

Analisis Keruntuhan Hidraulik pada Bendung Menggunakan Metode Elemen Hingga

Novy Haryati^{1*}, Meli Muchlian¹, Muhammad Ridwan¹ & Wenda Nofera¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Padang

Email: novyharyati@itp.ac.id

Dikirim: 23 Juni 2023

Direvisi: 27 Juli 2023

Diterima: 28 Juli 2023

ABSTRAK

Bendung adalah struktur bendungan berkepala rendah, yang berfungsi untuk menaikkan muka air dan biasanya terdapat di sungai. Di Indonesia, bendung dapat digunakan untuk irigasi bila misalnya muka air sungai lebih rendah dari muka tanah yang akan diairi. Sebagai salah satu konstruksi berat, bendung juga menyimpan potensi bahaya yang cukup besar dan memiliki potensi risiko kerusakan fisik dan kegagalan fungsi. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kestabilan bendung terhadap deformasi dan gaya angkat (*uplift*) yang mungkin terjadi. Analisis yang digunakan adalah berdasarkan metode numerik dengan menggunakan program Plaxis 2D. Hasil penelitian diperoleh bahwa *displacement* ke arah vertikal dan horizontal dibandingkan dengan syarat batas penurunan $\leq 0,04$ m. Kestabilan bendung secara keseluruhan menggunakan plaxis 2D didapat *displacement* maksimal sejauh 0,07245 m ke arah vertikal dan horizontal. Artinya *displacement* yang terjadi melewati syarat batas, sehingga bendung tidak aman terhadap *uplift*.

Kata kunci: bendung, keruntuhan hidraulik, *uplift*

1. PENDAHULUAN

Bendung merupakan struktur bangunan air melintasi sungai yang berfungsi meninggikan elevasi air sungai dan membelokkan aliran air agar bisa mengalir ke saluran-saluran yang lebih kecil untuk keperluan irigasi. Menurut ARS Group (1982), dalam bukunya daftar analisis upah dan bahan BOW (Burgerlijke Openbare Werken), dituliskan bendung adalah bangunan air (berikut kelengkapannya) yang dibangun melintang sungai untuk meninggikan level muka air sehingga dapat dialirkan ke tempat yang membutuhkan secara gravitasi. Di dalam SNI 03-2401-1991 tentang Pedoman Perencanaan Hidrologi dan Hidraulik untuk Bangunan di Sungai, bendung dapat didesain dan dibangun sebagai bangunan tetap, bendung gerak, atau kombinasinya, dan harus dapat berfungsi untuk mengendalikan aliran dan angkutan muatan di sungai, dengan cara menaikkan muka airnya sehingga air dapat dimanfaatkan secara efisien sesuai dengan kebutuhannya terutama persawahan.

Bendung merupakan salah satu konstruksi berat yang artinya pekerjaan yang termasuk dalam proyek-proyek utilitas sebuah negara. Sebuah bendung juga menyimpan potensi bahaya yang cukup besar dan memiliki potensi risiko kerusakan fisik dan kegagalan fungsi. Potensi yang dimaksud dapat berupa dampak pembangunan bendung dan pasca konstruksi atau periode pemanfaatan bendung. *Association of State Dam Safety Officials of United States* (2010) menulis bahwa tak kurang dari 165 kasus keruntuhan bendungan yang terjadi sejak tahun 1874. Walaupun belum ada angka yang pasti, tapi faktor hidraulik diduga sebagai penyebab teratas kegagalan dan runtuhnya bendungan di seluruh dunia. Untuk itu, desain yang aman sangat diperlukan agar bencana serupa dapat dihindari.

