

Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Bajulmati dengan Metode Elemen Hingga Model 2D dan 3D

TEUKU NABILLA FERRY NANDA, INDRA NOER HAMDHAN

Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Bandung
e-mail: teukunabil@hotmail.com

ABSTRAK

Bendungan Bajulmati merupakan bendungan tipe urugan dengan inti terletak tegak pada tubuh bendungan. Bendungan urugan berpotensi runtuh akibat berubahnya tegangan dalam tanah akibat aliran air. Untuk menghindari keruntuhan, maka diperlukan analisis rembesan dan stabilitas yang dihitung secara bersamaan menggunakan metode elemen hingga dengan model 2D dan 3D pada program PLAXIS AE. Analisis akan menggunakan variasi pembebanan, yaitu saat selesai konstruksi, muka air minimum, muka air maksimum dan surut cepat yang keseluruhan kondisi akan di kombinasikan dengan pembebanan gempa pseudostatik. Hasil analisis 2D berupa faktor keamanan (SF) terkritik terjadi pada kondisi surut cepat, yaitu 1,750 sebelum ada gempa dan 1,452 setelah dibebani gempa pseudostatik. Hasil SF terkritik pada model 3D adalah 1,890 pada kondisi surut cepat.

Kata kunci: bendungan bajulmati, bendungan urugan, stabilitas lereng, pseudostatik, analisis ganda, aliran air tanah, metode elemen hingga, faktor keamanan.

ABSTRACT

The Bajulmati dam is types of embankment with center core rock fill dam. Embankment dam is risky to collapse due changes of stress while ground water flow. To avoid collapse, it is necessary to seepage and stability analyzes were calculated silmustaneously using the finite element method with 2D and 3D models in PLAXIS AE program. The analysis will use variation of loading, those are after construction, minimum water level, high water level, and rapid drawdown with the overall conditions is combine to pseudostatics analysis. The most critical safety factor of 2D analysis is happen at rapid drawdown condition, those are 1.750, 1.452 before and after pseudostatic/earthquake analysis. The critical safety factor result of 3D analysis is 1.890 at rapid drawdown loading condition.

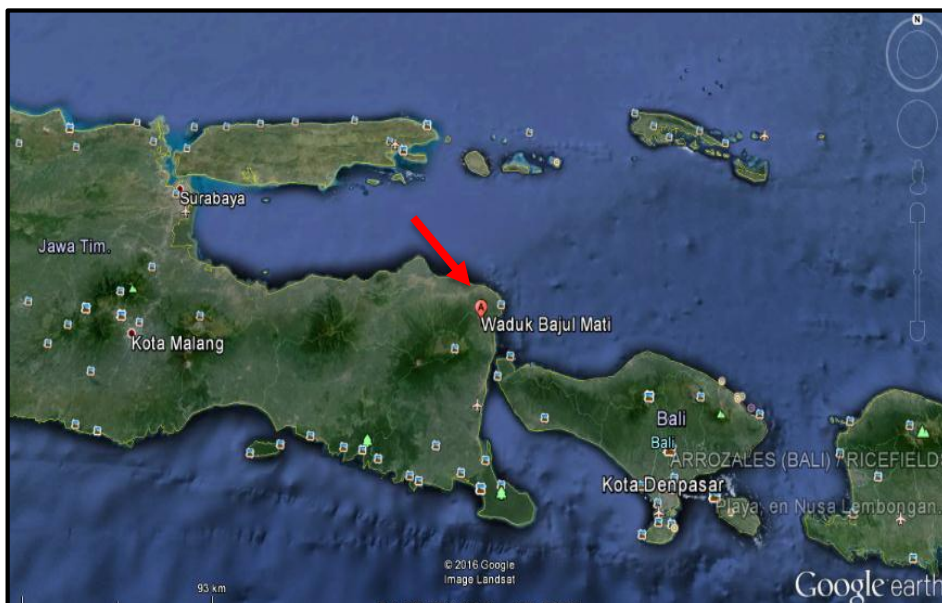
Keywords: the bajulmati dam, embankment dam, slope stability, pseudostatic, coupled analysis, ground water flow, finite elemen method, safety factor.

1. PENDAHULUAN

Bendungan Bajulmati merupakan bendungan tipe urugan batuan yang memiliki inti kedap air berupa lapisan tanah lempung yang berada tegak di tengah tubuh bendungan. Bendungan tersebut dibangun melalui proses penimbunan sejumlah material berupa kerakal, kerikil, batuan, pasir dan tanah yang dibentuk dengan kemiringan dan ketinggian tertentu sehingga dapat menghambat atau menaikkan muka air pada bagian hulu (*upstream*). Bendungan dengan tipe urugan (*embankment*) sangat riskan terhadap keruntuhan (*collapse*) akibat dari tekanan hidrostatik air, tekanan air pori dan beban gempa yang diterima maupun dari geometrik bendungan itu sendiri. Oleh karena itu, kestabilan lereng dan debit rembesan air pada tubuh bendungan perlu dianalisis agar konstruksi bendungan tersebut aman terhadap longsor. Hasil analisis akan menampilkan kemungkinan terjadinya longsor ataupun erosi pada bagian/bidang tubuh bendungan baik di hulu (*upstream*) ataupun di hilir (*downstream*).

Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis rembesan dan stabilitas dengan kondisi pembebanan *after construction*, muka air minimum, muka air maksimum dan *pseudostatic*. Analisis pada kondisi muka air minimum dan maksimum akan menggunakan tipe analisis *steady state ground water flow*. Sedangkan, kondisi surut cepat akan menggunakan analisis *transient flow* yang berdasarkan fungsi waktu.

