

Studi Perbandingan Desain Inti Bendung Dengan Pemakaian Material Alternatif Untuk Optimalisasi Biaya

Studi Kasus: Proyek Bendungan Tapin, Banjarmasin, Kalimantan Selatan

Victor Anton Sutresno¹, Noor Endah Mochtar¹, Indrasurya B. Mochtar¹

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya¹

Koresponden*, Email: n_thons@yahoo.com

| Info Artikel | | Abstract |
|--------------|-----------------|--|
| Diajukan | 29 Juli 2022 | <i>Tapin dam is zonal earthfill dam with core zone using clay material. The problem that occurs during its construction is the availability of clay material for core zone that close to the project. On the other hand, there is spillway excavation material disposed around the construction site. Based on this problem, there is an idea to utilize spillway excavation material to substitute the dam core zone that combined with a geomembrane to increase its impermeability. To get the optimal size of the dam core zone, 5 alternative designs were carried out. They were then analyzed with the help of SEEP/W and SLOPE/W software; afterwards, the results were compared to the initial design where the dam core zone was designed using the clay material from the quarry. The results show that geomembrane can reduce the average seepage value up to 89%. In addition, it is found cost efficiency up to 27,53% if spillway excavation material is utilized for core zone of the dam.</i> |
| Diperbaiki | 10 Agustus 2022 | |
| Disetujui | 10 Agustus 2022 | |

Keywords: core zone, cost efficiency, geomembrane, geotextile, modeling, permeability, spillway excavation material, tapin dam.

Abstrak
Bendungan Tapin merupakan bendungan tipe urugan zonal inti tegak dengan zona inti kedap air menggunakan material lempung. Kendala yang terjadi saat pelaksanaan konstruksi adalah ketersediaan material lempung untuk zona inti yang ada di sekitar proyek. Di sisi lain terdapat material hasil galian spillway yang dibuang begitu saja disekitar area proyek. Adanya permasalahan tersebut, terdapat gagasan untuk memanfaatkan material hasil galian spillway tersebut sebagai material zona inti yang dikombinasi dengan geomembrane untuk meningkatkan impermeabilitasnya. Dalam rangka mendapatkan ukuran zona inti bendung yang optimal, dibuat 5 alternatif desain yang kemudian dianalisa dengan bantuan software SEEP/W dan SLOPE/W. Selanjutnya, hasil perhitungannya dibandingkan dengan perencanaan awal dimana zona inti bendung menggunakan material lempung dari quarry. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa geomembrane dapat menurunkan nilai rembesan rata rata hingga 89%. Disamping itu, diperoleh efisiensi biaya sebesar 27,53% apabila material galian spillway dipakai sebagai pengganti material lempung untuk bendung inti.

Kata kunci: bendungan tapin, geomembran, geotextile, material galian spillway, optimalisasi biaya, pemodelan, permeabilitas, zona inti

1. Pendahuluan

Desain sebuah bendungan harus memenuhi empat kriteria pokok bendungan, yaitu: aman terhadap kegagalan struktur, aman terhadap kegagalan hidrolis, aman terhadap kegagalan akibat rembesan, dan aman terhadap kegagalan operasi. [1] Rembesan yang keluar melalui tubuh bendungan atau pondasi, adalah merupakan suatu indikator penting untuk mengetahui kondisi keamanan suatu bendungan. Erosi internal atau piping pada bendungan merupakan penyebab kegagalan kedua setelah aliran yang melewati puncak bendungan (*overtopping flow*) [2].

Permeabilitas Pada Tubuh Bendung

Permeabilitas setiap material tanah dan batuan biasanya bersifat anisotropik, termasuk material urugan dan fondasi bendungan. Anisotropi adalah sifat permeabilitas mate-

rial yang tidak seragam pada arah aliran rembesan yang berbeda [3]. Koefisien anisotropi (K_h/K_v) pada bendungan di perlihatkan pada **Tabel 1**.

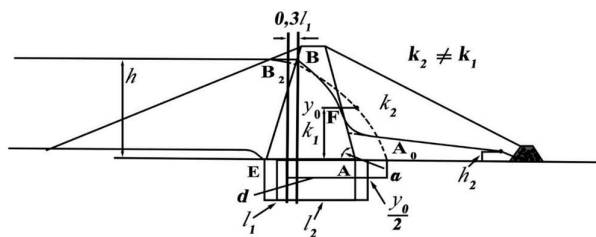
Rembesan yang terjadi pada bendungan urugan tidak homogen (bendungan urugan zonal), akan melewati beberapa zona timbunan. Pada lapisan tanah yang koefisien permeabilitasnya berbeda, garis aliran yang terjadi akan berbelok atau menyimpang pada garis batas perbedaan permeabilitas [4]. Bentuk dari garis freatik pada bendungan zonal digambarkan pada **Gambar 1**

Perembesan air yang terjadi di dalam tubuh bendung dapat secara lateral (*seepage*) maupun secara vertikal (perkolasi), yang dipengaruhi oleh permeabilitas, porositas, tekstur, tekanan pori, dan muka air tanah [5]. Toleransi terhadap rembesan yang melalui bendungan dapat ditinjau dari tinggi bendungan dan

jumlah kuantitas rembesan yang terjadi [6]. Jumlah kuantitas rembesan yang diijinkan ditampilkan pada **Tabel 2**.

Tabel 1. Batasan Kh/Kv Pada Bendungan [3]

| No | Material | Batasan Kh/Kv |
|----|--|---------------|
| 1 | Inti Bendungan Standar pemadatan USBR | 4 sd 6 |
| 2 | Inti Bendungan tanpa standar pemadatan | 9 sd 36 |
| 3 | Isian hidrolik (Hydraulic Fill) | 64 sd 225 |
| 4 | Zona pelindung stabilitas bendungan (Standar USBR) | 4 sd 9 |
| 5 | Zona drainase bendungan (Standar USBR) | 1 sd 4 |



Gambar 1. Aliran rembesan yang melewati bendungan zonal

Tabel 2. Kriteria Penerimaan Rembesan Pada Tubuh Bendung [6]

| No | Tinggi Bendungan (m) | Rembesan (Liter /Detik/m) | |
|----|----------------------|---------------------------|------------|
| | | Aman | Tidak Aman |
| 1 | < 5 | < 0,050 | > 0,075 |
| 2 | 5 – 10 | < 0,075 | > 0,017 |
| 3 | 10 – 20 | < 0,175 | > 0,350 |
| 4 | 20 – 40 | < 0,350 | > 0,700 |
| 5 | > 40 | < 0,700 | > 1,400 |

Material Timbunan Zona Inti

Salah satu dasar pertimbangan dalam menentukan jenis bendungan adalah ketersediaan material yang ada dan terdekat dengan di rencana lokasi bendungan. Terkait hal tersebut maka pengkajian mengenai kriteria material konstruksi untuk bendungan urugan sangat diperlukan untuk mendapatkan hasil pembangunan yang tepat dan efektif baik ditinjau dari segi kualitas bendungan maupun biayanya. Secara garis besar material pokok timbunan untuk tubuh bendungan yang dibedakan dalam 2 (dua) macam, yaitu [7]:

- Material yang fungsi utamanya untuk mendukung stabilitas tubuh bendungan, berupa material lulus air, seperti pasir, kerikil, dan batu.
- Material yang fungsi utamanya untuk mencegah rembesan air dari waduk, berupa material kedap air yang umumnya berupa tanah lempungan.

Tanah lempung merupakan agregat partikel-partikel berukuran mikroskopik dan submikroskopik yang berasal dari pembusukan kimiawi unsur-unsur penyusun batuan, dan bersifat plastis. Dalam keadaan kering, lempung menjadi sangat keras dan tak mudah terkelupas hanya dengan jari tangan; selain itu, permeabilitas lempung sangat rendah [8]. Semakin kecil ukuran butiran tanah, koefisien permeabilitasnya semakin rendah. Biasanya jenis tanah yang baik untuk zona kedap air adalah tanah dengan butiran halus dan bercampur secara homogen dengan dua jenis tanah yang lebih halus yaitu [7]:

- Tanah yang 10-15% bagiannya lolos saringan 0,074 mm (no 200).
- Tanah lempungan yang 5% bagiannya lolos saringan 0,053 mm. (no 270)

Material kedap air (ASTM D 2487-90) terdiri dari: lempung berplastisitas tinggi dan plastisitas sedang (CH dan CL), pasir lempungan dan kerikil lempungan (SC-GC), dan lanau lempungan (CL-ML). Material ini biasa digunakan sebagai material urugan zona inti dan selimut kedap air yang memiliki koefisien permeabilitas (setelah dipadatkan) lebih kecil dari 1×10^{-5} cm/s.