Keruntuhan hidraulik merupakan fenomena keruntuhan yang terjadi pada tanah atau pada struktur bangunan akibat air bertekanan tinggi atau jenis cairan lain. Keruntuhan hidraulik merupakan masalah penting dalam industri geoteknik, rekayasa hidrolik, teknik perminyakan, dan pertambangan. Dalam rekayasa geoteknik, keruntuhan hidraulik terjadi pada tanah akibat tekanan air pori dan atau akibat rembesan (aliran) air tanah. Dalam rekayasa hidraulik, bendungan beton cenderung mengalami keretakan pada permukaan hulu, hilir, dan dasarnya karena mutu beton yang rendah atau akibat perubahan suhu internal dan eksternal, susut beton, penyelesaian diferensial fondasi, dan faktor lainnya.

Bendungan beton adalah jenis struktur beton yang banyak berinteraksi dengan air bertekanan tinggi. Seiring waktu, retakan akan diisi dengan air bertekanan tinggi, sehingga mengurangi daya dukung dan keamanan bendungan. Oleh karena itu, untuk keamanan bendung beton, perlu dipertimbangkan pengaruh rekah hidraulik (Committee on Embankment Dams, 2013).

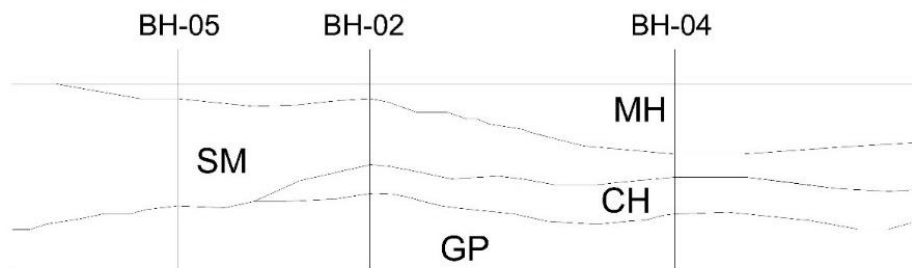
Penelitian terkait rembesan pada bendung telah pernah dilakukan. Al-Adili (2012) menganalisis rembesan pada pondasi bendung Diyala di kota Baghdad menggunakan program *Geoslope-SEEP/W ver.5*. Kerusakan bendung terjadi pada beberapa bagian struktur bendung, adanya gerusan dan terbentuknya piping. Selanjutnya juga ditemukan ketebalan lantai bendung pada beberapa titik tidak cukup untuk menahan rembesan yang terjadi, karena kurang dari rasio seharusnya (18% - 39%). Penggunaan *sheet pile* di bagian hulu disarankan karena bisa mengurangi tekanan *uplift* pada suatu titik A pada rasio 15,5 – 17,6%, dan mengurangi gradien keluar antara 15 – 17%. Sementara penggunaan *sheet pile* di bagian hilir malah meningkatkan tekanan *uplift* dengan rasio 23-27% dan mengurangi rasio gradien keluar sampai 92%. Penggunaan selimut pada bagian hilir lebih efektif dibandingkan bagian hulu dalam hal mengurangi gradien keluar. Khan dkk (2013) menganalisis rembesan pada bendung Golden Gol di Pakistan menggunakan *Geoslope-SEEP/ W*. Hasil analisis menunjukkan bahwa selimut hulu dengan panjang 30 m dan kombinasi selimut hilir dan hulu (masing-masing 10 m) menunjukkan pengurangan jumlah rembesan yang hampir sama. Namun, gradien keluar untuk selimut lebih banyak ditemukan pada sisi yang aman dan juga biaya konstruksinya diperkirakan lebih rendah daripada biaya *cut-off*. Fattah dkk (2014) telah menganalisis mengenai rembesan yang terjadi pada bendungan urugan tanah menggunakan metode elemen hingga dengan *Geo-Slope 8*. Hasil penelitian menyatakan bahwa urugan dengan inti tanah liat memiliki efek penting pada menurunkan gradien keluar. Di mana peningkatan bisa mencapai 300% jika inti tidak ada dan mungkin akan mencapai tingkat bahaya ketika ketinggian air di waduk mencapai 143,5 m. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan tersebut terdapat beberapa faktor penyebab terjadinya rembesan pada bendung dan bagaimana menanggulangnya. Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kestabilan pada bendung terhadap deformasi dan gaya angkat (*uplift*) yang mungkin terjadi menggunakan metode elemen hingga. Bendung yang ditinjau dalam penelitian ini adalah bendung X.