Maksud dan tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk melakukan analisis terhadap rembesan dan stabilitas yang terjadi pada Bendungan Bajulmati dengan metode elemen hingga menggunakan program komputer PLAXIS AE dengan model 2D dan 3D. Sehingga, dapat diketahui kriteria keamanan Bendungan Bajulmati berdasarkan hasil analisis yang berupa angka faktor keamanan dan jumlah debit rembesan serta pola runtuh/longsor pada tubuh bendungan yang analisisnya menggunakan parameter desain dari studi sebelumnya. Hasil analisis akan membandingkan hasil keluaran *safety factor* antara model 2D dan 3D dengan berbagai jenis kondisi pembebanan. Lokasi bendungan Bajulmati tampak seperti **Gambar 1**.



Gambar 1. Peta lokasi bendungan Bajulmati

(Sumber: <https://www.google.com/earth>, diunduh tanggal 06/04/2016 pukul 01.25 WIB)

2. TINJAUAN PUSTAKA

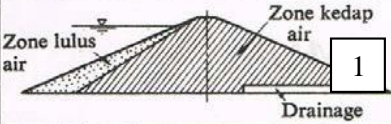
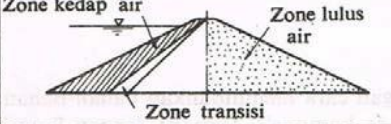
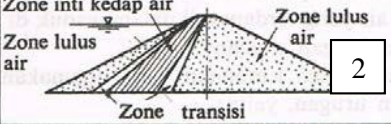
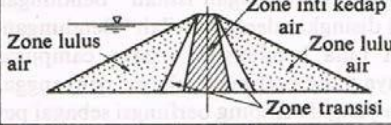
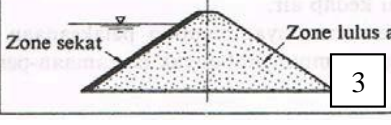
2.1 Bendungan

Menurut Wikipedia, bendungan atau dam adalah sebuah struktur konstruksi yang dibangun untuk menahan laju air atau sungai bawah tanah yang pada umumnya akan menjadi waduk, danau atau tempat rekreasi. Tujuan utama dibangun bendungan pada umumnya untuk menahan air yang digunakan untuk mengelola, mencegah atau membuang aliran air ke daerah lain, secara bertahap atau berkelanjutan sehingga penggunaan air dapat dimaksimalkan. Seringkali juga bendungan digunakan untuk mengalirkan air ke sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Air atau PLTA (*minihydro*).

2.1.1 Bendungan Tipe Urugan

Berdasarkan material penyusun bendungan dan lokasi penempatan materialnya, menurut Sosrodarsono, S. (1977) bendungan tipe urugan (*earth fill dam*) dibagi dalam 3 (tiga) tipe seperti tampak pada **Gambar 2**:

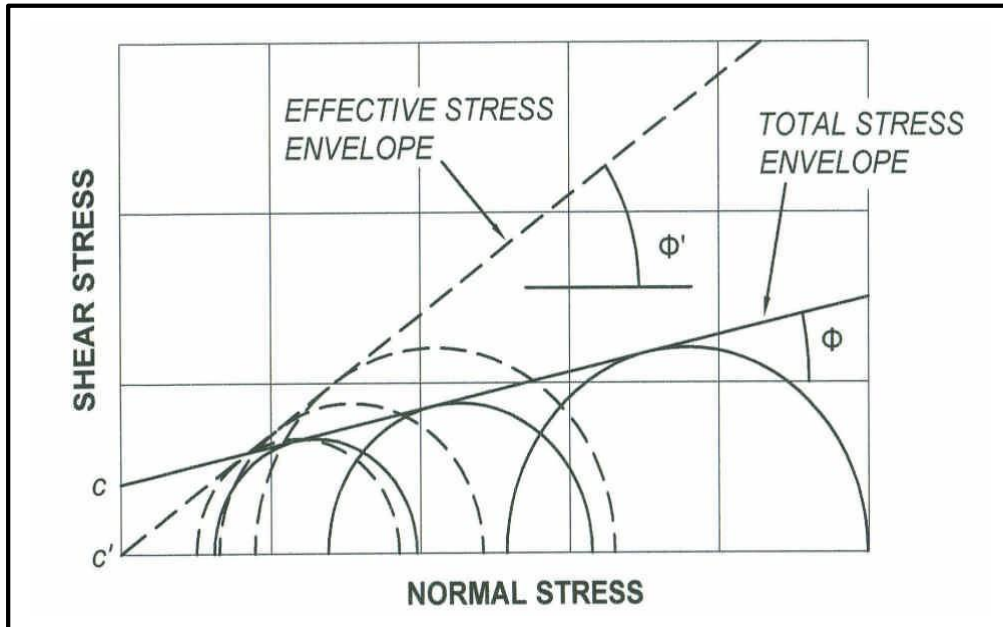
1. Bendungan urugan homogen.
2. Bendungan urugan berzonal.
3. Bendungan urugan bersekat.

Type:	Skema Umum	Keterangan
Bendungan Homogen		Apabila 80% dari seluruh bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang bergradasi hampir sama.
Bendungan Zonal		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan tirai kedap air di udiknya.
		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan miring ke hilir.
		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan vertikal.
Bendungan Sekat		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan dinding tidak lulus air di lereng udiknya, yang biasanya terbuat dari lembaran baja tahan karat, lembaran beton bertulang, aspal beton, lembaran plastik, dll. nya.