Material Geomembrane

Geomembrane adalah sebuah lapisan tipis yang terbuat dari lembaran- lembaran polimer tipis, susunan polimer geomembrane tidak benar-benar kedap, namun relatif tidak dapat ditembus ketika dibandingkan dengan geotekstil atau tanah, bahkan dibandingkan dengan tanah liat [9]. Nilai permeabilitas geomembran yang diukur dengan tes transmisi air berada dalam interval 1×10^{-12} hingga 1×10^{-15} m/s yang berarti tiga hingga enam tingkat besaran lebih rendah daripada tanah liat, sehingga fungsi utama dari geomembran adalah sebagai wadah atau penghalang untuk merembesnya air [10].

HDPE geomembran dikenal memiliki rasio kekuatan densitas dan gaya tarik yang tinggi. HDPE memiliki tekstur yang kasar dan keras serta dapat menahan suhu tinggi untuk waktu yang singkat [10]. HDPE memiliki ketahanan terhadap banyak jenis zat kimia sehingga tidak dapat direkatkan menggunakan zat kimia. Untuk memastikan agar tidak terjadi kebocoran, sambungan pada geomembrane harus dengan sistem lock atau pengelasan. Kandungan

material HDPE geomembrane adalah 97 – 97,5 % polyethylene, dan 2,5 – 3% karbon hitam. Kekuatan leleh (*yield strength*) bergantung dari ketebalannya, dari yang terendah 12 KN/mm untuk ketebalan 0,75 mm sampai dengan 28 KN/mm untuk ketebalan 2,5 mm dengan break elongation mencapai 800%. [11].

2. Metode

Pengumpulan Data

Data tanah diperoleh dari Proyek pembangunan Bendungan Tapin, berupa hasil pengujian tanah galian spillway di

laboratorium Mekanika Tanah PT Soilen; hasil pengujian trial embankment di lapangan pada material galian spillway dan data pengujian laboratorium proyek untuk material lempung, filter halus, filter kasar, rock fill dan riprap. Data geomembrane diperoleh dari brosur Geomembran PT Geotechnical Systemindo (Alvatech Sotrafa Geomembran HDPE). Data data tersebut nantinya akan digunakan sebagai data nilai nilai parameter material pada input program SEEP/W dan SLOPE/W yang akan digunakan sebagai tool dalam penelitian. (**Tabel 3**)

Tabel 3. Parameter Data Input Material

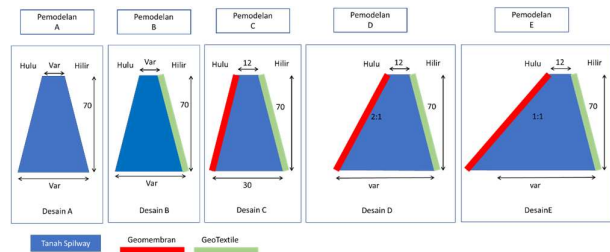
| No | Kriteria Desain | Satuan | Material | | | | | |
|-------|--------------------------------|---------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | Clay Quary | Galian Spilway | Filter Halus | Filter Kasar | Rock Fill | Rip Rap |
| 1 | Input Seep W | | | | | | | |
| 1.1 | Hydrolic | | | | | | | |
| 1.1.1 | Material Model | | | | Saturated/Unsaturated | | | |
| 1.1.2 | Ky/Kx Ratio | | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1.1.3 | Rotation | degree ^o | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.2 | Vol Water content function | | | | | | | |
| 1.2.1 | Estimation method | | | | Sample function | | | |
| 1.2.2 | Sample material | | Clay | Silty Clay | Sand | Sand | Gravel | Gravel |
| 1.2.3 | Saturated WC | % | 37,40% | 27,09% | 9,85% | 7,73% | 2,06% | 2,06% |
| 1.3 | Hydrolic Conductivity Function | | | | | | | |
| 1.3.1 | Type | | | | Hyd K Data Point | | | |
| 1.3.2 | Estimation method | | | | Van Genuchten | | | |
| 1.3.3 | Saturated Kx | (m/s) | 10 ⁻⁹ | 5,79x10 ⁻⁸ | 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁵ |
| 1.3.4 | Residual water content | % | | | 5% (Default) | | 0% | 0% |
| 2 | Input Slope W | | | | | | | |
| 2.1 | Slope stability | | | | | | | |
| 2.1.1 | Material Model | | | | Mohr Coulomb | | | |
| 2.1.2 | Unit Weight | Kn/m3 | 16,170 | 18,097 | 19,404 | 19,404 | 19,404 | 19,404 |
| 2.1.3 | Cohesion | kpa | 30,90 | 10,78 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.1.4 | Phi | degree ^o | 13 | 21,8 | 30 | 30 | 40 | 40 |

Analisis Data

Tahap analisis dilakukan dengan data parameter material yang sudah di buat. Pemodelan dibantu dengan software SEEP/W dan SLOPE/W dengan 5 jenis desain pemodelan (**Gambar 2**) yaitu:

1. Desain A: zona inti menggunakan material galian spillway secara penuh dan memodifikasi lebar zona inti agar debit rembesan masih memenuhi kriteria
2. Desain B: zona inti menggunakan material galian spillway secara penuh, memodifikasi lebar zona inti, dan mengganti zona filter halus sisi hilir dengan geotextile nonwoven agar debit rembesan masih memenuhi kriteria.
3. Desain C: zona inti menggunakan material galian spillway secara penuh dan mengganti zona filter halus sisi hulu dengan geomembrane dan zona filter halus sisi hilir dengan geotextile nonwoven.

4. Desain D: kemiringan zona inti sisi hulu diubah 2:1 sementara kemiringan zona inti sisi hilir masih tetap sesuai desain awal. Zona filter halus sisi hulu diganti dengan geomembrane dan zona filter halus sisi hilir diganti dengan geotextile nonwoven seperti desain C.
5. Desain E: kemiringan zona inti sisi hulu diubah 1:1 sementara kemiringan zona inti sisi hilir masih tetap sesuai desain awal. Zona filter halus sisi hulu diganti dengan geomembrane dan zona filter halus sisi hilir diganti dengan geotextile nonwoven seperti desain C.



Gambar 2. Detail pemodelan

Kondisi pemodelan pada **Gambar 2** dianalisa dengan menggunakan bantuan program SEEP/W dan SLOPE/W mengacu kepada beberapa kondisi pembebanan, yaitu:

- Pada saat selesai konstruksi (*immediately after completion*).
- Pada saat elevasi muka air rendah (LWL) yaitu pada EL.+ 116 m
- Pada saat elevasi muka air normal (NWL) yaitu pada EL. 145,50
- Pada saat elevasi muka air tinggi (HWL) yaitu pada EL.+ 146,89 m (Q1000)
- Pada saat elevasi muka air banjir (FWL) yaitu pada EL. 149,63 m (QPMF)
- Pada saat elevasi muka air waduk mengalami penurunan secara tiba-tiba (*rapid drawdown*) dari elevasi muka air tinggi (HWL) EL.+ 146,89 m ke elevasi pintu darurat EL. 102,50 m
- Pada saat elevasi muka air waduk mengalami penurunan secara tiba-tiba (*rapid drawdown*) dari elevasi muka air normal (HWL) EL. 146,89 ke muka air rendah (LWL) EL. 116,00 m

Analisa Biaya

Biaya konstruksi pada pemodelan dihitung berdasarkan volume material per masing masing zona. Volume dihitung berdasarkan data 3D CAD pada keseluruhan konstruksi bendungan. Harga satuan yang digunakan untuk material eksisting (Clay, filter halus, filter kasar, rock fill dan riprap) menggunakan data proyek Bendungan Tapin, sedangkan

harga satuan material baru berupa tanah galian spillway menggunakan analisa teknis biaya gali timbun material setempat. Untuk data dan harga satuan material geomembrane menggunakan data dari PT Geotechnical Systemindo (Alvatech Sotrafa Geomembran HDPE), sedangkan data dan harga satuan material geotextile nonwoven menggunakan data dari Guramatex geotextile non woven.

Pembuatan Grafik

Hasil analisis data kemudian diolah untuk menghasilkan suatu grafik model:

1. Rembesan pada kondisi FWL untuk semua tipe desain.
2. Stabilitas bendung terendah pada semua tipe desain
3. Biaya konstruksi tubuh bendung pada semua tipe desain

Kesimpulan

Kesimpulan diambil berdasarkan hasil yang diperoleh pada tahap analisis. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran lebih jelas mengenai pengaruh penggunaan kombinasi material galian spillway dengan geomembrane pada zona inti bendungan.