2. METODE PENELITIAN

Analisis metode elemen hingga dalam penelitian ini dilakukan menggunakan *Plaxis 2D Versi 8.6*. Program ini dapat digunakan untuk analisis masalah-masalah yang berhubungan dengan deformasi, stabilitas tanah, dan batuan. *Plaxis 2D* merupakan program rekayasa geoteknik yang berbasis elemen hingga dalam analisisnya. Konsep dari metode elemen hingga adalah membagi suatu benda yang akan dianalisis, menjadi beberapa bagian dengan jumlah hingga (*finite*). Bagian-bagian ini disebut elemen yang tiap elemen satu dengan elemen lainnya dihubungkan dengan nodal (*node*). Kemudian dibangun persamaan matematika yang menjadi representasi benda tersebut. Proses pembagian benda menjadi beberapa bagian disebut *meshing*.

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah hasil penyelidikan tanah yang sudah ada. Pada tahap awal dilakukan penggambaran stratigrafi tanah (Gambar 1) berdasarkan data bor yang dilakukan di lapangan (Tabel 1). Tabel 2 adalah data nilai properties untuk *spun/plate*. Langkah berikutnya adalah membuat pemodelan menggambarkan kembali situasi di lapangan ke dalam bentuk gambar 2 dimensi atau 3 dimensi. Pemodelan yang dilakukan harus diupayakan semirip mungkin dengan kondisi di lapangan. Perbedaan pemodelan yang signifikan akan mempengaruhi hasil perhitungan.

Microsoft Excel digunakan untuk memindahkan pemodelan dari *Autocad* ke *Plaxis*. Setiap titik *node* objek pada *Autocad* dicatat ulang di *excel* dan selanjutnya dicopy satu persatu ke *Plaxis* untuk memplot gambarnya. Gambar 2 merupakan diagram alir penelitian menggunakan *Plaxis 2D*. Gambar 3 adalah potongan memanjang bendung. Gambar 4 adalah kondisi *generated mesh*. Perhitungan dibagi menjadi 2 bagian. Bagian pertama analisis dilakukan pada bagian pintu air (Gambar 5). Bagian kedua analisis pada bagian pilar (Gambar 6). Masing-masing bagian dilakukan perhitungan dalam 4 fase.