Gambar 2. Bendungan tipe urugan (Suyono, 1977)

2.2 Teori Keruntuhan Mohr-Coulomb

Sebuah teori yang dikembangkan oleh Mohr pada tahun 1900 menyatakan bahwa keruntuhan tanah terjadi bukan diakibatkan oleh hancurnya partikel tanah, tetapi keruntuhan terjadi akibat kombinasi kritis antara tegangan normal dan tegangan geser yang dialami oleh tanah tersebut. Korelasi antara gaya normal dan gaya geser pada suatu bidang runtuh dapat dilihat pada **Gambar 3** yang merupakan lingkaran Mohr-Coulomb (USSD, 2007).



Gambar 3. Kriteria Mohr-Coulomb (USSD,2007)

Kriteria Mohr-Coulomb berdasarkan tegangan total didefinisikan seperti **Pesamaan 1.**

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad \dots (1)$$

Kondisi tanah jenuh air (*saturated*) berdasarkan tegangan efektif didefinisikan seperti **Persamaan 2.**

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi \quad \dots (2)$$

dimana:

- τ = tegangan geser,
- c = kohesi,
- σ = tegangan normal,
- σ' = tegangan efektif = $\sigma - u$,
- ϕ = sudut geser dalam,
- u = tegangan air pori.

1.4 Kondisi Pembebanan Bendungan Tipe Urugan

Stabilitas bendungan bagian udik (*upstream*) dan hilir (*downstream*) pada urugan bendungan umumnya dilaksanakan perhitungan analisis terhadap kondisi yang paling kritis yang mungkin terjadi selama masa bendungan tersebut berdiri. Kondisi pembebanan yang digunakan meliputi:

1. Akhir konstruksi (*After Construction*).
2. *Steady State Seepage*.
3. *Surut Cepat (Rapid Drawdown)*.
4. *Earthquake (Pseudostatic Analysis)*.

Gaya inersia yang dihasilkan berdasarkan percepatan pseudostatic menurut Kramer, S.L. (1996) didefinisikan seperti **Persamaan 3** dan **Persamaan 4** berikut:

$$F_h = \frac{a_h * W}{g} = K_h * W \quad \dots (3)$$

$$F_v = \frac{a_v * W}{g} = K_v * W \quad \dots (4)$$

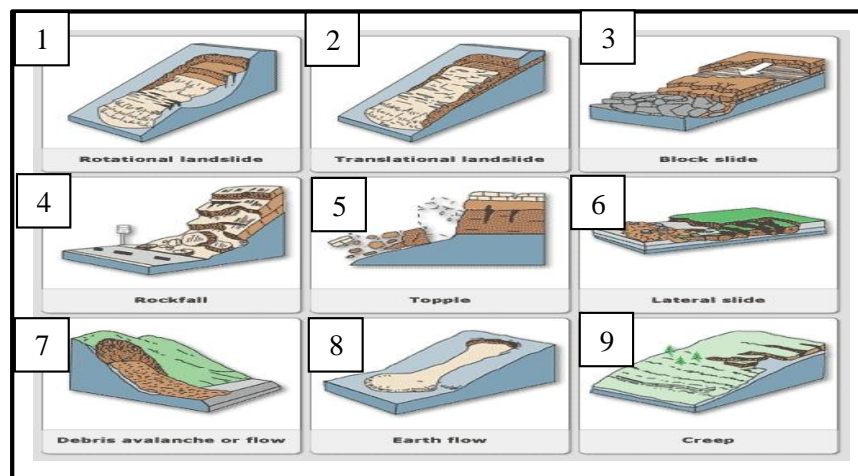
dimana:

K_h dan K_v = percepatan *pseudostatic* arah horisontal dan vertikal,
 a_h dan a_v = koefisien *pseudostatic* horisontal dan vertikal,
 W = berat massa.

1.5 Stabilitas Lereng

Permukaan tanah yang tidak rata yang memiliki kemiringan tertentu akan menyebabkan tanah pada lereng bergerak ke bawah (longsor) yang dipicu oleh gaya gravitasi. Komponen gravitasi meliputi berat sendiri tanah, dimana berat tersebut akan mengakibatkan kegagalan/longsor pada lereng jika berat tanah tidak diimbangi oleh kuat geser tanah tersebut. Beberapa jenis keruntuhan pada lereng terlihat seperti **Gambar 4**:

1. *Rotational landslide.*
2. *Translational landslide.*
3. *Blok slide.*
4. *Rockfall.*
5. *Topple.*
6. *Lateral slide.*
7. *Debris.*
8. *Earthflow.*
9. *Creep.*



Gambar 4. Jenis-jenis keruntuhan ada lereng (Vernes ,1978)

1.6 Metode Reduksi Phi – C (*Phi-C Reduction*)

Metode reduksi Phi-C merupakan metode elemen hingga pada program PLAXIS yang digunakan untuk menghitung nilai faktor keamanan dengan cara membandingkan kekuatan

awal tanah terhadap kekuatan minimum yang dibutuhkan suatu bidang untuk dapat stabil atau setimbang. Prosedur kerja *phi-c reduction* pada program PLAXIS dengan cara mengurangi nilai kuat geser (*shear strength*) tanah secara berkala hingga mencapai kondisi runtuh (*collapse*) dan tanah dimodelkan sebagai material elasto-plastis. Nilai faktor keamanan (*FK*) didapat dari **Persamaan 5**.

$$FK = \frac{\text{kekuatan awal tanah yang tersedia}}{\text{Kekuatan saat kondisi runtuh}} \quad \dots (5)$$

1.7 Metode Coupled Analysis Pada PLAXIS

Program PLAXIS yang digunakan untuk analisis rembesan dan stabilitas pada Tugas Akhir ini mampu menganalisis perilaku aliran air tanah dan deformasi secara bersamaan atau dikenal dengan *coupled analysis*. Metode ini terdapat pada tipe perhitungan *fully coupled flow-deformation* dengan prosedur perhitungan stabilitas dihitung secara bersamaan pada kondisi aliran transient (*transient line*).