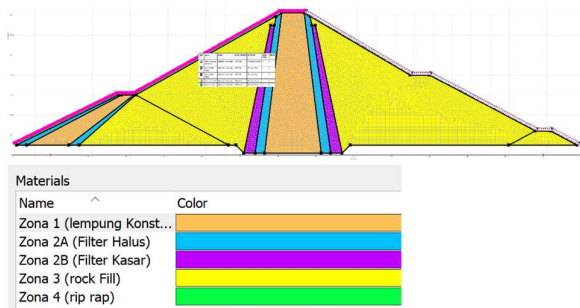
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Running Desain Awal

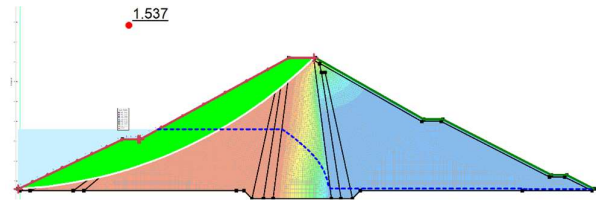
Data material yang dimasukkan berupa data tanah clay quarry, filter halus, filter kasar, rockfill dan rip rap (**Gambar 3**). Pada pemodelan program SEEP/W, akan didapat profil aliran rembesan untuk setiap kondisi pembebanan dan debit rembesan pada ujung sisi hilir. Pemodelan program SLOPE/W menggunakan parent analisis yang berupa data output dari SEEP/W akan didapat nilai *safety factor* terkecil beserta bidang kelongsorannya. Hasil profil aliran rembesan, profil *slip surface* dan *critical safety factor* ditunjukkan pada **Gambar** sampai dengan **Gambar**, sedangkan rembesan pada berbagai kondisi pembebanan ditunjukkan pada **Tabel 4**. Pada kondisi *rapid drawdown* dari HWL ke pintu air, *critical safety factor* terkecil terjadi pada hari ke 30 (**Gambar 9**), sedangkan grafik hubungan SF dengan waktu surut muka air pada kondisi *rapid drawdown* HWL ke pintu air ditunjukkan pada **Gambar 10**. Ringkasan angka keamanan pada berbagai kondisi pembebanan diberikan pada **Tabel 5**.

Tabel 4. Rembesan pada Semua Kondisi Desain Awal

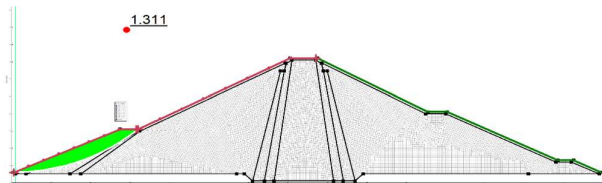
| No | Kondisi | Debit (ltr/jam/m') |
|----|---------|--------------------|
| 1 | FWL | 76,992 |
| 2 | HWL | 25,419 |
| 3 | NWL | 16,190 |
| 4 | LWL | 0,300 |



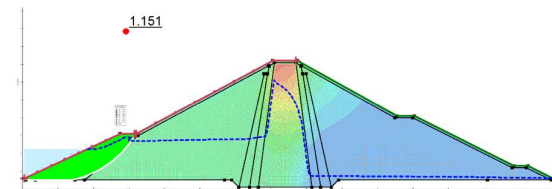
Gambar 3. Tipikal potongan melintang bendungan Tapin



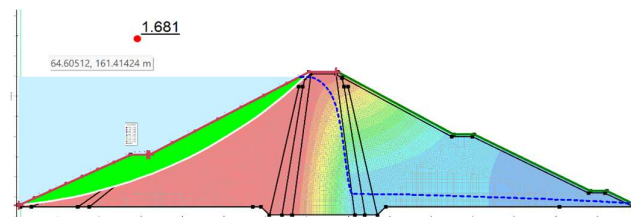
Gambar 8. Profil rembesan, slip surface dan critical safety factor pada kondisi LWL



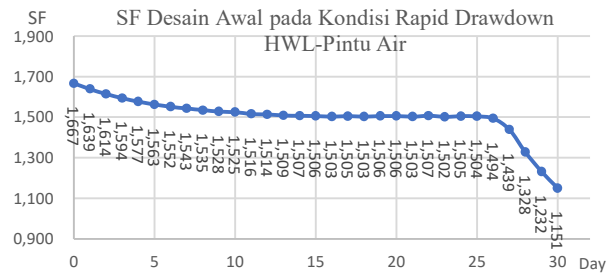
Gambar 4. Profil rembesan, slip surface, dan critical safety factor pada kondisi selesai kontruksi desain awal



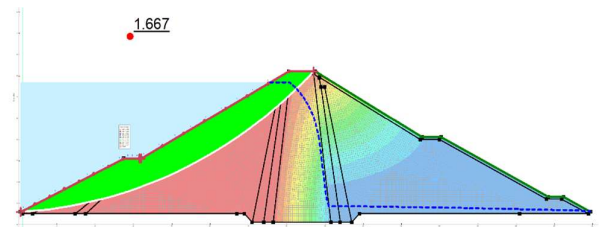
Gambar 9. Profil rembesan, slip surface dan critical safety factor terkecil pada kondisi rapid drawdown (RDD) HWL ke pintu air, pada hari ke- 30



Gambar 5. Profil rembesan, slip surface, dan critical safety factor pada kondisi FWL desain awal



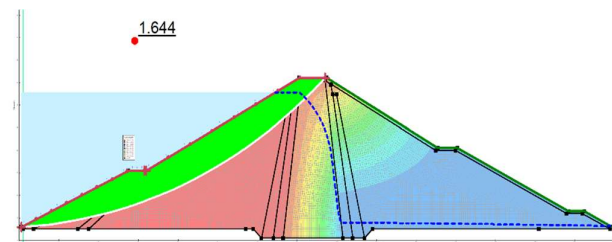
Gambar 10. Grafik hubungan SF dengan waktu surut muka air pada kondisi RDD HWL ke pintu air desain awal



Gambar 6. Profil rembesan, slip surface dan critical safety factor pada kondisi HWL desain awal

Tabel 5. Safety Factor (SF) pada Desain Awal

| Kondisi | SF Ijin | SF Hulu |
|--------------------------|---------|---------|
| Pasca Konstruksi | 1,200 | 1,311 |
| FWL | 1,200 | 1,681 |
| HWL | 1,200 | 1,667 |
| NWL | 1,200 | 1,644 |
| LWL | 1,200 | 1,537 |
| Rapid Drawdown HWL-Pintu | 1,100 | 1,151 |
| Rapid Drawdown HWL-LWL | 1,100 | 1,515 |



Gambar 7. Profil rembesan, slip surface dan critical safety factor pada kondisi NWL desain awal

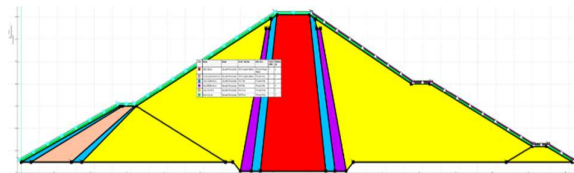
Berdasarkan perhitungan luasan CAD per masing masing zona, didapat volume total untuk keseluruhan zona seperti ditunjukkan pada Tabel 6 dengan prakiraan total biaya pekerjaan untuk timbunan tubuh bendung pada Bendungan Tapin adalah Rp 303.752.648.212

Tabel 6. Perhitungan Biaya Total Desain Awal

| Zona | Vol Total | Harga Satuan | Total Harga |
|--------------|------------------|--------------|------------------------|
| Zona 1 | 211.101 | 114.819 | 24.238.405.719 |
| Zona 2A | 78.512 | 288.016 | 22.612.712.192 |
| Zona 2B | 70.207 | 288.016 | 20.220.739.312 |
| Zona 3 | 868.829 | 252.681 | 219.536.580.549 |
| Zona 4 | 48.835 | 351.064 | 17.144.210.440 |
| Total | 1.277.484 | | 303.752.648.212 |

Hasil Running Desain A

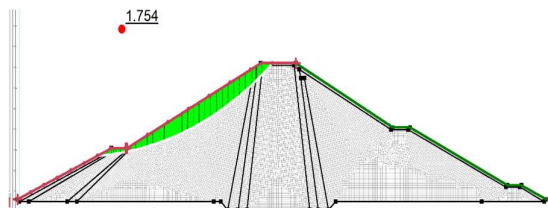
Pada pemodelan Desain A, data material yang digunakan adalah data tanah galian spilway, filter halus, filter kasar, rockfill, dan rip rap (**Gambar 11**). Hasil profil aliran rembesan, profil *slip surface* dan *critical safety factor* ditunjukkan pada **Gambar** sampai **Gambar**, sedangkan rembesan pada berbagai kondisi pembebanan ditunjukkan pada **Tabel 7**. Pada kondisi *rapid drawdown* dari HWL ke pintu air, *critical safety factor* terkecil terjadi pada hari ke 22 (**Gambar**), sedangkan grafik hubungan SF dengan waktu surut muka air pada kondisi *rapid drawdown* HWL ke pintu air ditunjukkan pada **Gambar**. *Summary safety factor* pada berbagai kondisi pembebanan ditunjukkan pada **Tabel 8**.