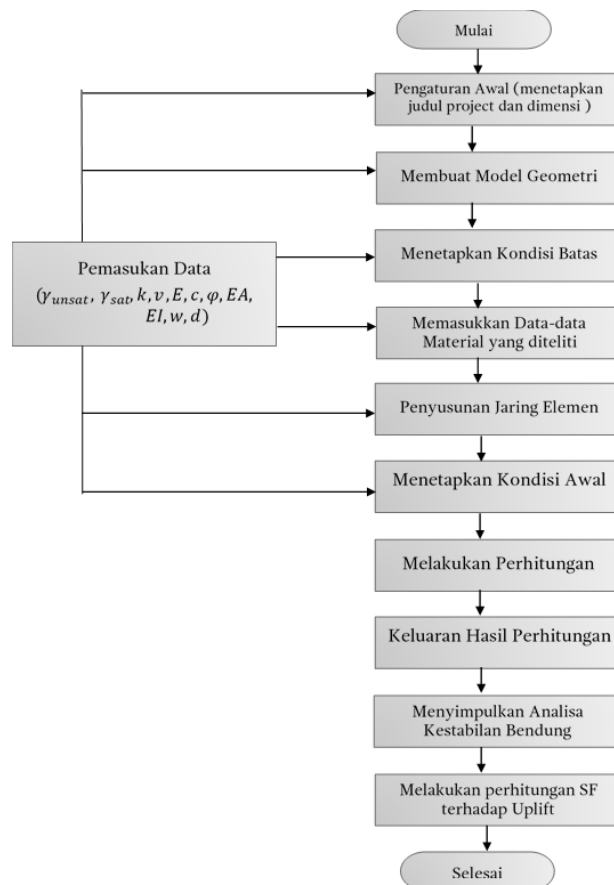
Gambar 1. Stratigrafi tanah

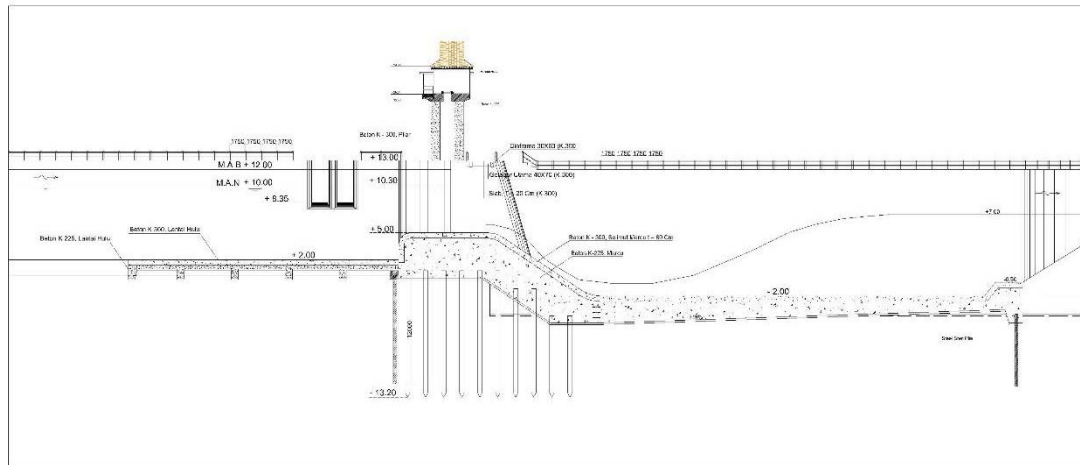
Tabel 1. Data parameter tanah

PARAMETER	SIMBOL	SATUAN	CH	MH	ML	SM	GP
Berat jenis unsaturated	(γ_{unsat})	kN/m ³	16,425	17,3	20,6	18,66667	22
Berat jenis saturated	(γ_{sat})	kN/m ³	16,630	17,571	20,927	19,333	22,333
Koefisien permeabilitas	k	m/day	0,0227	0,0058	0,0346	0,0369	0,0435
Modulus Young (konstan)	E _{ref}	kN/m ²	107872,6	73549,5	156905,6	238627,3	800872,3
Angka Poisson	ν	-	0,475	0,5	0,45	0,35	0,2
Kohesi (konstan)	c _{ref}	kN/m ²	27,5	27	88	0	0
Sudut geser	ϕ phi	°	4,95	5,1	23,8	33,66667	42

Tabel 2. Nilai properties untuk *spun /plate*

PARAMETER	SAT	NILAI	KETERANGAN
d	m	0,5	Diameter spun
A	m ²	0,19625	Luas spun
A/2	m ²	0,098125	1/2 luas, spasi 2 m antar spun piles
E	Mpa	122200	Modulus beton ($f_c' 52 \text{ Mpa} = 4700 \sqrt{f_c'}$)
	kN/m ²	122200000	
EA	kN/m	11990875	Kekakuan aksial
I	cm ⁴	255324	Momen inersia spun (dari tabel)
	m ⁴	0,00255324	
I/2	m ⁴	0,00127662	
EI	kNm ² /m	156002,964	Kekakuan lentur
w	kg/m	290	Berat satuan unit berdasarkan tabel spesifikasi
	kN/m/m	2,8431	

