belum ada air yang melimpah maka diambil h = 0, untuk selanjutnya interval dipakai tiap 20 cm atau h = 0,20 m

4.4.1. Menghitung lebar efektif

Pelimpah direncanakan tanpa pilar, sehingga nilai Kp = 0 dan Ka diasumsikan konstan = 0.12. untuk lebar pelimpahnya direncanakan 2 m

Maka :

$$Leff = L - [2 \times \{(N \times Kp) + Ka\} \times H] \dots\dots\dots (4-4)$$

$$Leff = 2 - [2 \times \{(0 \times 0) + 0,12\} \times 0,20] = 1,95 \text{ m}$$

4.4.2. Menghitung Coefisien Debit

$$C = \left[1,60 \times \left(\frac{1 + 2.0,569(0,200/1,182)}{1 + 0,569(0,200/1,182)} \right) \right] = 1,690$$

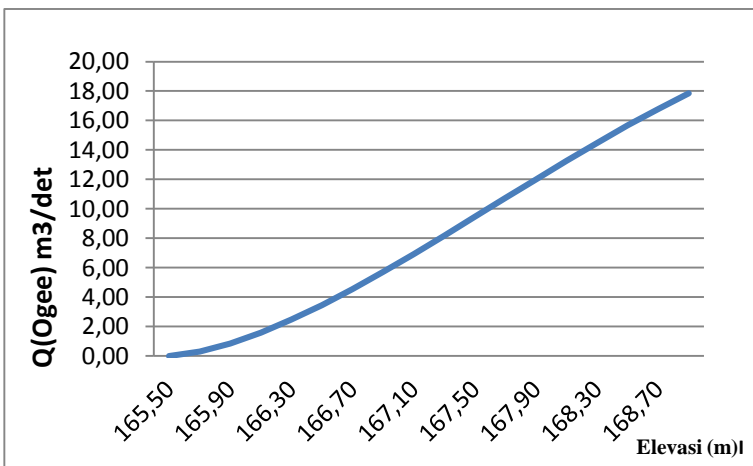
4.4.3. Kapasitas Pelimpah Type Ogee

$$Q = C \times Leff \times h^{3/2} \dots\dots\dots (4-5)$$

$$= 1,690 \times 1,95 \times h^{3/2}$$

Tabel 4.2 Elevasi Muka Air dan Kapasitas Spillway Tipe Lengkung Mercuri Ogee

Elev M.A (m)	H (m)	C	Leff (m)	Q (m ³ /det)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
165,50	0,00	1,600	2,00	0,00
165,70	0,20	1,690	1,95	0,30
165,90	0,40	1,770	1,90	0,85
166,10	0,60	1,843	1,86	1,59
166,30	0,80	1,908	1,81	2,47
166,50	1,00	1,967	1,76	3,46
166,70	1,20	2,021	1,71	4,55
166,90	1,40	2,071	1,66	5,71
167,10	1,60	2,116	1,62	6,92
167,30	1,80	2,159	1,57	8,17
167,50	2,00	2,197	1,52	9,45
167,70	2,20	2,233	1,47	10,73
167,90	2,40	2,267	1,42	12,00
168,10	2,60	2,298	1,38	13,26
168,30	2,80	2,328	1,33	14,48
168,50	3,00	2,355	1,28	15,66
168,70	3,20	2,381	1,23	16,79
168,90	3,40	2,405	1,18	17,85



Gambar 4.5 Kapasitas Debit Pelimpah Type Ogee

4.4.4. Kapasitas Pelimpah Type Bulat

$$Q = \frac{2}{3} \times C \times Leff \times \sqrt{2/3 \times g \times h^{3/2}} \dots\dots\dots (4-6)$$

Dimana nila Cd merupakan perkalian dari C0, C1 dan C2. Jari-Jari pembuatan mercu untuk pasangan batu ($0.3 H_1 < r < 0.7H_1$) maka diperoleh $r = 1,245$ m. Dari grafik diperoleh $C_0 = 0,87$ yang merupakan fungsi $H_1/r = 0,25$; $C_1 = 1,48$ yang merupakan fungsi $P/H_1 = 6,25$; $C_2 = 1,48$ yang merupakan fungsi $P/H_1 = 6,25$. Didapatkan $Cd = 1,910$.

