

Studi Pemilihan Alternatif Kemiringan *Maindam* Berdasarkan Rembesan dan Stabilitas Bendungan Jragung Kabupaten Semarang

Siti Rismaul Azizah, Muhammad Hafiizh Imaaddudin, dan Ismail Sa'ud
Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: m_hafiizh@ce.its.ac.id

Abstrak—Bagian paling penting dari bendungan adalah tubuh bendungan (*maindam*) karena secara garis besar tubuh bendungan adalah rembesan dan stabilitas. Dalam perencanaan bendungan urugan tanah, terutama bendungan urugan tipe zonal, analisis zona-zona penyusun tubuh bendungan sangat dibutuhkan. Besar ketebalan zona inti sangat mempengaruhi tubuh bendungan terhadap rembesan dan stabilitas bendungan. Pada penelitian ini dilakukan analisis stabilitas dan rembesan tubuh bendungan memakai 3 alternatif dimensi tubuh bendungan bagian zona inti yang mempengaruhi ketebalan zona filter halus dan *random*. Selanjutnya dilakukan analisis rembesan dan stabilitas dengan menggunakan program aplikasi Geo-Studio 2018. Analisis stabilitas longsor menggunakan aplikasi Geo-Studio sisi hilir pada kondisi eksisting memiliki nilai *safety factor* sebesar 1,66, kondisi muka air banjir 1,62 dan keadaan surut cepat sebesar 1,7. Pada kondisi alternatif 1 mendapat nilai keamanan untuk muka air normal 1,67, muka air banjir sebesar 2,30, dan muka air surut cepat 2,00. Untuk alternatif 2 mendapat nilai keamanan untuk muka air normal 2,15, muka air banjir 2,18 dan muka air surut cepat 3,00. Untuk nilai rembesan yang sesuai di alternatif 1 yang mempunyai nilai rembesan sebesar $1,87 \times 10^{-6}$ m³/detik, muka air banjir sebesar $1,97 \times 10^{-6}$ m³/detik, dan muka air surut cepat sebesar $1,73 \times 10^{-7}$ m³/detik akan tetapi untuk nilai stabilitasnya cukup rendah dibandingkan dengan alternatif ke 2.

Kata Kunci—Tubuh Bendungan, Keamanan, Stabilitas, Rembesan.

I. PENDAHULUAN

BENDUNGAN Jragung terletak di Desa Pringapus, Kecamatan Ungaran, Kabupaten Semarang. Pembangunan bendungan ini bertujuan untuk meminimalisir adanya banjir, penyediaan air baku, PLTA, irigasi, dan pariwisata. Bendungan Jragung merupakan bendungan tipe urugan zonal I dengan inti tegak. Bendungan tipe urugan ini merupakan timbunan beberapa material campuran maupun seragam. Bagian paling inti dari bendungan adalah tubuh bendungan (*maindam*) karena secara garis besar tubuh bendungan adalah penahan rembesan air ke hilir. Dalam perencanaan bendungan urugan tanah, terutama urugan tipe zonal, analisis desain ketebalan zona tubuh bendungan sangat dibutuhkan. Besar ketebalan zona inilah yang mempengaruhi besar rembesan dan nilai keamanan stabilitas bendungan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, maka perlu dilakukan analisis terhadap rembesan dan stabilitas yang terjadi. Pada kajian ini ditinjau rembesan pada *Main Dam* Bendungan Jragung Kabupaten Semarang, Jawa Tengah. Adapun tujuan kajian ini adalah untuk meninjau dan menganalisis rembesan yang terjadi. Berdasarkan tujuan tersebut untuk mengetahui nilai rembesan yang terjadi. Untuk perhitungan dilakukan menggunakan *software* Geo-Studio yang dapat mengetahui rembesan dan stabilitas yang terjadi di bendungan.

Geo-Studio adalah rangkaian produk perangkat lunak dari Geo-Slop Internasional yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja bendungan atau tanggul dengan berbagai tingkat kompleksitas. SEEP/W adalah salah satu elemen dari produk Geo-Studio dengan *basic* CAD terbatas untuk menganalisis rembesan air dan masalah tekanan air pori berlebihan dalam bahan berpori seperti tanah dan batuan. Dengan analisis rembesan dan stabilitas dapat memperhitungkan bahan penyusun tubuh bendungan pada daerah sekitar serta memiliki *safety factor* yang aman.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Bendungan Urugan

Bendungan Urugan adalah bendungan yang dibangun dengan menampung material berupa batuan, kerikil, pasir, dan tanah yang berfungsi sebagai penopang dan menjadi tirai kedap air di atas bendungan. Bendungan tanggul dapat dibangun di semua kondisi geologi dan geografis. Bendungan urugan memiliki keuntungan dalam pembangunan tubuh bendungan, yaitu dapat menggunakan batuan di sekitar lokasi bendungan [1].