3. ANALISIS DATA

3.1 Pengumpulan Data

Data-data yang digunakan pada tugas akhir ini diperoleh dari pihak yang berwenang pada proyek pembangunan bendungan Bajulmati. Data yang diperoleh berupa data sekunder yang digunakan untuk mengetahui parameter tanah sebagai dasar untuk menentukan lapisan tanah. Data sekunder berupa data parameter tanah untuk struktur bendungan dan lapisan fondasi, peta siteplan, data muka air rencana, serta gambar potongan melintang tipikal bendungan Bajulmati.

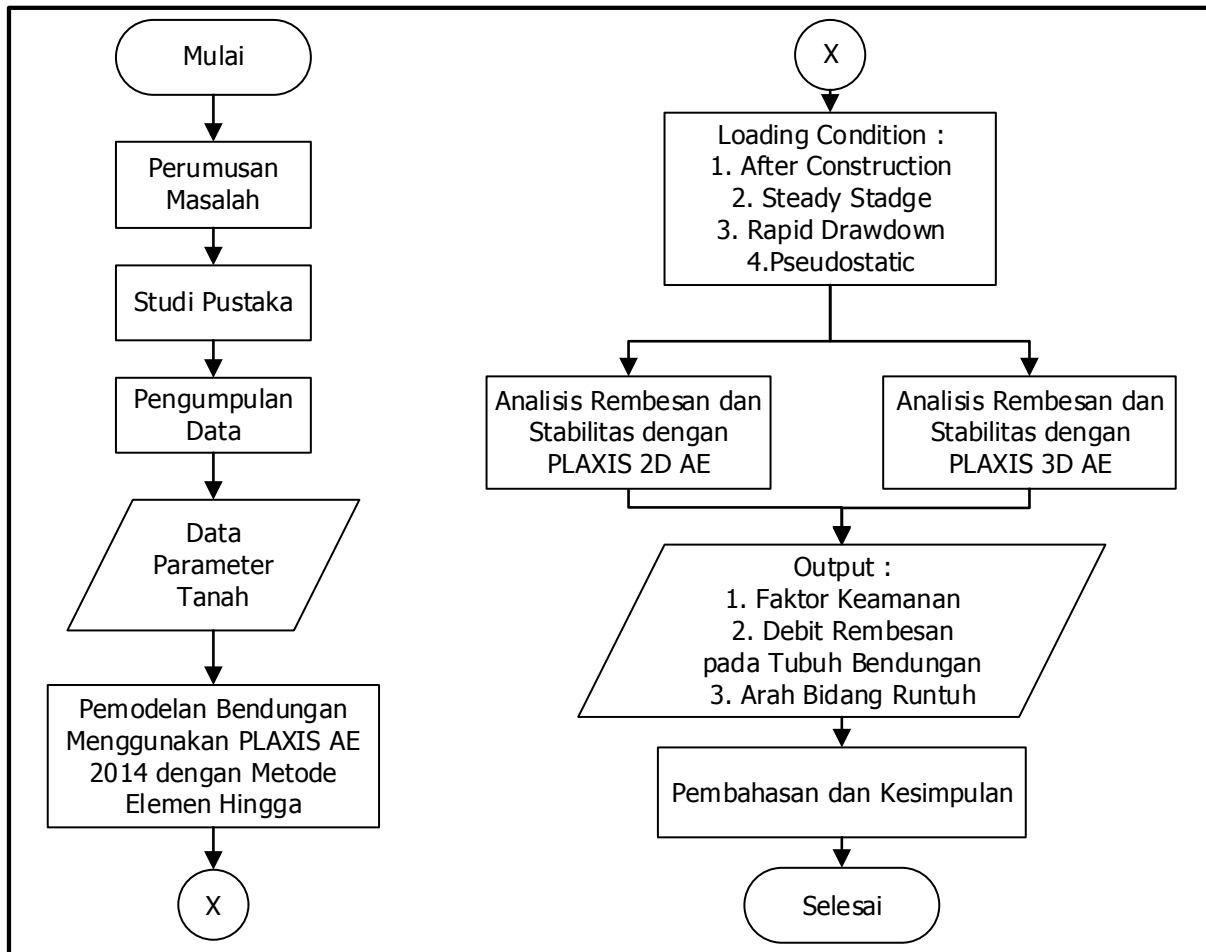
3.2 Analisis Menggunakan Program PLAXIS AE

Analisis rembesan dan stabilitas bendungan Bajulmati akan menggunakan metode elemen hingga dengan model 2D dan 3D. Analisis rembesan dan stabilitas yang menggunakan program PLAXIS AE akan menghasilkan nilai faktor keamanan, debit rembesan, arah bidang runtuh untuk kondisi *after construction*, muka air minimum, muka air maksimum, dan surut cepat. Hasil faktor keamanan yang diperoleh akan di bandingkan dengan syarat minimum faktor keamanan dari RSNI-M-03-2002, sehingga bendungan tersebut dapat dikategorikan aman atau tidak aman. Bagan alir Tugas Akhir ini dapat dilihat pada **Gambar 5**.