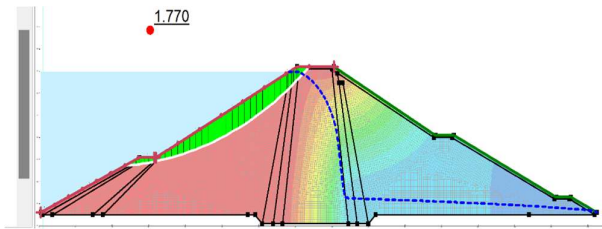
Lebar Inti Bendungan berdasarkan trial dilebarkan 7 meter

| Color | Name | Model | Vol. W.C. | Function | K-Function | Ky/IKc Ratio | Rotation (°) |
|--------|--------------------------|-------------------------|-----------|--------------------|-------------------------------|--------------|--------------|
| Red | Galian Spilway | Saturated / Unsaturated | VWC | Mat galian Spilway | K Function Mat galian Spilway | 3 | 0 |
| Orange | Lempung (Des Kosstruksi) | Saturated / Unsaturated | VWC | Mat galian Spilway | K Function Clay | 3 | 0 |
| Blue | Zona 2A (Filter Halus) | Saturated / Unsaturated | VWC | Filter | K Function Filter | 1 | 0 |
| Purple | Zona 2B (Filter Kasar) | Saturated / Unsaturated | VWC | Filter | K Function Filter | 1 | 0 |
| Yellow | Zona 3 (rock Fill) | Saturated / Unsaturated | VWC | Rock | K Function Rock | 1 | 0 |
| Green | Zona 4 (rip rap) | Saturated / Unsaturated | VWC | Rock | K Function Rock | 1 | 0 |

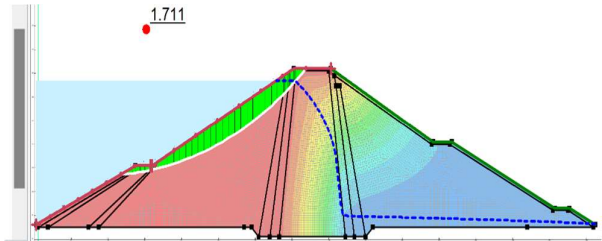
Gambar 11. Tipikal potongan melintang Desain A pada model GeoStudio



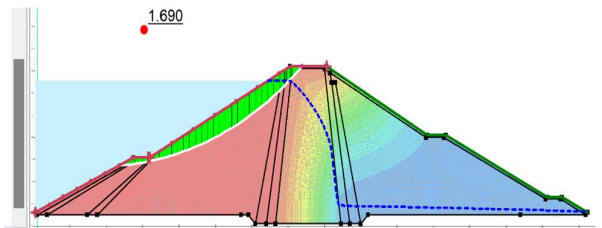
Gambar 12. Profil rembesan, *slip surface* dan *critical safety factor* pada kondisi selesai konstruksi Desain A



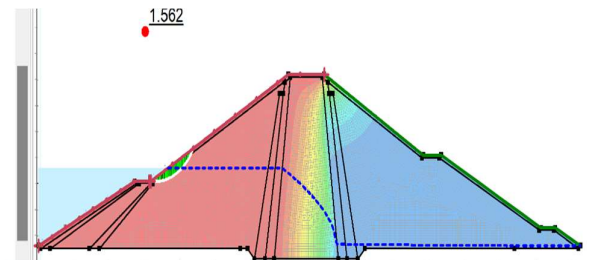
Gambar 13. Profil rembesan, *slip surface* dan *critical safety factor* pada kondisi FWL Desain A



Gambar 14. Profil rembesan, *slip surface* dan *critical safety factor* pada kondisi HWL Desain A



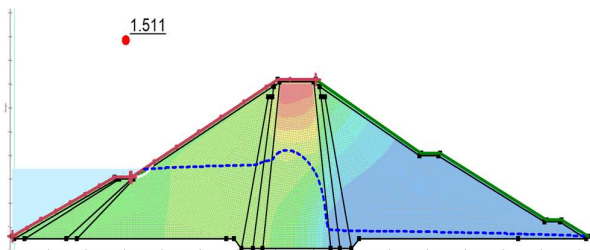
Gambar 15. Profil rembesan, *slip surface* dan *critical safety factor* pada kondisi NWL Desain A



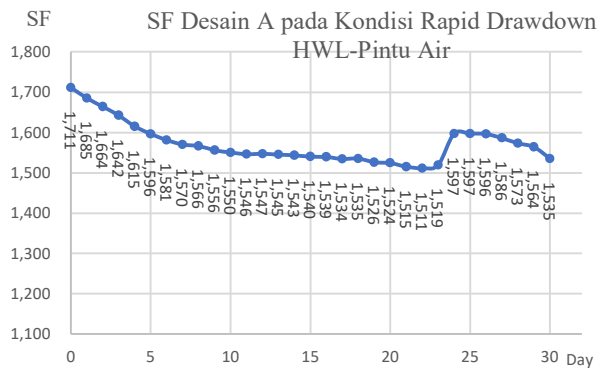
Gambar 16. Profil rembesan, *slip surface* dan *critical safety factor* pada kondisi LWL Desain A

Tabel 7. Rembesan Pada Semua Kondisi Desain A

| No | Kondisi | Debit (ltr/jam/m') |
|----|---------|--------------------|
| 1 | FWL | 92,995 |
| 2 | HWL | 39,787 |
| 3 | NWL | 29,843 |
| 4 | LWL | 4,012 |



Gambar 17. Profil rembesan, *slip surface* dan *critical safety factor* pada kondisi RDD HWL ke pintu air, pada hari ke- 22 Desain A



Gambar 18. Grafik hubungan SF dengan waktu surut muka air pada kondisi *rapid drawdown* HWL ke pintu air Desain A

Berdasarkan perhitungan luasan CAD per masing zona, didapat volume total untuk keseluruhan zona seperti ditunjukkan pada **Tabel 9** dengan prakiraan total biaya pekerjaan untuk timbunan tubuh bendung desain A adalah Rp 284.775.619.785 atau lebih hemat Rp 18.977.028.426 (6,25%) dari desain awal.

Hasil Running Desain B

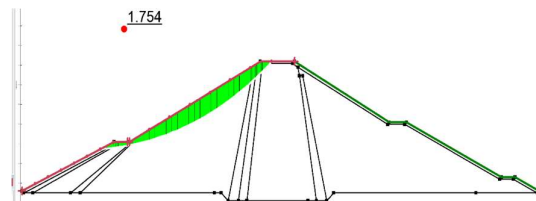
Pada pemodelan Desain B, data material yang digunakan berupa data tanah galian spilway, filter halus, filter kasar, rockfill, dan rip rap. Filter halus sisi hilir pada desain ini digantikan dengan material geotextile non-woven. (**Gambar**). Hasil profil aliran rembesan, profil *slip surface* dan *critical safety factor* ditunjukkan pada **Gambar** sampai **Gambar** , sedangkan rembesan pada berbagai kondisi pembebanan ditunjukkan pada **Tabel 10**. Pada kondisi *rapid drawdown* dari HWL ke pintu air, *critical safety factor* terkecil terjadi pada hari ke 22 (**Gambar 25**), sedangkan grafik hubungan SF dengan waktu surut muka air pada kondisi *rapid drawdown* HWL ke pintu air ditunjukkan pada **Gambar** . Summary safety factor pada berbagai kondisi pembebanan ditunjukkan pada **Tabel 11**

Tabel 8. Safety Factor (SF) Pada Desain A

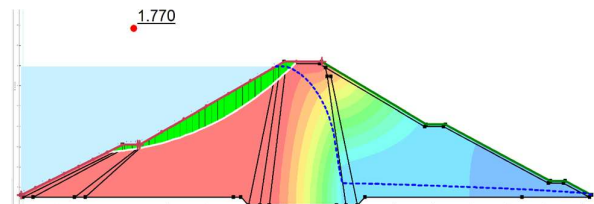
| Kondisi | SF Ijin | SF Hulu |
|--------------------------|---------|---------|
| Pasca Konstruksi | 1,200 | 1,754 |
| FWL | 1,200 | 1,770 |
| NWL | 1,200 | 1,711 |
| LWL | 1,200 | 1,562 |
| Rapid Drawdown HWL-Pintu | 1,100 | 1,511 |
| Rapid Drawdown HWL-LWL | 1,100 | 1,527 |

Tabel 9. Perhitungan Biaya Total Desain A

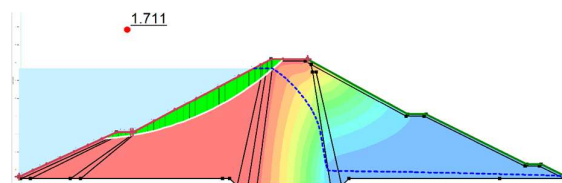
| Zona | Vol Total | Harga Sat | Total Harga |
|----------------|-----------|-----------|------------------------|
| Galian Spilway | 279.018 | 30.000 | 8.370.561.237 |
| Zona 2A | 88.624 | 288.016 | 25.525.129.599 |
| Zona 2B | 63.340 | 288.016 | 18.243.056.957 |
| Zona 3 | 844.580 | 252.681 | 213.409.421.311 |
| Zona 4 | 54.769 | 351.064 | 19.227.450.680 |
| Total | | | 284.775.619.785 |