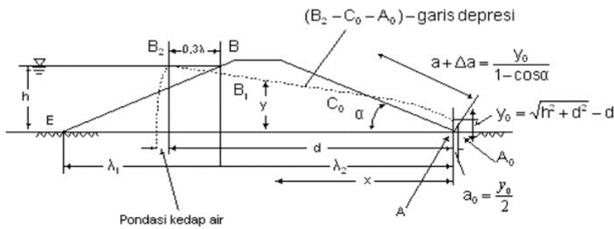
Dilihat dari penempatan dan susunan material penyusun tubuh bendungan agar dapat menjalankan fungsinya dengan baik, bendungan dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama, yaitu:

1) Bendungan Urugan Homogen

Bendungan yang material penyusun tubuh bendungannya berupa tanah yang hampir seragam dan gradasinya (komposisi ukuran partikel) yang hampir seragam. Tubuh bendungan secara keseluruhan memiliki fungsi ganda. Dengan kata lain, ia bertindak sebagai struktur penyangga dan sekaligus sebagai penghalang terhadap rembesan air.

2) Bendungan Urugan Zonal

Bendungan urugan zonal adalah timbunan yang membentuk tubuh bendungan terdiri dari batuan dengan gradasi (ukuran butir) batuan yang berbeda dalam urutan lapisan tertentu. Pada bendungan tipe ini sebagai penyangga terutama dibebankan kepada timbunan yang lolos air sedangkan penahan rembesan dibebankan kepada timbunan yang kedap air (zona kedap air). Berdasarkan letak dan kedudukan dari zona kedap airnya, maka tipe ini masih dapat dibedakan menjadi bendungan urugan zonal dengan tirai kedap air (*front core fill type dam*), yaitu bendungan zonal dengan zona kedap air yang membentuk lereng udik bendungan tersebut dan bendungan urugan zonal dengan inti kedap air miring atau “bendungan inti miring” (*inclined-core fill type dam*), yaitu bendungan zonal yang zona kedap airnya terletak di dalam tubuh bendungan dan berkedudukan miring ke arah hilir.



Gambar 1. Garis depresi pada bendungan homogen.

Tabel 1. Data Dimensi Tubuh Bendungan

No.	Area	Kemiringan Hulu	Kemiringan Hilir	Kemiringan Zona Inti
1.	Eksisting	1:3,0	1:2,5	1:0,25
2.	Alternatif 1	1:3,0	1:2,5	1:0,23
3.	Alternatif 2	1:3,0	1:2,5	1:0,20

B. Analisis Hidrologi

Hidrologi adalah ilmu yang berkaitan dengan air di bumi, baik mengenai terjadinya, peredaran dan penyebarannya, sifat-sifatnya dan hubungan dengan lingkungannya terutama dengan makhluk hidup [2]. Pada perkembangannya, hidrologi banyak dipelajari khususnya dibidang teknik sipil, salah satunya digunakan dalam memperkirakan jumlah air yang tersedia di suatu sumber air, baik itu mata air, sungai, maupun danau guna dimanfaatkan untuk berbagai macam keperluan seperti air baku (air untuk keperluan rumah tangga, perdagangan), irigasi, pembangkit listrik tenaga air, perikanan, peternakan, dan lain sebagainya.

C. Distribusi Gumbel

Untuk analisis frekuensi curah hujan menggunakan distribusi Gumbel (2), dengan persamaan sebagai berikut:

$$Xt = \bar{X} + \frac{(Yt - Yn)}{Sn} S \tag{1}$$

dengan Xt adalah curah hujan rencana dalam periode ulang t tahun (mm/hari), \bar{X} adalah curah hujan rata-rata hasil pengamatan (mm/hari), Yt adalah variabel tereduksi yang merupakan parameter Gumbel untuk periode t tahun, Yn adalah *reduced mean* yang merupakan fungsi dari banyaknya data (n), dan S adalah standar deviasi.

D. Probable Maximum Precipitation (PMP)

Curah hujan maksimum boleh jadi (*Probable Maximum Precipitation*, PMP) dihitung dengan menggunakan *Metode Hershfield*. Metode *Hershfield* merupakan metode yang digunakan untuk memperkirakan nilai hujan maksimum boleh jadi metode ini digunakan saat data meteorologi sangat kurang atau perlu perkiraan secara cepat [3].

E. Lengkung Kapasitas Waduk

Volume antara dua kontur yang berurutan (4) dapat dicari menggunakan rumus berikut [4]:

$$I = \sum \{(F_i + F_{i+1}) \cdot 0,5(h_{i+1} - h_i)\} \tag{2}$$

dengan I adalah Isi atau volume tampungan antara dua kontur berurutan (m^3), h_i adalah elevasi pada kontur ke- i (m), h_{i+1} adalah elevasi pada kontur ke- $i + 1$ (m), F_i adalah luas daerah yang dikelilingi kontur ke- i (km^2), dan F_{i+1} adalah luas daerah yang dikelilingi kontur ke- $i + 1$ (km^2).