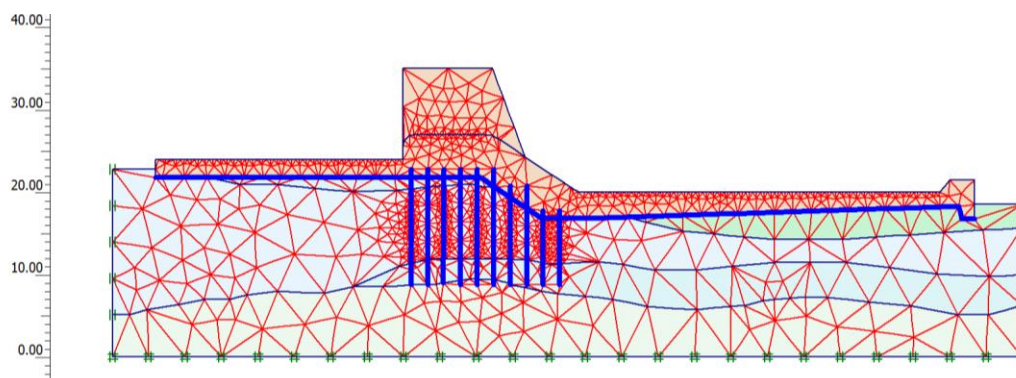
**Gambar 2.** Diagram alir *Plaxis 2D*



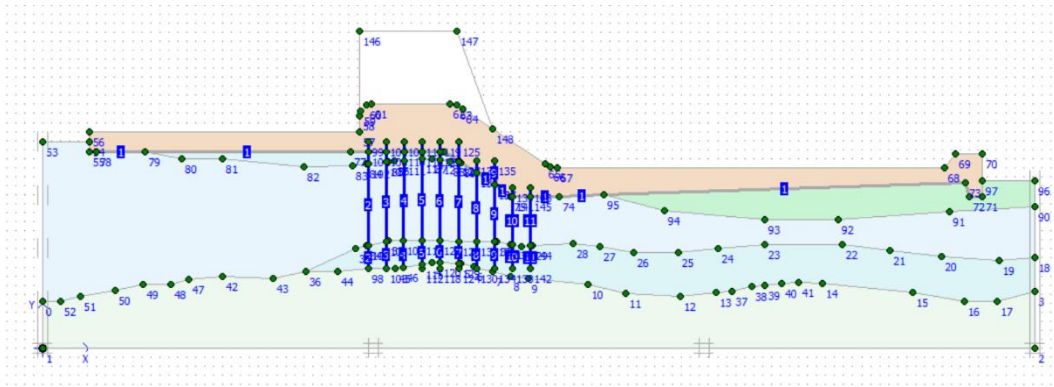
Gambar 3. Potongan memanjang bendung

Tabel 3. Dimensi Bendung

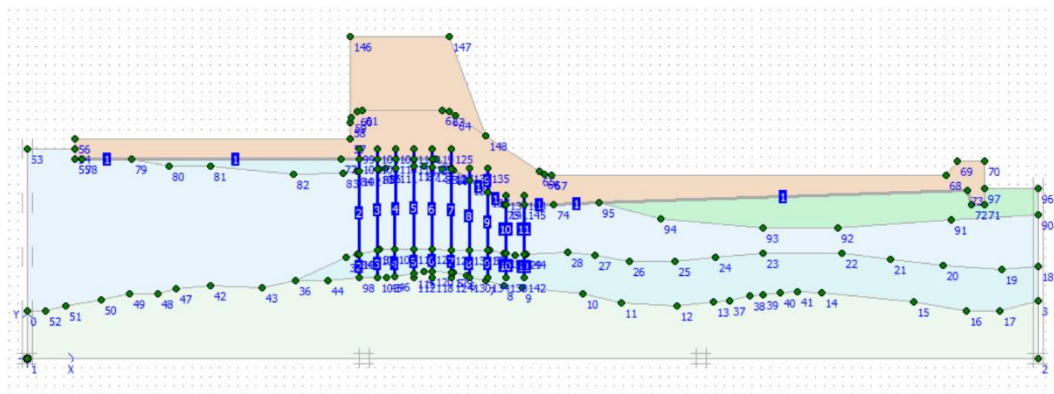
Pilar tubuh bendung		
Lebar pilar	=	2 m
Tinggi pilar	=	13,57 m
Panjang pilar	=	10 m
Panjang pilar bawah	=	20 m
Tinggi pilar dari top lantai hulu	=	12 m
Lantai hulu		
Lebar lantai	=	118,4 m
Panjang lantai	=	30 m
Ketebalan lantai	=	1 m
Lantai hilir		
Lebar lantai	=	118,4 m
Panjang lantai	=	47 m
Ketebalan lantai	=	3 dan 4 m
Pondasi tiang pancang		
Badan bendung:	Diameter tiang	= 50 cm
	Jumlah tiang	= 610 titik
Dinding hulu	Diameter tiang	= 50 cm
	Jumlah tiang	= 176 titik
Dinding hilir	Diameter tiang	= 50 cm
	Jumlah tiang	= 246 titik