3.3 Batasan Analisis dan Kondisi Pembebanan

Pemodelan batasan-batasan dalam analisis rembesan dan stabilitas mengacu kepada data teknis bendungan, dimana kondisi batas merupakan kondisi batasan muka air (*water condition*) bila bendungan telah terisi oleh air. Kondisi muka air maksimum berada pada elevasi +90,75 m, muka air normal berada pada elevasi 87,60 m dan muka air minimum pada elevasi +73,40 m. Pada kondisi pembebanan *after construction*, kondisi bendungan masih kosong (belum ada air). Pada kondisi muka air minimum dan muka air maksimum akan dilakukan perhitungan berdasarkan tipe *steady state ground water flow*. Khusus pada kondisi surut cepat (*rapid drawdown*) pemodelan akan menggunakan tipe perhitungan *transient flow* dengan fungsi penurunan dianggap terjadi selama 5 hari dari elevasi maksimum ke minimum. Kemudian, dari ketiga kondisi pembebanan tersebut akan diberikan beban gempa berupa percepatan *pseudostatic*.

Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Bajulmati
dengan Metode Elemen Hingga Model 2D dan 3D



Gambar 5. Bagan alir analisis rembesan dan stabilitas bendungan Bajulmati dengan metode elemen hingga model 2D dan 3D

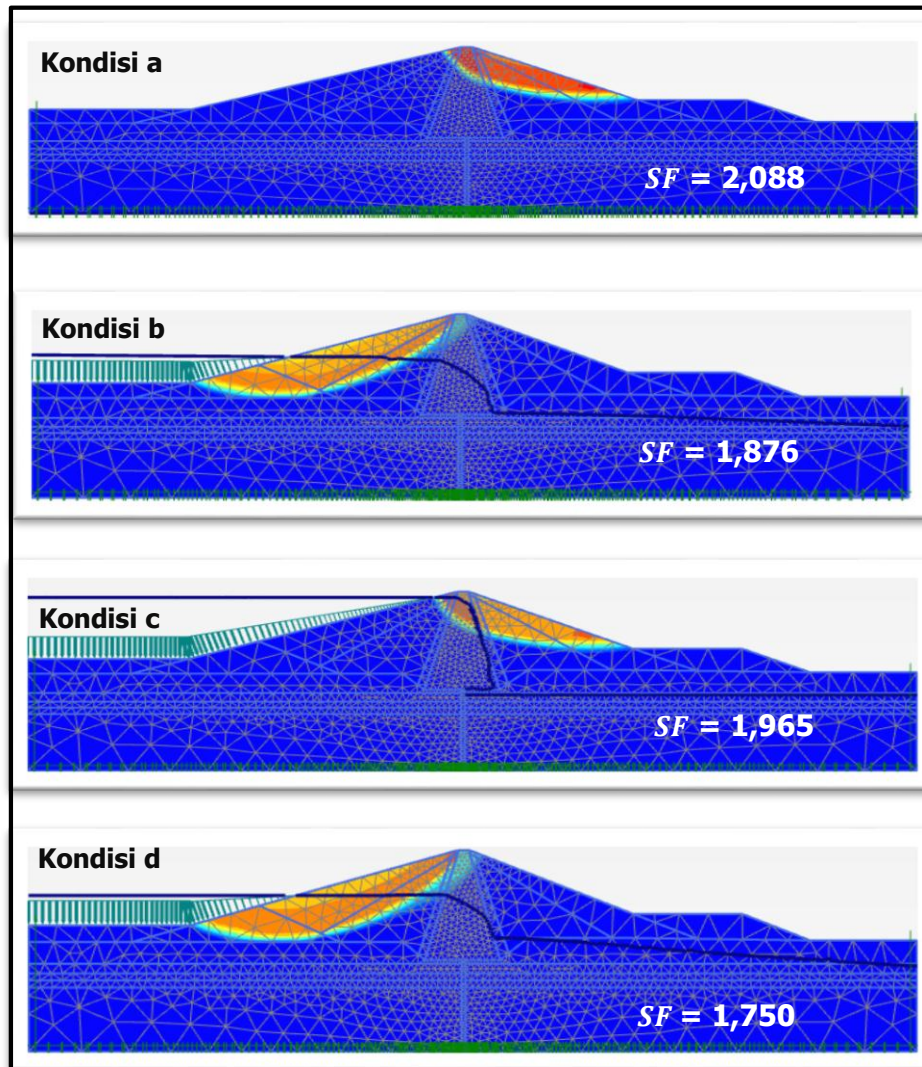
Data parameter tanah yang digunakan untuk analisis terlihat seperti pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Parameter Desain Tanah Bendungan Bajulmati