F. Rembesan pada Tubuh Bendungan

Rembesan air atau permeabilitas adalah sifat bahwa zat ca-

ir dapat mengalir lewat bahan berpori. Tanah termasuk bahan permeabel sehingga air dapat mengalir melalui pori-pori tanah derajat permeabilitas tanah ditentukan oleh ukuran pori, jenis tanah dan kecepatan tanah. Air tanah adalah air yang berada pada lapisan di bawah permukaan tanah. Kedalaman air tanah tiap tempat tidak sama karena dipengaruhi oleh tebal tipisnya lapisan permukaan atas dan kedudukan lapisan tanah tersebut. Kedalaman air dapat dilihat dari sumur-sumur yang digali oleh penduduk [5]. Garis depresi pada tubuh bendungan dapat dilihat dari Gambar 1. Untuk memperoleh garis depresi pada Gambar 1, dapat digunakan persamaan berikut:

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0} \tag{3}$$

$$y = \sqrt{2y_0x + y_0^2} \tag{4}$$

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \tag{5}$$

Di mana h adalah jarak vertikal antara titik-titik A dan B, d adalah jarak horizontal antara titik B₂ dan A, l_1 adalah jarak horizontal antara titik-titik B dan E, l_2 adalah jarak horizontal antara titik-titik B dan A, A adalah ujung tumit hilir bendungan, B adalah titik perpotongan antara permukaan air waduk dan lereng udik bendungan, A₁ adalah titik perpotongan antara parabola bentuk besar garis depresi dengan garis vertikal melalui titik B, dan B₂ adalah titik yang terletak sejauh $0,3l_1$ horizontal ke arah udik dari titik B.

Panjang garis Δa tergantung pada kemiringan lereng hilir bendungan, dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$a + \Delta a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha} \tag{6}$$

dengan a adalah jarak \overline{AC} , Δa adalah jarak \overline{COC} , dan α adalah sudut kemiringan lereng hilir bendungan.

G. Penentuan Dimensi Kemiringan Maimdam

Pada tahap penentuan dimensi dan zona material tubuh bendungan memakai hasil analisis yang direncanakan oleh konsultan perencana proyek bendungan Jragung kabupaten Semarang. Sedangkan pada tahap penentuan kemiringan inti hulu dan hilir tubuh bendungan dari Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah (Pd T-14-2004-A) dan *Design of Small Dams* [6].

H. Analisis Jumlah Debit Rembesan

Analisis Rembesan pada tubuh bendungan untuk mengetahui kapasitas filtrasi yang ada pada tiap alternatif tubuh bendungan yang direncanakan. Untuk memperkirakan besarnya kapasitas filtrasi dapat digunakan jaring-jaring trayektori [7]. Aliran filtrasi yang dihitung menggunakan rumus berikut:

$$Q_f = \frac{N_f}{N_d} \cdot K \cdot H \cdot L \tag{7}$$

dengan Q_f adalah jumlah rembesan, N_f adalah angka pembagi dari garis-garis trayektori aliran, N_d adalah angka pembagi dari garis-garis equipotensial, K adalah koefisien permeabilitas tanah, dan L adalah panjang aliran.

I. Analisis Stabilitas

Pada analisis stabilitas menggunakan metode Bishop. Metode Bishop adalah metode yang umum digunakan untuk

Tabel 2.
Data Uji Material Penyusun Tubuh Bendungan

Zona	Jenis Material	Permeabilitas		Water Content (%)
		cm/sec	m/sec	
1 (Inti)	Clay	0,00000137	0,0000000137	0,233
2 (Filter)	Sand	0,00386	0,0000386	0,450
3 (Random)	Silty Clay	0,000196	0,00000196	0,204
4 (Filter Kasar)	Gravel	0,00418	0,0000418	0,990
5 (Rip-Rap)	Gravel	50,00	0,50	0,500

Tabel 3.
Data Penyusun Material Tubuh Bendungan

Zona	Jenis Material	Sudut Geser ($^{\circ}$)	Kohesi		Unit Weight (gr/cm ³)
			kg/cm ²	kpa	
1 (Inti)	Clay	17	0,396	38,83	1,83
2 (Filter)	Sand	28	0	0	2,012
3 (Random)	Silty Clay	35	0,76	74,53	1,961
4 (Filter Kasar)	Gravel	35	0	0	2,439
5 (Rip-Rap)	Gravel	38	1,29	126,51	2,427

analisis stabilitas lereng tubuh bendungan. Dalam metode ini pengaruh gaya-gaya pada sisi tepi irisan diperhitungkan [1].