Gambar 20. Profil rembesan, *slip surface* dan *critical safety factor* pada kondisi selesai konstruksi Desain B



Gambar 21. Profil rembesan, *slip surface* dan *critical safety factor* pada kondisi FWL Desain B



Gambar 22. Profil rembesan, *slip surface* dan *critical safety factor* pada kondisi HWL Desain B

Tabel 11. *Safety Factor (SF)* pada Desain B

| Kondisi | SF Ijin | SF Hulu |
|--------------------------|---------|---------|
| Pasca Konstruksi | 1,200 | 1,754 |
| FWL | 1,200 | 1,770 |
| HWL | 1,200 | 1,711 |
| NWL | 1,200 | 1,690 |
| LWL | 1,200 | 1,562 |
| Rapid Drawdown HWL-Pintu | 1,100 | 1,511 |
| Rapid Drawdown HWL-LWL | 1,100 | 1,527 |

Berdasarkan perhitungan luasan CAD per masing masing zona, didapat volume total untuk keseluruhan zona seperti ditunjukkan pada **Tabel 12** dengan prakiraan total biaya pekerjaan untuk timbunan tubuh bendung desain B adalah Rp 276.093.625.821 atau lebih hemat Rp 27.659.022.390 (9,11%) dari desain awal.

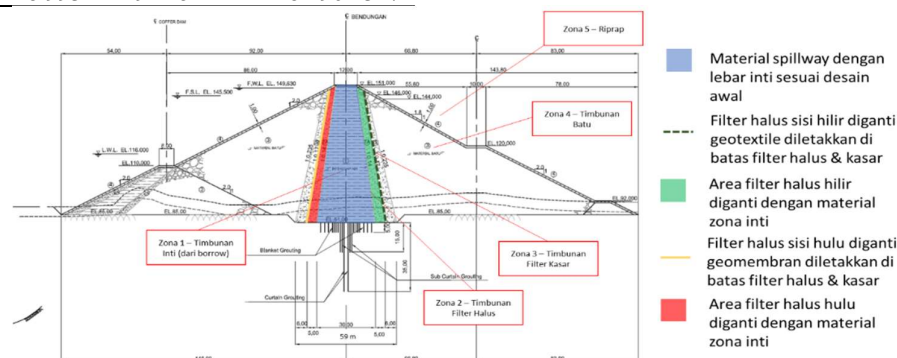
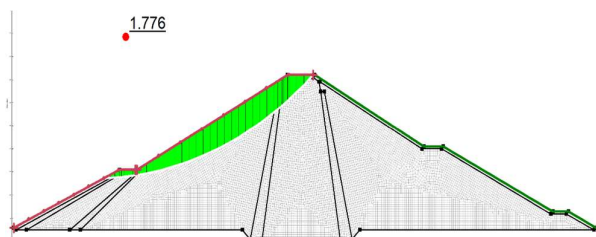
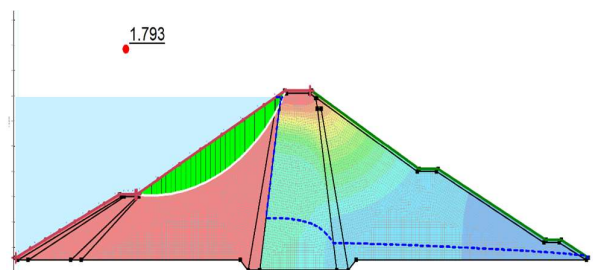
Tabel 12. Perhitungan Biaya Total Desain B

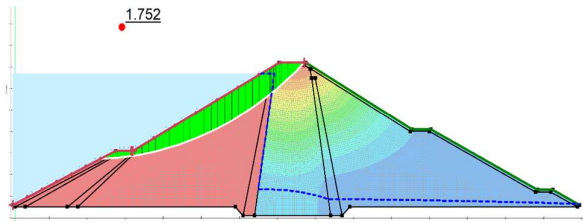
| Zona | Vol Total | Harga Satuan | Total Harga |
|----------------|-----------|--------------|----------------|
| Galian Spilway | 312.986 | 30.000 | 9.389.595.793 |
| Zona 2A | 54.653 | 288.016 | 15.741.139.752 |
| Geotextile | 8.993 | 9.225 | 82.961.327 |

| | | | |
|--------------|---------|---------|------------------------|
| Zona 2B | 63.340 | 288.016 | 18.243.056.957 |
| Zona 3 | 844.580 | 252.681 | 213.409.421.311 |
| Zona 4 | 54.769 | 351.064 | 19.227.450.680 |
| Total | | | 276.093.625.821 |

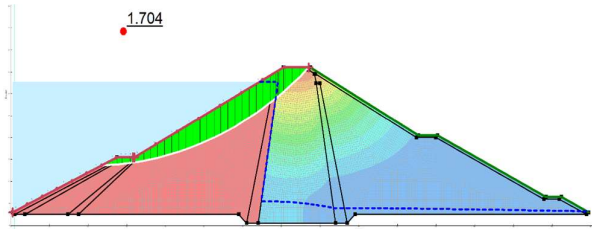
Hasil running Desain C

Pada pemodelan Desain C, data material yang digunakan berupa data tanah galian spilway, filter halus, filter kasar, rockfill, rip rap, geotextile non woven dan geomembrane. Filter halus sisi hilir pada desain ini digantikan dengan material geotextile non-woven, dan filter halus sisi hulu digantikan dengan material geomembrane (**Gambar**). Hasil profil aliran rembesan, profil *slip surface* dan *critical safety factor* ditunjukkan pada **Gambar 28** sampai **Gambar 432**, sedangkan rembesan pada berbagai kondisi pembebanan ditunjukkan pada **Tabel 13**. Pada kondisi *rapid drawdown* dari HWL ke pintu air, *critical safety factor* terkecil terjadi pada hari ke 30 (**Gambar33**), sedangkan grafik hubungan SF dengan waktu surut muka air pada kondisi rapid drawdown HWL ke pintu air ditunjukkan pada **Gambar34**. Sumary *safety factor* pada berbagai kondisi pembebanan ditunjukkan pada **Tabel 14**.

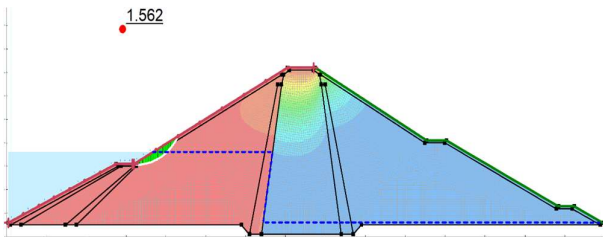
**Gambar 27.** Tipikal potongan melintang Desain C**Gambar 28.** Profil rembesan, *slip surface* dan *critical safety factor* pada kondisi selesai konstruksi Desain C**Gambar 29.** Profil rembesan, *slip surface* dan *critical safety factor* pada kondisi FWL Desain C



Gambar 30. Profil rembesan, slip surface dan critical safety factor pada kondisi HWL Desain C



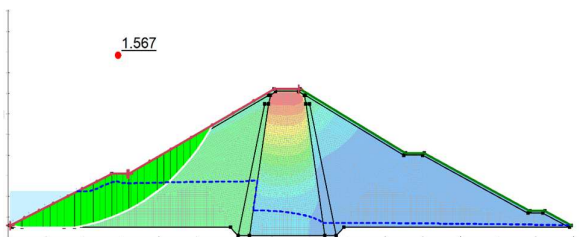
Gambar 31. Profil rembesan, slip surface dan critical safety factor pada kondisi NWL Desain C



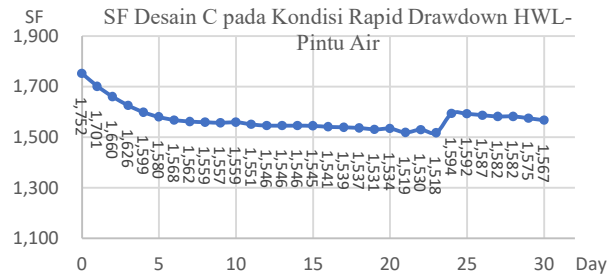
Gambar 4. Profil rembesan, slip surface dan critical safety factor pada kondisi LWL Desain C

Tabel 13. Rembesan pada Semua Kondisi Desain C

| No | Kondisi | Debit (ltr/jam/m') |
|----|---------|--------------------|
| 1 | FWL | 8,363 |
| 2 | HWL | 2,662 |
| 3 | NWL | 1,669 |
| 4 | LWL | 0,021 |



Gambar 33. Profil slip surface dan critical safety factor terkecil pada kondisi rapid drawdown HWL ke pintu air, pada hari ke- 30 Desain C



Gambar 34. Grafik hubungan SF dengan waktu surut muka air pada kondisi rapid drawdown HWL ke pintu air Desain C

Tabel 14. Safety Factor (SF) Pada Desain C

| Kondisi | SF Ijin | SF Hulu |
|--------------------------|---------|---------|
| Pasca Konstruksi | 1,200 | 1,776 |
| FWL | 1,200 | 1,793 |
| HWL | 1,200 | 1,752 |
| NWL | 1,200 | 1,704 |
| LWL | 1,200 | 1,562 |
| Rapid Drawdown HWL-Pintu | 1,100 | 1,518 |
| Rapid Drawdown HWL-LWL | 1,100 | 1,530 |

Berdasarkan perhitungan luasan CAD per masing masing zona, didapat volume total untuk keseluruhan zona seperti ditunjukkan pada **Tabel 15** dengan prakiraan total biaya pekerjaan untuk timbunan tubuh bendung desain C adalah Rp 266.223.883.897 atau lebih hemat Rp 37.528.764.314 (12,36%) dari desain awal.