Zona	Jenis Material	Tipe	Parameter Tanah							
			γ_{unsat}	γ_{sat}	E	ν	c	ϕ	ψ	k
			kN/m ³	kN/m ³	kN/m ²		kPa	°	°	m/day
1	Clay	undrained	13,01	17,62	40.000	0,35	32	15,5	0	0,00873
2	Filter	drained	15,97	19,78	250.000	0,3	10	30	0	190,08
3	Soft Rock	drained	12,79	17,75	250.000	0,3	11	28	0	94,18
4	Coarse Rock	drained	15,89	20,41	250.000	0,3	12	40	10	1296
Fondasi	gravelly sand	drained	15,97	19,78	150.000	0,3	11	30	0	190,08
Fondasi	Lapilly Tuff	drained	12,79	17,75	250.000	0,3	12	28	0	94,18
Fondasi	Talus Deposit	drained	15,79	20,88	30.000	0,25	10	30	0	0,104
Fondasi	Tuffaceous Sand	drained	12,51	17,54	30.000	0,25	10	28	0	0,7344

3.3 Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Bajulmati Sebelum Pembebanan Gempa Model 2D

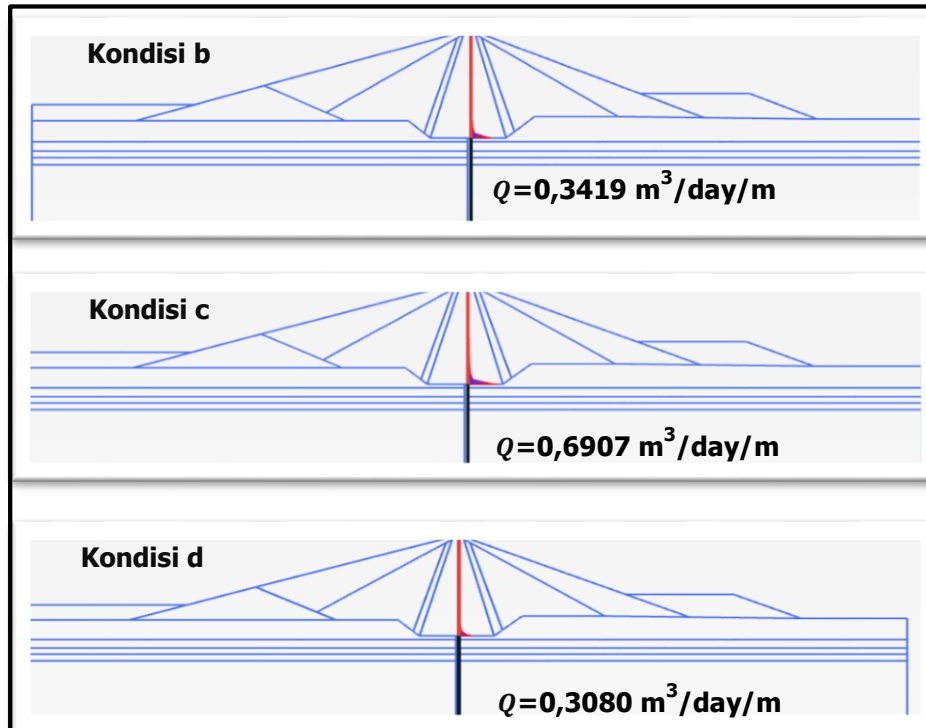
Analisis rembesan dan stabilitas bendungan Bajulmati menggunakan PLAXIS 2D AE 2014 dengan kondisi pembebanan *after construction* (kondisi a), muka air minimum (kondisi b), muka air maksimum (kondisi c) dan surut cepat (kondisi d) menghasilkan nilai faktor keamanan dan arah bidang runtuh seperti tampak pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Bidang runtuh longsor yang terjadi sebelum ada pembebanan gempa

Arah bidang runtuh kondisi a, c bergerak ke arah hilir dan kondisi b,d bergerak ke arah hulu. Proses terjadinya longsor/runtuh pada lereng bendungan dipengaruhi oleh bentuk geometrik bendungan itu sendiri dan tambahan beban air yang menyebabkan terjadinya rembesan ke dalam tubuh bendungan yang dapat mengubah nilai *shear strength* tanah menjadi kritis. Debit rembesan yang terdapat di tubuh bendungan merupakan hasil dari analisis *ground water flow* dan *coupled analysis* yang akan mengeluarkan besaran debit maksimum. Debit maksimum pada tubuh bendungan terlihat seperti pada **Gambar 7**.

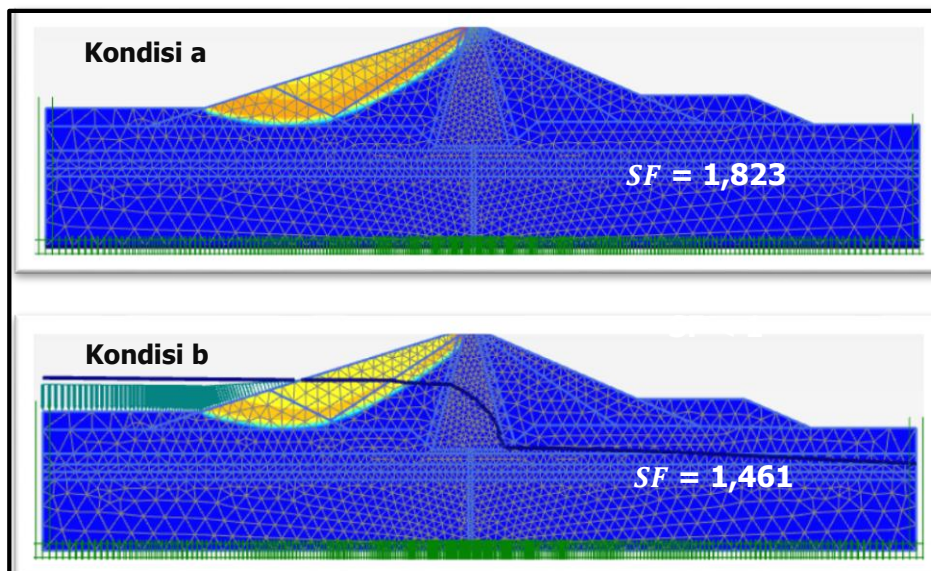
Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Bajulmati dengan Metode Elemen Hingga Model 2D dan 3D