Syarat-syarat stabilitas konstruksi seperti lereng hulu dan hilir bendungan tidak mudah longsor, harus aman terhadap geseran, rembesan, dan penurunan. Metode Bishop adalah metode yang diperkenalkan oleh A. W. Bishop dengan menggunakan potongan di mana gaya-gaya yang bekerja pada tiap potongan dipakai untuk menganalisis permukaan gelincir (*slip surface*) yang berbentuk lingkaran. Metode Bishop dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_a} [c \cdot b + (W - u \cdot b) \tan \phi]}{\sum \sin a} \quad (8)$$

$$m_a = \left(1 + \tan \phi \cdot \frac{\tan \alpha}{F_s} \right) \cos \alpha \quad (9)$$

Sedangkan untuk membantu perhitungan menggunakan bantuan aplikasi Geo-Studio 2018 SLOPE/W.

J. Aplikasi Geo-studio

Untuk melakukan analisis dibandingkan dengan menggunakan aplikasi biasa seperti Microsoft Excel atau yang lainnya. Dalam aplikasi Geo-studio terdapat berbagai analisis, antara lain rembesan (SEEP/W) dan stabilitas (SLOPE/W).

K. SLOPE/W

SLOPE/W merupakan produk perangkat lunak untuk menghitung faktor keamanan tanah dan kemiringan batuan. Dengan SLOPE/W memungkinkan untuk dapat menganalisis masalah baik secara sederhana maupun kompleks [8] Dengan menggunakan salah satu dari 8 (delapan) metode kesetim-bangan batas untuk berbagai permukaan yang miring, kondisi lekasan pori air, sifat beban, dan beban terkonsentrasi. Pada analisis kestabilan lereng, aplikasi ini dapat menggunakan elemen tekanan pori air yang terbatas, tegangan statis, atau tekanan dinamik.

III. METODOLOGI

A. Pengumpulan Data

Data-data yang terkait dapat diperlukan dari intansi/konsultasi yang berupa *soft drawing* struktur *maindam*, data material main dam, dan elevasi muka air. Data-data tersebut kemudian dapat dilakukan analisis menggunakan aplikasi Geo-Studio.

B. Tahapan Analisis Perhitungan

Dari data yang telah dikumpulkan, maka dapat ditentukan 3 (tiga permodelan) yang menjadi acuan analisis rembesan dan stabilitas bendungan. Permodelan yang menjadi acuan adalah elevasi muka air normal, elevasi muka air banjir, dan elevasi muka air surut cepat.

Hasil yang akan didapatkan berdasarkan data-data yang diketahui dan dilakukan analisis secara garis besar dapat dikelompokkan menjadi debit rembesan pada tubuh bendungan dan angka *safety factor* pada *main dam*.

C. Permodelan

Rencana permodelan dibuat untuk mempermudah melakukan proses analisis menggunakan aplikasi Geo-Studio. Masing-masing permodelan akan ditetapkan pada potongan melintang bendungan. Permodelan di antaranya MAN, MAB, dan muka air surut cepat.

D. Desain Alternatif Bendungan

Setelah analisis desain eksisting penulis bertujuan membuat 3 desain alternatif bendungan mengubah kemiringan zona inti, filter halus, dan *random*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Dimensi Tubuh Bendungan

Data Dimensi Tubuh Bendungan merupakan sebuah acuan untuk melakukan analisis pada tubuh bendungan. Di samping itu, data yang digunakan untuk analisis meliputi data material, susunan material seperti Tabel 1.

B. Data Uji Material Timbunan

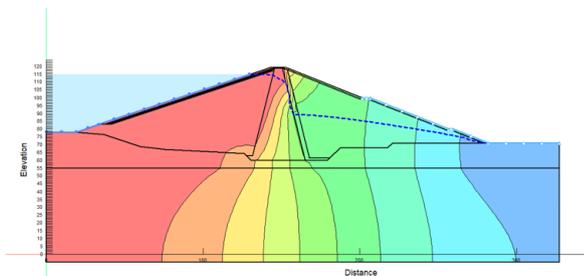
Data uji material tanah adalah data untuk mengetahui karakteristik tanah untuk material timbunan tubuh bendungan. Data dari Tabel 1 dan Tabel 2 digunakan untuk analisis rembesan dan stabilitas untuk tubuh bendungan.

C. Hasil Analisis Rembesan (SEEP/W)

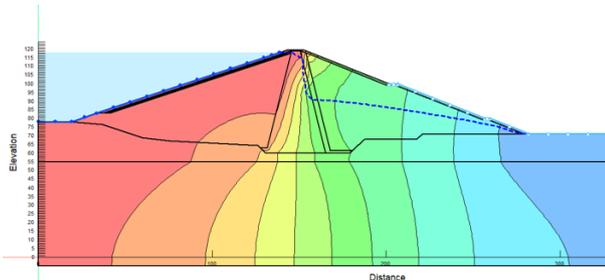
Perhitungan analisis rembesan akan diinputkan pada perhitungan analisis stabilitas longsor secara langsung, dengan begitu diharapkan perhitungan stabilitas yang didapat akan lebih akurat seperti pada Tabel 3.