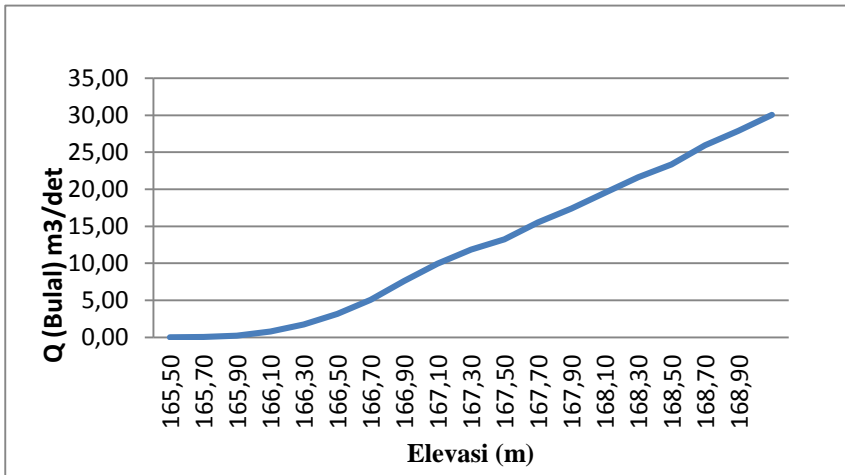
Berdasarkan hasil perhitungan faktor – faktor limpasan di atas, maka elevasi muka air dan kapasitas pengaliran melalui pelimpah Tipe Lengkung Mercu Ogee yang disajikan pada Tabel 4.2, dan Tipe Lengkung Mercu Bulat pada Tabel 4.3. Adapun grafik hubungan elevasi dan kapasitas spillway Tipe Lengkung Mecu Ogee pada Gambar 4.6, dan Tipe Lengkung Mercu Bulat pada Gambar 4.6, serta gambar grafik hubungan elevasi dari Q Bulat dan Q Ogee yang disajikan pada Gambar 4.7.

Tabel 4.3 Elevasi Muka Air dan Kapasitas Spillway Tipe Lengkung Mercu Bulat

Elev M.A (m)	H (m)	C	Leff (m)	Q (m ³ /det)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
165,50	0,00	0,000	2,00	0,00
165,70	0,20	1,910	1,95	0,03
165,90	0,40	1,700	1,90	0,23
166,10	0,60	1,770	1,86	0,77
166,30	0,80	1,730	1,81	1,75
166,50	1,00	1,640	1,76	3,15
166,70	1,20	1,573	1,71	5,07
166,90	1,40	1,510	1,66	7,52
167,10	1,60	1,380	1,62	9,96
167,30	1,80	1,190	1,57	11,86

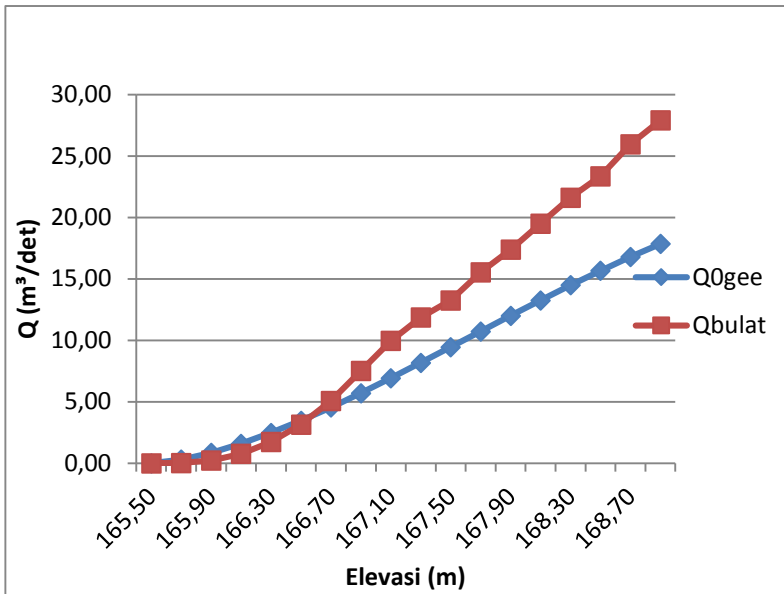
167,50	2,00	1,000	1,52	13,25
167,70	2,20	0,910	1,47	15,55
167,90	2,40	0,810	1,42	17,38
168,10	2,60	0,740	1,38	19,51
168,30	2,80	0,680	1,33	21,61
168,50	3,00	0,620	1,28	23,36
168,70	3,20	0,590	1,23	25,96
168,90	3,40	0,550	1,18	27,90
169,10	3,60	0,520	1,14	30,04