Tabel 15. Perhitungan Biaya Total Desain C

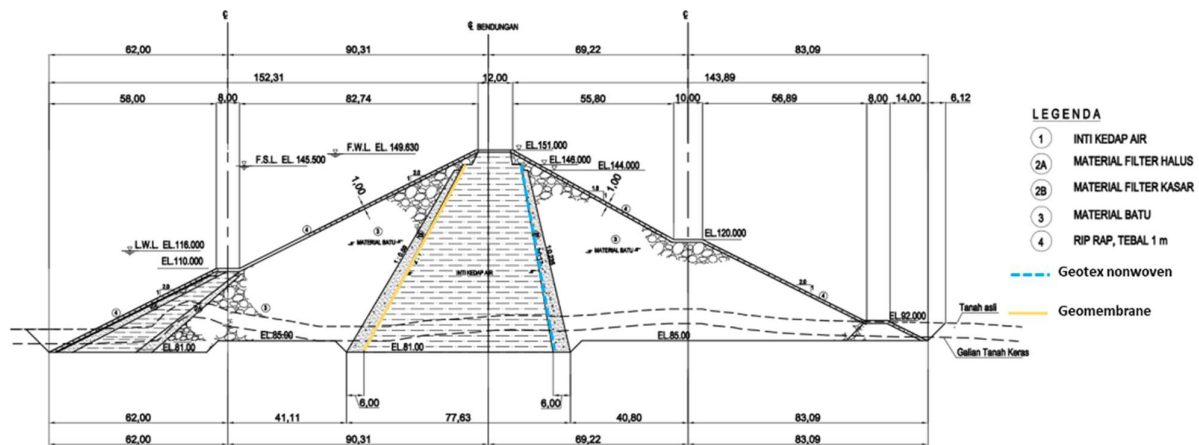
| Zona | Vol | | Total Harga |
|----------------|---------|---------|------------------------|
| | Total | Satuan | |
| Galian Spilway | 294.910 | 30.000 | 8.847.326.491 |
| Zona 2A | 20.811 | 288.016 | 5.993.953.315 |
| Geotextile | 8.993 | 9.225 | 82.961.327 |
| Geomembrane | 8.993 | 89.000 | 800.385.705 |
| Zona 2B | 63.175 | 288.016 | 18.195.534.108 |
| Zona 3 | 845.213 | 252.681 | 213.569.294.992 |
| Zona 4 | 53.364 | 351.064 | 18.734.427.956 |
| Total | | | 266.223.883.897 |

Hasil running Desain D

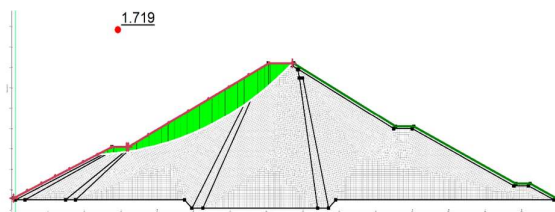
Pada pemodelan D data material yang dimasukkan berupa data tanah galian spilway, filter halus, filter kasar, rockfill, rip rap, geotextile non woven dan geomembrane. Pada desain D penggunaan geotextile non woven dan

geomembrane sama dengan desain C, namun untuk meningkatkan optimasi, kemiringan zona inti sisi hulu diubah menjadi lebih landai yaitu 2:1 sementara kemiringan zona inti sisi hilir masih tetap sesuai desain awal. (Gambar). Hasil profil aliran rembesan, profil *slip surface* dan *critical safety factor* ditunjukkan pada Gambar 5 sampai Gambar , sedangkan rembesan pada berbagai kondisi

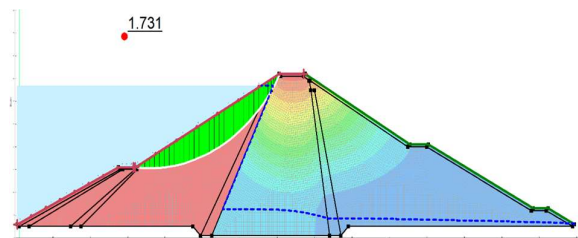
pembebanan ditunjukkan pada Tabel 16. Pada kondisi *rapid drawdown* dari HWL ke pintu air, *critical safety factor* terkecil terjadi pada hari ke 13 (Gambar 1), sedangkan grafik hubungan SF dengan waktu surut muka air pada kondisi *rapid drawdown* HWL ke pintu air ditunjukkan pada Gambar 6. Summary *safety factor* pada berbagai kondisi pembebanan ditunjukkan pada Tabel 17.



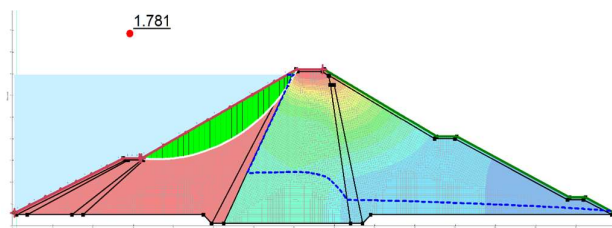
Gambar 35. Tipikal potongan melintang Desain D



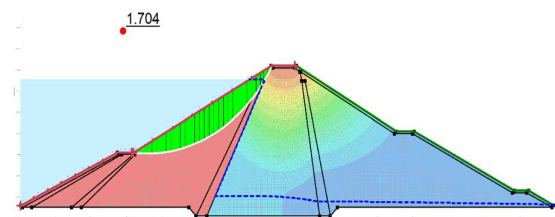
Gambar 56. Profil rembesan, *slip surface* dan *critical safety factor* pada kondisi selesai konstruksi Desain D



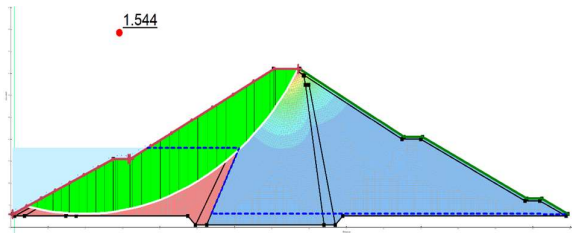
Gambar 38. Profil rembesan, *slip surface* dan *critical safety factor* pada kondisi HWL Desain D



Gambar 37. Profil rembesan, *slip surface* dan *critical safety factor* pada kondisi FWL Desain D



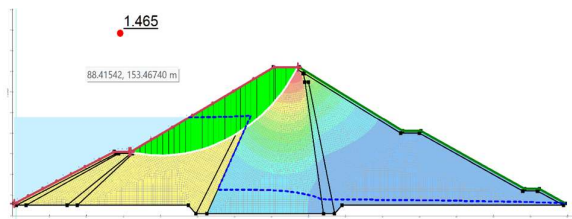
Gambar 39. Profil rembesan, *slip surface* dan *critical safety factor* pada kondisi NWL Desain D



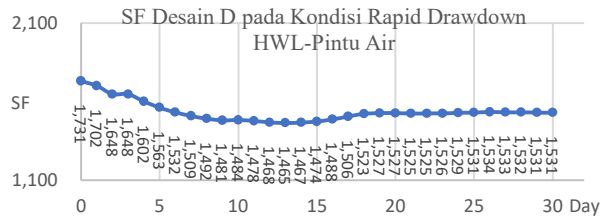
Gambar 40. Profil rembesan, slip surface dan critical safety factor pada kondisi LWL Desain D

Tabel 16. Rembesan pada Semua Kondisi Desain D

| No | Kondisi | Debit (ltr/jam/m') |
|----|---------|--------------------|
| 1 | FWL | 8,475 |
| 2 | HWL | 2,655 |
| 3 | NWL | 1,665 |
| 4 | LWL | 0,021 |



Gambar 41. Profil slip surface dan critical safety factor terkecil pada kondisi rapid drawdown HWL ke pintu air, pada hari ke- 13 Desain D



Gambar 6. Grafik hubungan SF dengan waktu surut muka air pada kondisi rapid drawdown HWL ke pintu air Desain D