1) Hasil Running Geostudio Kondisi Eksisting Muka Air Normal

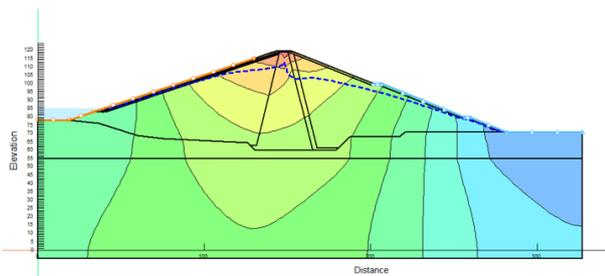
Dapat dilihat pada Gambar 2 hasil rembesan muka air ban-



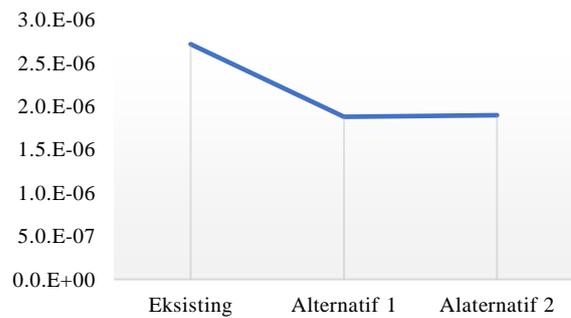
Gambar 1. Hasil rembesan muka air normal.



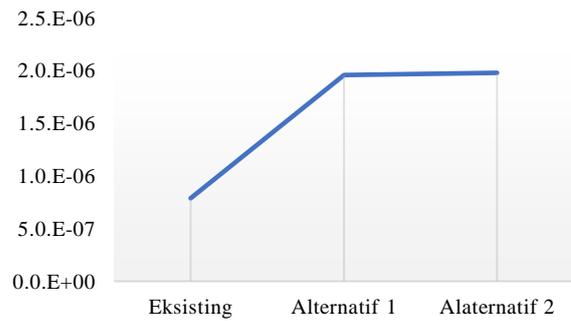
Gambar 2. Hasil rembesan muka air banjir.



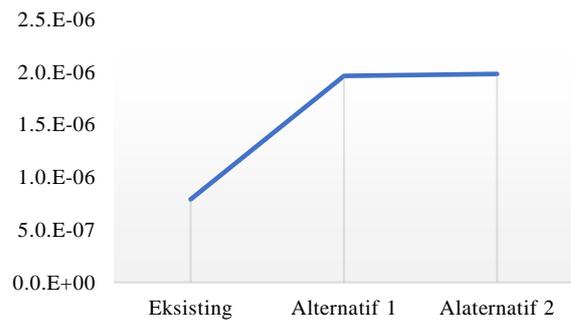
Gambar 3. Rembesan muka air surut cepat.



Gambar 4. Grafik muka air normal.



Gambar 5. Analisis rembesan pada muka air banjir.



Gambar 6. Hasil analisis rembesan kondisi muka air banjir.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Analisis Rembesan

No.	Kondisi	Permodelan	Debit Rembesan	Cek
1.	Eksisting	MAN	$2,72 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$	OK
		MAB	$7,88 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{detik}$	OK
		Surut Cepat	$8,59 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{detik}$	OK
2.	Alternatif 1	MAN	$1,88 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$	OK
		MAB	$1,96 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$	OK
		Surut Cepat	$1,86 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{detik}$	OK
3.	Alternatif 2	MAN	$1,90 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$	OK
		MAB	$1,98 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$	OK
		Surut Cepat	$1,91 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$	OK

jir dengan SEEP/W tubuh bendungan dengan kondisi eksisting mendapatkan nilai debit rembesan $2,72 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{detik}$.

2) Hasil Rembesan Kondisi Eksisting Muka Air Banjir

Dapat dilihat pada Gambar 3 hasil rembesan muka air banjir dengan SEEP/W Tubuh Bendungan dengan kondisi eksisting mendapatkan nilai debit rembesan $7,8 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{detik}$.

3) Hasil Rembesan Muka Air Surut Cepat

Dapat dilihat pada Gambar 4 bahwa hasil rembesan kondisi surut hari ke-12 dengan SEEP/W tubuh bendungan dengan kondisi eksisting mendapatkan nilai debit rembesan $8,5 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{detik}$.

Dapat dilihat pada Tabel 4, bahwa nilai rembesan pada kondisi muka air normal untuk masing-masing desain memiliki nilai sebagai berikut. Nilai rembesan pada desain eksisting adalah $2,72 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$, pada alternatif 1 adalah $1,88 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$, dan pada alternatif 2 adalah $1,90 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$.

m^3/detik . Untuk perubahan nilai rembesan dapat dilihat pada Gambar 5.

Berdasarkan Gambar 5, nilai rembesan pada kondisi muka air normal untuk masing-masing desain memiliki nilai sebagai berikut. Nilai rembesan pada desain eksisting adalah $2,72 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$, pada alternatif 1 adalah $1,88 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$, dan pada alternatif 2 adalah $1,90 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$.