Gambar 4. Kondisi *generated mesh*



Gambar 5. Perhitungan pada potongan pintu air

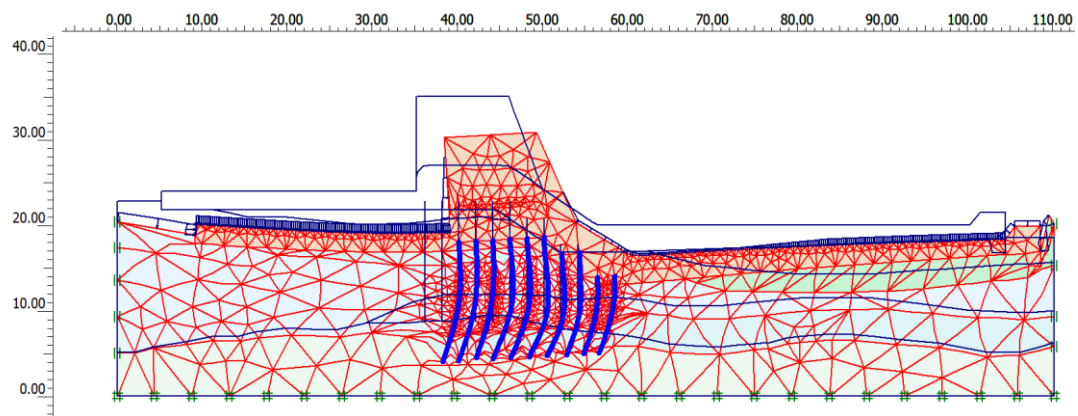
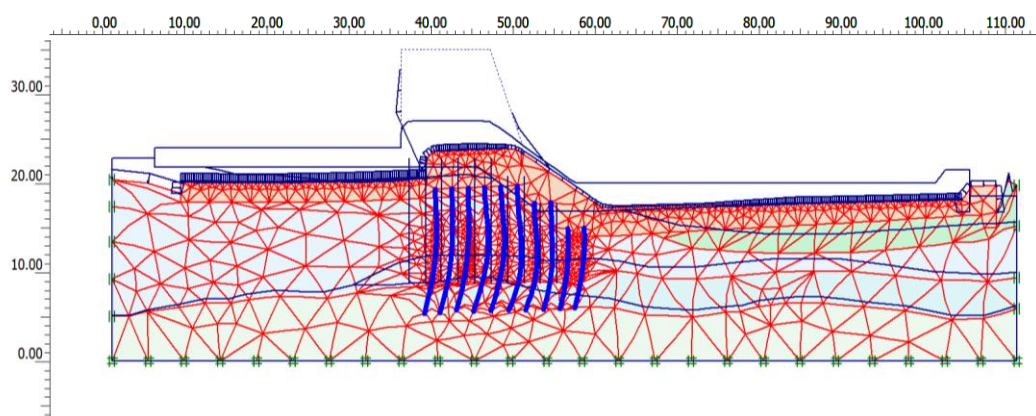
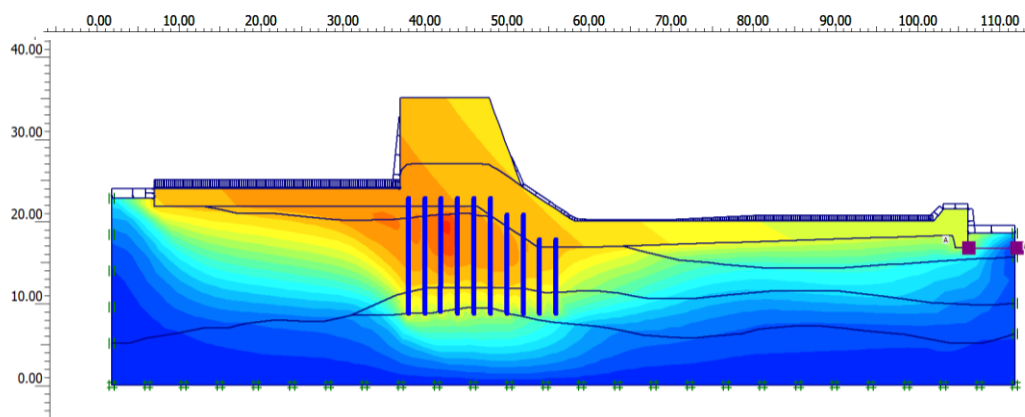