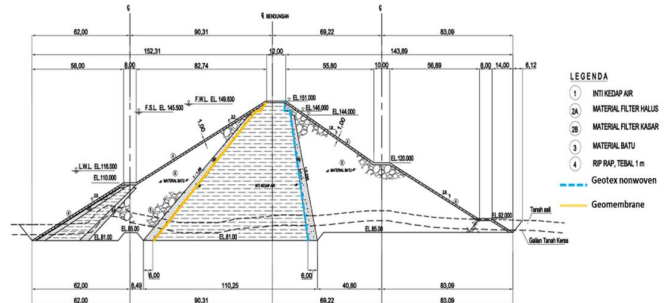
Tabel 17. Safety Factor (SF) Pada Desain D

| Kondisi | SF Ijin | SF Hulu |
|--------------------------|---------|---------|
| Pasca Konstruksi | 1,200 | 1,719 |
| FWL | 1,200 | 1,781 |
| HWL | 1,200 | 1,731 |
| NWL | 1,200 | 1,704 |
| LWL | 1,200 | 1,544 |
| Rapid Drawdown HWL-Pintu | 1,100 | 1,465 |
| Rapid Drawdown HWL-LWL | 1,100 | 1,467 |

Berdasarkan perhitungan luasan CAD per masing masing zona, didapat volume total untuk keseluruhan zona seperti ditunjukkan pada **Tabel 18** dengan prakiraan total biaya pekerjaan untuk timbunan tubuh bendung desain D adalah Rp 247.809.012.752 atau lebih hemat Rp 55.943.635.459 (18,42%) dari desain awal.

Tabel 18. Perhitungan Biaya Total Desain D

| Zona | Vol Total | Harga Satuan | Total Harga |
|----------------|-----------|--------------|------------------------|
| Galian Spilway | 390.909 | 30.000 | 11.727.271.484 |
| Zona 2A | 20.811 | 288.016 | 5.993.953.315 |
| Geotextile | 9.879 | 9.225 | 91.134.945 |
| Geomembrane | 9.879 | 89.000 | 879.242.293 |
| Zona 2B | 62.904 | 288.016 | 18.117.639.514 |
| Zona 3 | 760.901 | 252.681 | 192.265.343.242 |
| Zona 4 | 53.364 | 351.064 | 18.734.427.956 |
| Total | | | 247.809.012.752 |

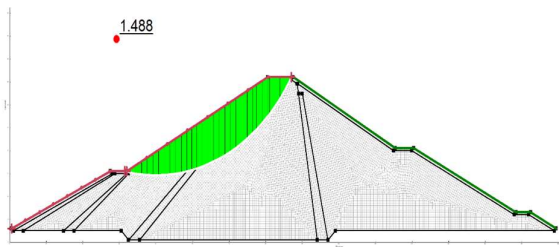


Gambar 43. Tipikal potongan melintang Desain E

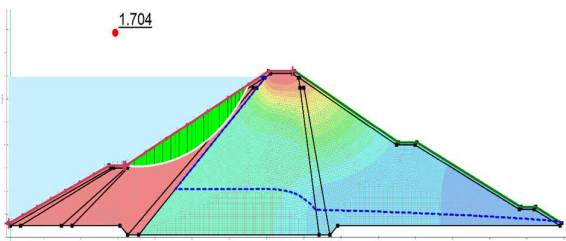
Hasil running Desain E

Pada pemodelan E, data material yang dimasukkan berupa data tanah galian spilway, filter halus, filter kasar, rockfill, rip rap, geotextile non woven dan geomembrane. Pada Desain E penggunaan geotextile non woven dan geomembrane sama dengan desain C dan D, namun untuk meningkatkan optimasi, kemiringan zona inti sisi hulu diubah menjadi lebih landai yaitu 1:1 sementara kemiringan zona inti sisi hilir masih tetap sesuai desain awal (**Gambar**). Hasil profil aliran rembesan, profil slip surface dan critical safety factor ditunjukkan pada **Gambar** sampai **Gambar**, sedangkan rembesan pada berbagai kondisi pembebanan ditunjukkan pada **Tabel 19**. Pada kondisi rapid drawdown dari HWL ke pintu air, critical safety factor terkecil terjadi pada hari ke 13 (**Gambar**), sedangkan grafik hubungan SF dengan waktu surut muka air pada kondisi rapid drawdown HWL ke pintu air ditunjukkan pada **Gambar**. Summary safety

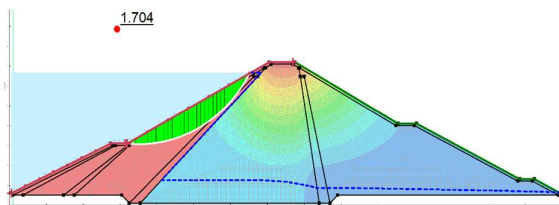
factor pada berbagai kondisi pembebanan ditunjukkan pada Tabel 20.



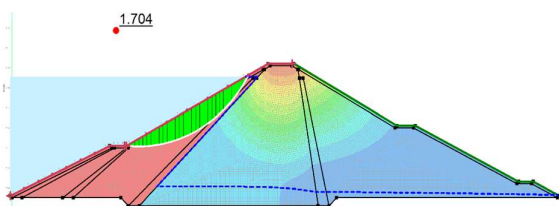
Gambar 44 Profil rembesan, slip surface dan critical safety factor pada kondisi selesai konstruksi Desain E



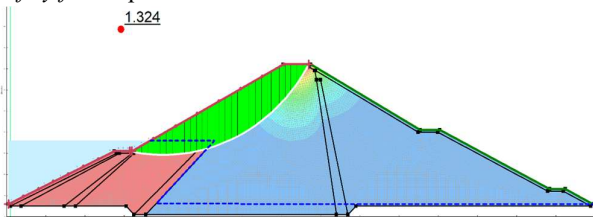
Gambar 45. Profil rembesan, slip surface dan critical safety factor pada kondisi FWL Desain E



Gambar 46. Profil rembesan, slip surface dan critical safety factor pada kondisi HWL Desain E



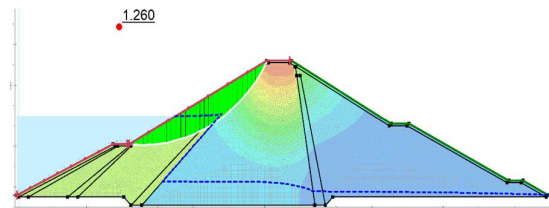
Gambar 48. Profil rembesan, slip surface dan critical safety factor pada kondisi NWL Desain E



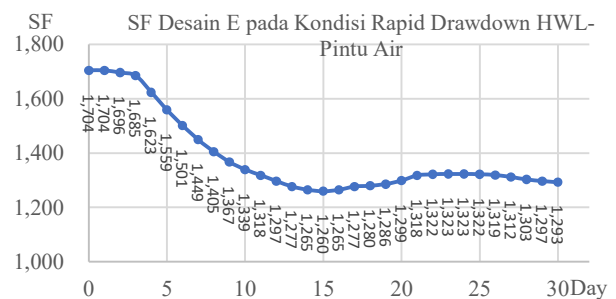
Gambar 49. Profil rembesan, slip surface dan critical safety factor pada kondisi LWL desain E

Tabel 19. Rembesan Pada Semua Kondisi Desain E

| No | Kondisi | Debit (ltr/jam/m') |
|----|---------|--------------------|
| 1 | FWL | 8,357 |
| 2 | HWL | 2,655 |
| 3 | NWL | 1,665 |
| 4 | LWL | 0,021 |



Gambar 50. Profil slip surface dan critical safety factor terkecil pada kondisi rapid drawdown HWL ke pintu air, pada hari ke- 15 desain E



Gambar 51. Grafik hubungan SF dengan waktu surut muka air pada kondisi rapid drawdown HWL ke pintu air desain E

Berdasarkan perhitungan luasan CAD per masing masing zona, didapat volume total untuk keseluruhan zona seperti ditunjukkan pada Tabel 21 dengan prakiraan total biaya pekerjaan untuk timbunan tubuh bendung desain E adalah Rp 220.136.701.289 atau lebih hemat Rp 83.615.946.822 (27,53%) dari desain awal.