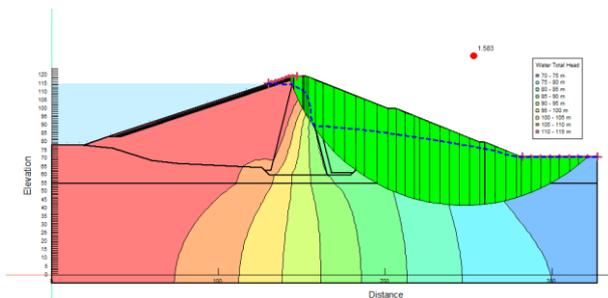
Dapat dilihat pada Gambar 6, bahwa nilai rembesan pada kondisi muka air banjir untuk masing-masing desain memiliki nilai sebagai berikut. Nilai rembesan pada desain eksisting adalah $7,88 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{detik}$, pada alternatif 1 adalah $1,96 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$, dan pada alternatif 2 adalah $1,98 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$.

Dapat dilihat pada Gambar 7, bahwa nilai rembesan pada kondisi muka air surut cepat untuk masing-masing desain memiliki nilai sebagai berikut. Nilai rembesan pada desain eksisting adalah $8,59 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{detik}$, pada alternatif 1 adalah $1,86 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{detik}$, dan pada alternatif 2 adalah $1,91 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$.

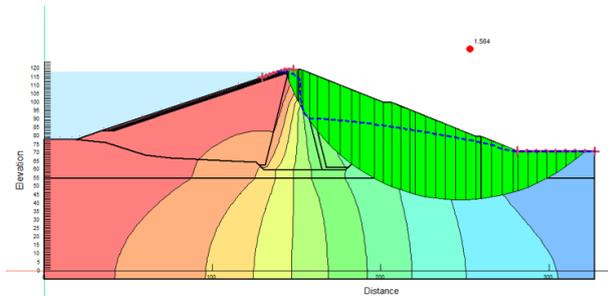
D. Hasil Analisis Stabilitas (SLOPE/W)

1) Hasil Analisis Stabilitas Kondisi Eksisting

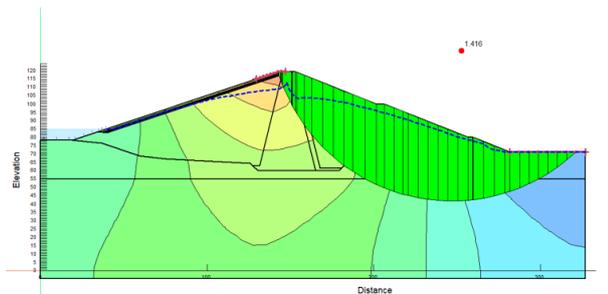
Dari hasil permodelan menggunakan Geo-Studio diperoleh angka keamanan sebesar 1,58 seperti pada Gambar 8.



Gambar 10. Analisis stabilitas muka air normal kondisi eksisting.



Gambar 11. Analisis stabilitas muka air banjir kondisi eksisting.



Gambar 12. Analisis stabilitas muka air surut cepat kondisi eksisting.

Tabel 5.
Rekapitulasi Hasil Analisis Rembesan

No.	Kondisi	Permodelan	Faktor Keamanan Hilir	Cek
1.	Eksisting	MAN	1,58	OK
		MAB	1,56	OK
		Surut Cepat	1,41	Not OK
2.	Alternatif 1	MAN	1,55	OK
		MAB	1,52	OK
		Surut Cepat	1,51	OK
3.	Alternatif 2	MAN	1,49	Not OK
		MAB	1,47	Not OK
		Surut Cepat	1,54	OK

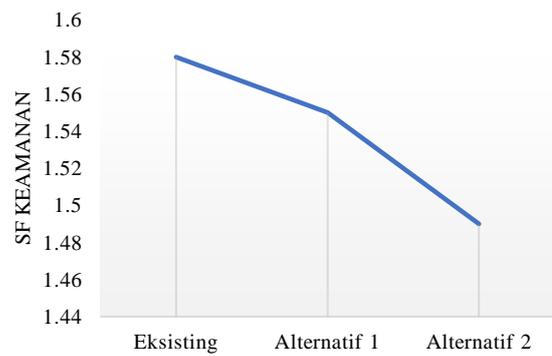
2) Hasil Analisis Stabilitas Kondisi Muka Air Banjir

Berdasarkan Gambar 9, hasil permodelan menggunakan Geo-Studio kondisi eksisting dengan kemiringan zona inti 0:0,25 dan kemiringan zona filter halus filter halus 0:0,25 dengan kondisi muka air banjir +118 mendapatkan angka keamanan sebesar 1,56.