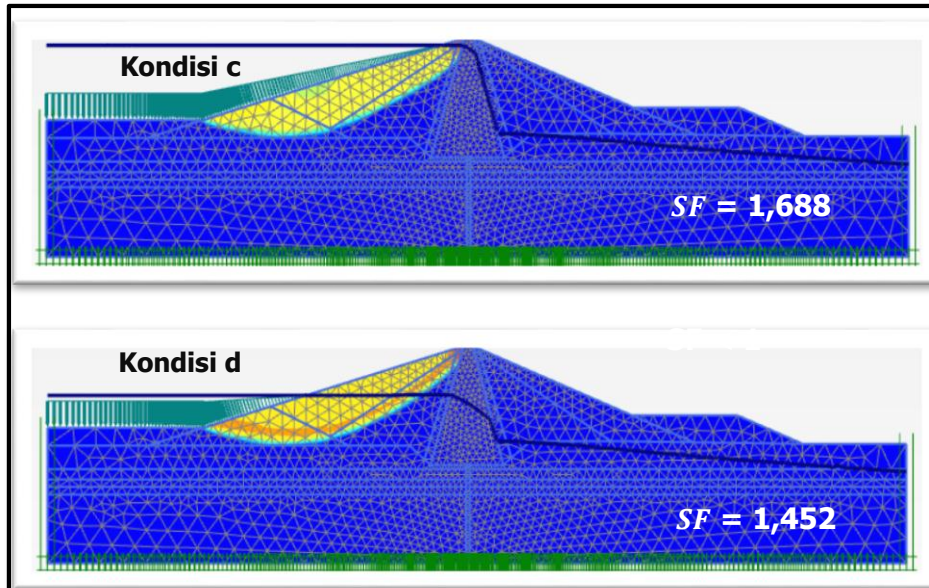
Gambar 7. Distribusi *ground water flow* dengan debit maksimum pada tubuh bendungan sebelum terjadi gempa

3.4 Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Bajulmati Sesudah Pembebanan Gempa Model 2D

Hasil analisis rembesan dan stabilitas dengan kombinasi beban gempa berupa percepatan pseudostatic terlihat seperti **Gambar 8a** dan **Gambar 8b**. Nilai faktor keamanan yang ditampilkan relatif lebih kecil bila dibandingkan dengan sebelum terjadi gempa dan arah bidang runtuh keseluruhan kondisi bergerak ke arah hulu.