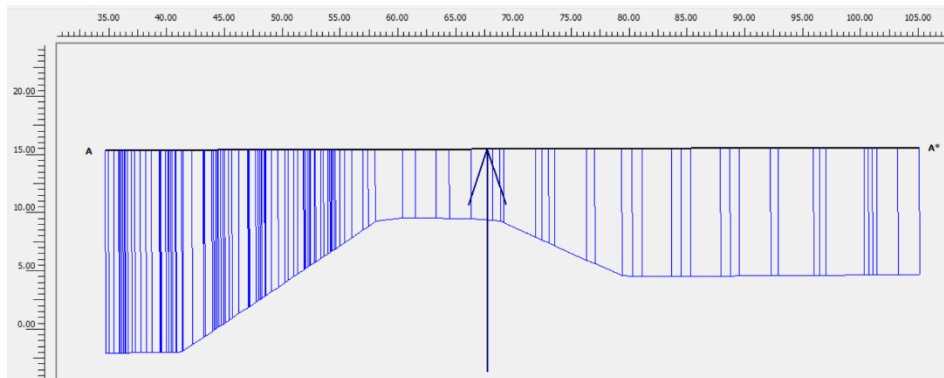
Gambar 6. Perhitungan pada potongan pilar bendung

3. HASIL DAN DISKUSI

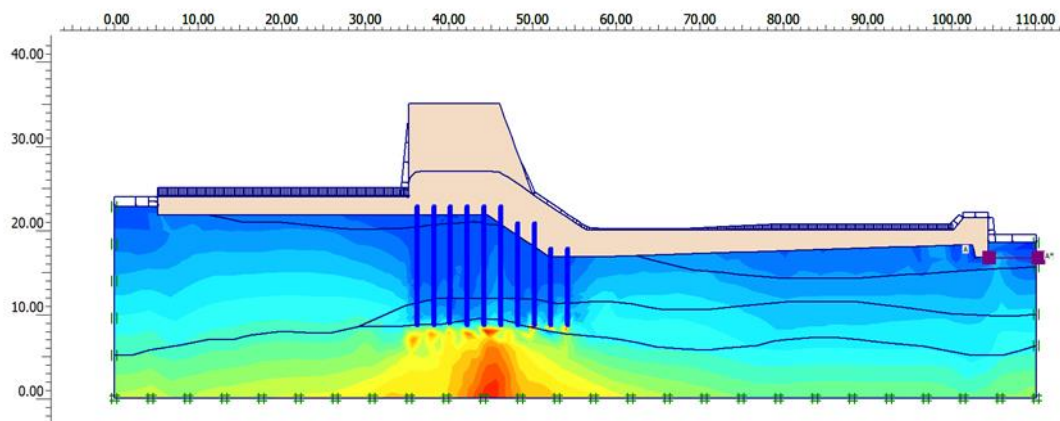
Berdasarkan hasil analisis menggunakan *Plaxis 2D* diperoleh total perpindahan (displacement) pada bagian pintu air adalah sejauh 0,05843 cm (Gambar 7) dan total perpindahan (displacement) pada bagian pilar adalah sejauh 0,07244 cm ke arah vertikal dan horizontal. Sesuai dengan syarat batas penurunan $> 0,04$ m, maka penurunan yang terjadi pada konstruksi bendung ini adalah tidak aman. Titik paling lemah dari lapisan tanah berada tepat di bawah tubuh bendung. Diduga hal ini disebabkan oleh pengaruh daya dukung tanah yang mengacu pada data stratigrafi tanah pada Gambar 1.