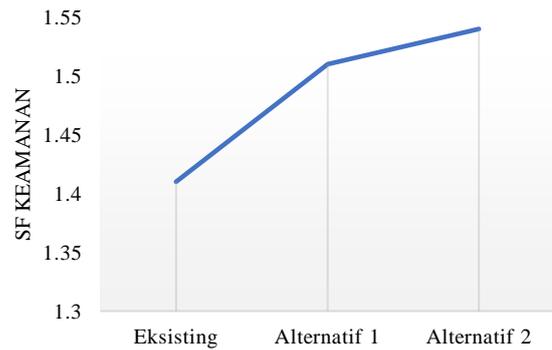
3) Hasil Analisis Stabilitas Kondisi Muka Air Surut Cepat

Berdasarkan Gambar 10, hasil permodelan menggunakan Geo-Studio kondisi eksisting dengan kemiringan zona inti 0:0,25 dan kemiringan zona filter halus filter halus 0:0,25 dengan kondisi muka air surut cepat mendapatkan angka keamanan sebesar 1,41.

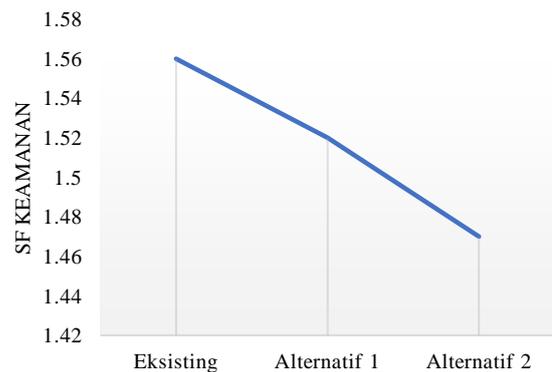
Perhitungan analisis stabilitas longsor pada bendungan dilakukan untuk mendapatkan angka *safety factor* yang mana angka keamanan tersebut mengaju pada SNI 2016. Pada SNI 2016 dijelaskan bahwa pada permodelan MAB dan MAN dengan *dead storage* mencakup kondisi aliran dengan angka



Gambar 7. Analisis stabilitas muka air normal sisi hilir.



Gambar 8. Analisis rembesan kondisi muka air banjir sisi hilir.



Gambar 9. Analisis rembesan kondisi muka air surut cepat sisi hilir.

keamanan 1,5 sedangkan pada angka kondisi surat cepat pengoperasian waduk dengan FK 1,3. Pada analisis stabilitas longsor bendungan didapatkan angka *safety factor* bagian hulu dan hilir yang disajikan pada Tabel 5.

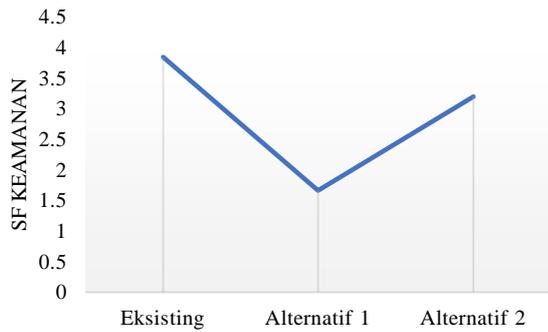
Dapat dilihat pada Gambar 11, bahwa nilai stabilitas pada kondisi muka air normal untuk masing-masing desain memiliki nilai sebagai berikut. Nilai stabilitas pada desain eksisting adalah 1,58, pada alternatif 1 adalah 1,55, dan pada alternatif 2 adalah 1,49.

Nilai stabilitas pada kondisi muka air banjir untuk masing-masing desain memiliki nilai seperti pada Gambar 12. Nilai stabilitas pada desain eksisting adalah 1,52, dan pada alternatif 2 adalah 1,47. Sedangkan nilai stabilitas pada kondisi muka air surut cepat untuk masing-masing desain memiliki nilai seperti pada Gambar 13. Nilai stabilitas pada desain eksisting adalah 1,41, pada alternatif 1 adalah 1,51, dan pada alternatif 2 adalah 1,54.

Hasil rekapitulasi stabilitas *main dam* sisi hulu disajikan pada Tabel 6 dan Gambar 14. Berdasarkan Gambar 14, tampak bahwa nilai stabilitas pada kondisi Muka Air Normal

Tabel 6.
Rekapitulasi Hasil Analisis Rembesan

No.	Kondisi	Permodelan	Faktor Keamanan Hulu	Cek
1.	Eksisting	MAN	3.84	OK
		MAB	4,22	OK
		Surut Cepat	4.07	OK
2.	Alternatif 1	MAN	1.66	OK
		MAB	2.30	OK
		Surut Cepat	2.09	OK
3.	Alternatif 2	MAN	3.19	OK
		MAB	2.96	OK
		Surut Cepat	1.83	OK



Gambar 13. Analisis stabilitas muka air normal sisi hulu.

untuk desain eksisting adalah 3,84, pada alternatif 1 adalah 1,66, dan pada alternatif 2 adalah 3,19.