4.5. Pemilihan Type Mercu



Gambar 4.6 Grafik Hubungan Elevasi Muka Air dan Kapasitas Spillway Tipe Lengkung Mercu Ogee dan Tipe Lengkung Mercu Bulat

Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 4.7 Grafik Hubungan Elevasi Muka Air dan Kapasitas Spillway Tipe Lengkung Mercu Ogee dan Tipe Lengkung Mercu Bulat

Sumber : Hasil Perhitungan

Dari grafik kapasitas debit yang mengalir pada spillway Tipe Lengkung Mercu Ogee dan Tipe Lengkung Mercu bulat, terlihat bahwa Semakin besar elevasinya maka semakin besar pula debit yang dihasilkan. Kapasitas debit paling besar Tipe Lengkung Mercu Ogee sebesar 17,85 m³/det dan Tipe Lengkung Mercu Bulat sebesar 30,04 m³/det.

Dengan demikian, secara hidrolis dapat disimpulkan bahwa pelimpah dengan mercu lengkung tipe bulat memiliki kapasitas debit lebih besar. Namun demikian, dalam pemilihan type lengkung mercu untuk spill way perlu juga dipertimbangkan dari segi yang lain. Hail ini terutama jika spill way relative tinggi, maka lengkung hilir spillway juga perlu mendapat perhatian terait dengan kemungkinan timbul tekanan negative.

Daftar Pustaka

- Hadisusanto,Nugroho. 2010. Aplikasi *Hidrologi*. Malang : Jogja Mediautama
<http://kominfo.jatimprov.go.id/read/umum/pembangunan-bendungan-bendo-di-ponorogo-ditargetkan-tahun-2017> . (Diakses 24 November 2017)
- Ilham,Muhammad.2015. *Anlisa stabilitas tubh bendungan pada Bendungan Utama Tugu Kabupaten Trenggalek*.Universitas Brawijaya.
- Korah, T., Turangan, & Sarajar, A.N. 2014. Analisis Kestabilan Lereng dengan Metode Janbu (Studi Kasus: Kawasan Citraland). *Jurnal Sipil Statik*, 2(1), 22-28. Manado: Universitas Sam Ratulangi.
- Mutiara, Brigitta. Dkk.2014. *Studi Perencanaan konstruksi tubuh bendungan pada Waduk Suplesi Konto Wiyu Kecamatan Pujon Kabupaten Malang Jawa Timur*.Universitas Brawijaya.
- Pradana,Haska Adi.2012.*Analisa Struktur Bendungan Krenceng terhadp Gempa*.Institut Teknologi Pertanian Bogor.
- Sosrodarsono,Suyono., dan Kensaku Takeda.1987. *Bendungan type Urugan*, Jakarta : PT .Pradya Paramitha.

INDEX

B

banjir abnormal, 13

C

central-core fill type dam, 4

chute spillway, 6

control structure, 5

controlled spillway, 6

D

dead storage, 11

debit rembesan, 3

discharge channel, 5

divilium (rock fill dam), 15

E

elevasi, 4

embung, 1

entrance channel, 5

erosi, 5

F

free –overfall, 6

front core fill type dam, 4

G

gaya geser, 3

gaya longsor, 3

H

hidrolika, 6

hidrostatik, 6

I

inclined-core fill type dam, 4

J

jagaan embung, 12

K

kontur, 4

M

mercu, 6

O

outlet channel, 5

overflow, 6

P

peta topografi, 4

pintu penguras, 2

R

rock foundation, 15

S

saville, 14

scouring, 5

sedimen, 1

side channel spillway, 6

spillway, 3

syphon spillway, 6

T

tampung, 1

terminal structure, 5

U

umur efektif, 1

uncontrolled spillway, 6

urugan homogen, 3

urugan zonal, 3