Tabel 20. Safety Factor (SF) Pada Desain E

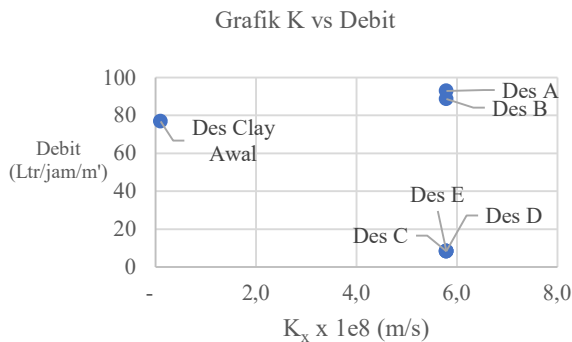
| Kondisi | SF Ijin | SF Hulu |
|--------------------------|---------|---------|
| Pasca Konstruksi | 1,200 | 1,488 |
| FWL | 1,200 | 1,704 |
| HWL | 1,200 | 1,704 |
| NWL | 1,200 | 1,704 |
| LWL | 1,200 | 1,324 |
| Rapid Drawdown HWL-Pintu | 1,100 | 1,260 |
| Rapid Drawdown HWL-LWL | 1,100 | 1,262 |

Tabel 21. Perhitungan Biaya Total Desain E

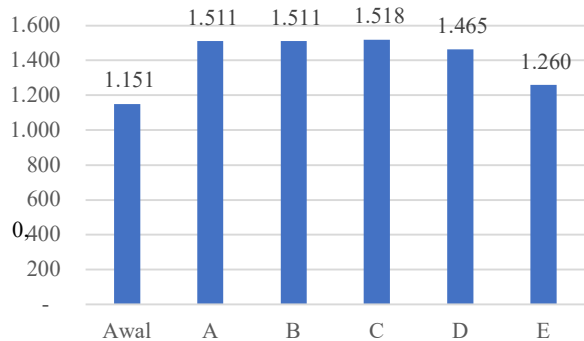
| Zona | Vol Total | Harga Satuan | Total Harga |
|----------------|-----------|--------------|------------------------|
| Galian Spilway | 534.323 | 30.000 | 16.029.696.415 |
| Zona 2A | 20.811 | 288.016 | 5.993.953.315 |
| Geotextile | 9.879 | 9.225 | 91.134.945 |
| Geomembrane | 9.879 | 89.000 | 879.242.293 |
| Zona 2B | 62.904 | 288.016 | 18.117.639.514 |
| Zona 3 | 634.359 | 252.681 | 160.290.606.94 |
| Zona 4 | 53.364 | 351.064 | 18.734.427.956 |
| Total | | | 220.136.701.389 |

Perbandingan Desain A, B, C, D dan E

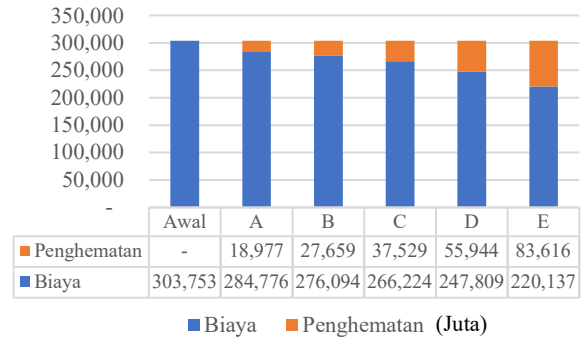
Berdasarkan Analisa program pada desain A, B, C, D dan E, dapat dirangkum perbandingan hasil rembesan pada kondisi Flood Water Level (FWL) (**Gambar 52**), safety factor terendah (**Gambar 7**) dan biaya konstruksi (**Gambar 8**). Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa desain E merupakan desain yang paling ekonomis dan memenuhi kriteria rembesan dan *safety factor*.



Gambar 52. Rembesan pada kondisi FWL pada semua tipe desain



Gambar 93. Stabilitas bendung terendah pada semua tipe desain



Gambar 54. Biaya konstruksi tubuh bendung pada semua tipe desain

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan material galian spillway untuk zona inti dengan ketebalan 7,0 meter pada Desain A menghasilkan debit rembesan pada hilir bendungan sebesar 92,994 liter/jam/m' dimana angka tersebut masih diatas debit rembesan desain awal sebesar 76,99 liter/jam/m'; jadi Desain A tidak memenuhi persyaratan.
2. Penambahan tebal zona inti sisi hilir sebesar 3,0 meter (sebagai pengganti tebal zona filter halus) disertai dengan penambahan lembar geotextile non-woven menghasilkan penurunan debit bendungan dari semula 92,994 liter/jam/m' (Desain A) menjadi 88,795 liter/jam/m' (Desain B); jadi Desain B juga belum memenuhi persyaratan.
3. Penggunaan geomembrane sebagai lapisan kedap air dan pengganti material filter halus sisi hulu sangat berpengaruh terhadap penurunan debit rembesan; pada Desain C rembesan turun menjadi 8,36 liter/jam/m' atau turun 89,14% terhadap desain awal (76,99 liter/jam/m')
4. Perubahan debit rembesan pada Desain D sebesar 8,47 liter/jam/m' atau terjadi kenaikan yang tidak signifikan dibandingkan dengan Desain C, namun dengan merubah kemiringan zona inti sisi hulu menjadi lebih landai yaitu 2:1, volume zona rockfill berkurang sebesar 9,98% dari Desain C.
5. Perubahan debit rembesan pada Desain E sebesar 8,35 liter/jam/m' atau terjadi penurunan yang tidak signifikan dibandingkan Desain D, namun dengan merubah kemiringan zona inti sisi hulu menjadi lebih landai yaitu 1:1, volume zona rockfill berkurang sebesar 24,95% dari desain C.
6. Angka keamanan kritis yang terjadi pada 5 type desain bendungan adalah sebagai berikut:

- a. Desain A, angka keamanan kritis sebesar 1,511 terjadi pada kondisi Rapid Drawdown dari HWL ke pintu air pada hari ke-30.
 - b. Desain B, angka keamanan kritis sebesar 1,511 terjadi pada kondisi Rapid Drawdown dari HWL ke pintu air pada hari ke-30.
 - c. Desain C, angka keamanan kritis sebesar 1,518 terjadi pada kondisi Rapid Drawdown dari HWL ke pintu air pada hari ke-23.
 - d. Desain D, angka keamanan kritis sebesar 1,465 terjadi pada kondisi Rapid Drawdown dari HWL ke pintu air pada hari ke-13.
 - e. Desain E, angka keamanan kritis sebesar 1,260 terjadi pada kondisi Rapid Drawdown dari HWL ke pintu air pada hari ke-15.
7. Optimasi biaya yang dihasilkan dari 5 type desain bendungan adalah sebagai berikut:
- a. Desain A menghasilkan optimasi biaya sebesar 18,9 Milyar atau lebih hemat 6,25% dari desain awal.
 - b. Desain B menghasilkan optimasi biaya sebesar 27,6 Milyar atau lebih hemat 9,11% dari desain awal.
 - c. Desain C menghasilkan optimasi biaya sebesar 37,5 Milyar atau lebih hemat 12,36% dari desain awal.
 - d. Desain D menghasilkan optimasi biaya sebesar 55,9 Milyar atau lebih hemat 18,42% dari desain awal.
 - e. Desain E menghasilkan optimasi biaya sebesar 83,6 Milyar atau lebih hemat 27,53% dari desain awal.

Daftar Pustaka

- [1] S. Sosrodarsono, Bendungan Tipe Urugan, Jakarta: PT Pradnya Paramita, 2002.
- [2] Sukirman, Analisis Rembesan Pada Bendung Tipe Urugan Melalui Uji Hidrolik, vol. 2, Palembang, Sumatra Selatan: Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan, 2016.
- [3] S. N. Indonesia, Metoda Analisis dan Cara Pengendalian Rembesan Air Untuk Bendungan Tipe Urugan, Jakarta: Badan Starndarisasi Nasional, 2016.
- [4] Sobriah, Pengaruh Fluktuasi Muka Air Waduk Terhadap Debit Rembesan Menggunakan Model Seep/W (Studi Kasus di Bendungan Benel, Kabupaten Jembrana, Bali), Surakarta, Jawa Tengah: e-Jurnal MATRIKS TEKNIK SIPIL, 2014, pp. 471-476.
- [5] M. Ikhdam, . Analisis Debit dan Pola Penyebaran Aliran Air (Seepage) Serta Pengaruhnya Terhadap Stabilitas Pada Model Tanggul Dengan Bahan Tanah Latosol Darmaga, Bogor, Bogor: Fakultas Teknologi Pertanian, IPB Bogor, 2005.
- [6] B. Look, Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables, London: Taylor & Francis Group, 2007
- [7] D. Affandi, Kriteria Material Konstruksi Untuk Bendungan Urugan (Studi Kasus Bendungan Sindangheula), vol. 5, Bandung, Jawa barat: Jurnal Teknik Hidraulik, 2014, pp. 165-180.
- [8] K. d. R. P. Terzaghi, Mekanika Tanah Dalam Praktek Rekayasa Jilid 1, Jakarta: Erlangga, 1987.
- [9] Bagaskara, Analisis Sifat Mekanis Geomembrane HDPE yang Telah digunakan Sebagai Rumah Bio Gas, Yogyakarta: Universitas Sanata Dharma, 2016
- [10] D. B. T. Dit Bintek, Modul Pelatihan Geosintetik Volume 1, Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga, Departemen pekerjaan Umum, 2009.
- [11] Softrafa, *Alvatech Geomembrane Brosur*, Paraje Cartabona: Softrafa Geomembrane Division, 1998

Halaman ini sengaja dikosongkan