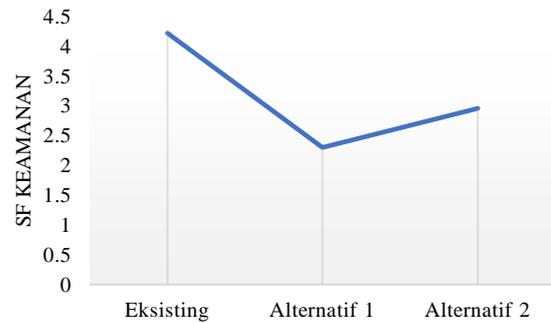
Dapat dilihat pada Gambar 15, bahwa nilai stabilitas pada kondisi Muka Air Banjir untuk masing-masing desain memiliki nilai sebagai berikut. Nilai stabilitas pada desain eksisting adalah 4,22, pada alternatif 1 adalah 2,30, dan pada alternatif 2 adalah 2,96.

Dapat dilihat pada Gambar 16. bahwa nilai stabilitas pada kondisi Muka Air Surut Cepat untuk masing-masing desain memiliki nilai sebagai berikut. Nilai stabilitas pada desain eksisting adalah 4,07, pada alternatif 1 adalah 2,09, dan pada alternatif 2 adalah 1,83.

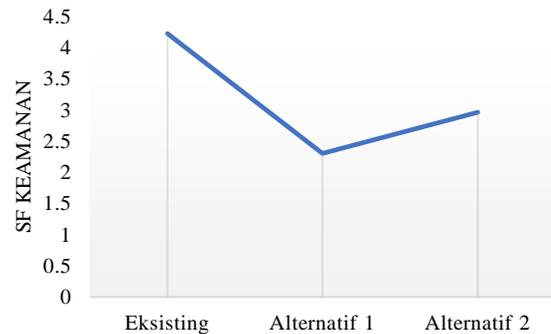
V. KESIMPULAN

Hasil dari analisis bahwa desain eksisting dikatakan aman dari segi rembesan. Pada debit rembesan pada kondisi alternatif 1 mendapatkan nilai rembesan muka air normal sebesar $1,88 \times 10^{-6}$ m³/detik, muka air banjir sebesar $1,96 \times 10^{-6}$ m³/detik dan muka air surut cepat sebesar $1,86 \times 10^{-6}$ m³/detik. Debit rembesan pada kondisi alternatif 2 kondisi muka air normal mendapatkan debit rembesan $1,90 \times 10^{-6}$ m³/detik, muka air banjir sebesar $1,98 \times 10^{-6}$ m³/detik dan muka air surut cepat sebesar $1,91 \times 10^{-6}$ m³/detik.

Hasil dari analisis stabilitas longsor sisi hilir pada kondisi eksisting memiliki nilai *safety factor* sebesar 1,58, muka air banjir 1,56 dan keadaan surut cepat sebesar 1,41. Pada kondisi alternatif 1 mendapat nilai keamanan untuk muka air normal 1,52, muka air banjir sebesar 1,51 dan muka



Gambar 14. Analisis stabilitas muka air banjir sisi hulu.



Gambar 15. Analisis stabilitas muka air surut cepat sisi hulu.

air surut cepat 1,51. Untuk alternatif 2 mendapatkan nilai keamanan untuk muka air normal 1,49, muka air banjir 1,47 dan muka air surut cepat 1,54.

Dapat disimpulkan untuk nilai rembesan yang sesuai di alternatif 1 yang mempunyai nilai rembesan sebesar $1,87 \times 10^{-6}$ m³/detik, muka air banjir sebesar $1,97 \times 10^{-6}$ m³/detik, dan muka air surut cepat sebesar $1,73 \times 10^{-7}$ m³/detik. Untuk nilai keamanan stabilitasnya mendapat nilai keamanan untuk muka air normal 1,52, muka air banjir sebesar 1,51 dan muka air surut cepat 1,51. Untuk nilai kemiringan zona inti dan filter halus 1:0,23 dan materialnya memenuhi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Sosrodarsono dan K. Takeda, *Bendungan Type Urugan*. Jakarta: PT Pradnya Paramita, 1977.
- [2] Suripin, *Sistem Drainase Perkotaan yang Berkebutuhan*. Yogyakarta: Andi Offset, 2004. ISBN: 9789797311377.
- [3] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, "SNI 2415:2016 Tata Cara Perhitungan Debit Banjir Rencana," Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta, 2016.
- [4] Soedibyo, *Teknik Bendungan*. Jakarta: Pradnya Paramita, 1993. ISBN: 979-408-313-5.
- [5] Sukirman, "Analisis rembesan pada bendung tipe urugan melalui uji hidrolis di laboratorium hidro ft unsri," *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 2, no. 2, hal. 238–244, 2014.
- [6] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 8062: 2015 Tata Cara Desain Tubuh Bendungan Tipe Urugan," Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, 2015.
- [7] M. Saidillah, "Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Saradan," Departemen Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2021.
- [8] GEO-SLOPE International, Ltd., "Stability Modeling with SLOPE/W," GEO-SLOPE International, Ltd., Calgary, 2018.