Keruntuhan hidrolik akibat gaya angkat (uplift) ditinjau pada bidang A-A' (Gambar 8). Gaya angkat (U) yang disebabkan oleh rembesan adalah $186,98 \text{ kN/m}^2$ (Gambar 9). Tekanan tanah ke arah bawah akibat beban W' adalah $427,77 \text{ kN/m}^2$ (Gambar 10). Dengan menggunakan persamaan keamanan dari Terzaghi $FS = \frac{W'}{U}$ maka diperoleh nilai $FS = 2,29$. Berdasarkan angka keamanan yang diperoleh tersebut yaitu 2,29 yang mana lebih kecil dari angka keamanan minimum yang ditetapkan yaitu 4, maka dapat disimpulkan bahwa bendung tidak aman dari pengaruh gaya angkat (uplift).

**Gambar 7.** Deformasi sisi pintu air**Gambar 8.** Deformasi sisi pintu pilar**Gambar 8.** Bidang *uplift* A-A'



Gambar 9. Nilai U pada bidang A-A'



Gambar 10. Nilai W'

4. KESIMPULAN

Dari tahap perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa kestabilan bendung secara keseluruhan dalam perhitungan menggunakan *plaxis 2D* dengan *displacement* maksimal sejauh 0,07245 m ke arah vertikal dan horizontal. Maka sesuai dengan syarat batas penurunan $\leq 0,04$ m, penurunan yang terjadi pada konstruksi bendung ini adalah tidak aman. Titik paling lemah dari lapisan tanah berada tepat di bawah tubuh bendung. Diduga hal ini mungkin disebabkan oleh pengaruh daya dukung tanah. Angka keamanan terhadap *uplift* yang diperoleh adalah 2,29. Sesuai dengan syarat batas keamanan, $FS \geq 4$. Artinya bendung juga tidak aman terhadap *uplift*.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Adili, A., Maatooq, J., & Shauket, S. (2012). Analysis of Seepage Problem Effects Underneath Diyala Weir using 2-D Numerical Model. 1st International Conference on Water Resources Engineering, Baghdad.
- ARS Grup. (1982). Daftar analisa upah dan bahan (BOW). Ars Group.
- Association of State Dam Safety Officials of United States. (2010).
- Committee on Embankment Dams. (2013). Internal Erosion of Existing Dams Levees and Dikes and Their Foundations (Vol. 1). CFBR.
- Fattah, M., Al-Labban, S., & Salman, F. (2014). Seepage Analysis of a Zoned Earth Dam By Finite Elements. International Journal of Civil Engineering and Technology, 5, 128–139.
- Khan, B., Amin, M., & Badshah, N. (2013). Evaluation of Different Seepage Control Measures for a Proposed "Golen Gol" Weir in Pakistan.
- SNI 03-2401-1991. (1991). Tata Cara Perencanaan Bendung.