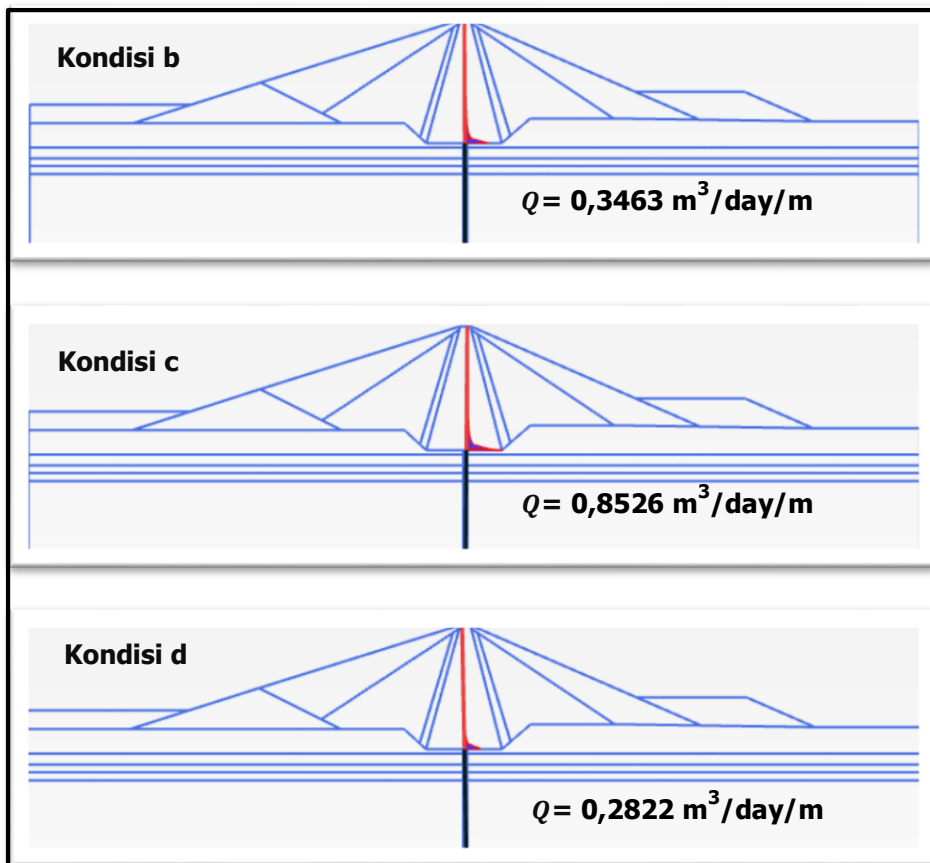


Gambar 8a. Arah bidang runtuh setelah terjadi pembebanan gempa



Gambar 8b. Arah bidang runtuh setelah terjadi pembebanan gempa

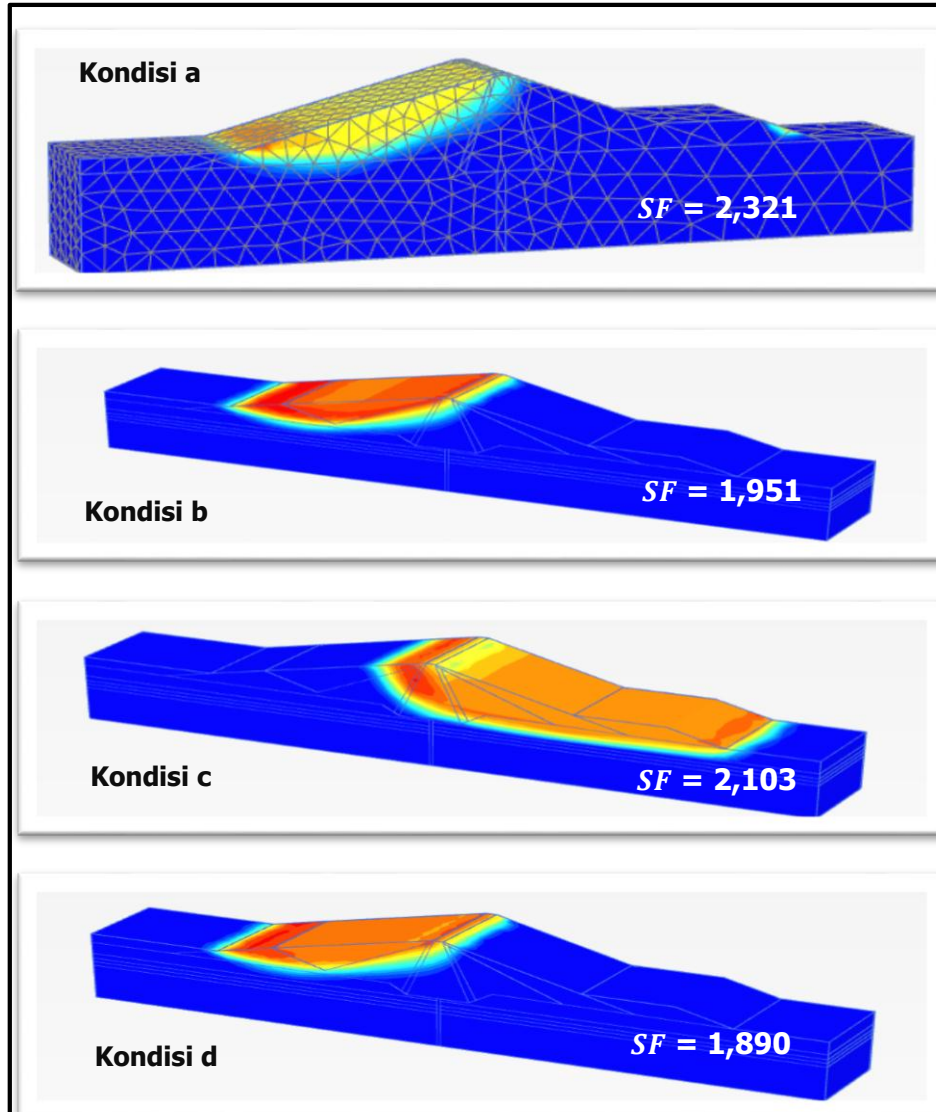
Debit maksimum yang terjadi pada tubuh bendungan akibat adanya tambahan air pada kondisi muka air minimum, muka air maksimum, dan surut cepat yang terjadi setelah pembebanan gempa tampak seperti **Gambar 9**.



Gambar 9. Distribusi ground water flow dengan debit maksimum pada tubuh bendungan setelah terjadi gempa

3.5 Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Bajulmati Sebelum Pembebanan Gempa Model 3D

Berdasarkan hasil analisis rembesan dan stabilitas bendungan Bajulmati menggunakan PLAXIS 3D 2013 dengan variasi kondisi pembebanan seperti kondisi pada model 2D dapat dilihat pada **Gambar 10**. Dari nilai faktor keamanan (SF) yang diperoleh dibandingkan dengan model 2D, maka nilai SF tersebut akan lebih besar.



Gambar 10. Arah bidang runtuh pada model 3D

Pemodelan struktur bendungan dengan *meshing* yang berbeda (*medium, fine, veryfine*) memiliki persentase selisih yang dapat dilihat pada **Tabel 2**. Semakin kecil *meshing* yang dibuat, maka akan diperoleh persentase selisih SF yang semakin kecil antara model 2D dan 3D. Pemodelan *meshing* dibuat dengan cara menyamakan bentuk ukuran *element dimension* antara model 2D dan 3D sehingga hasil analisis nilai faktor keamanan dapat dibandingkan dengan baik.

Tabel 2. Rangkuman Nilai Safety Factor Hasil Pemodelan Berdasarkan Meshing

No.	Meshing	2D			3D			% Selisih SF 2D & 3D
		Element Dimension (m)	Total Element	SF	Element Dimension (m)	Total Element	SF	
1	Medium	3,203	253	1,394	3,202	1.121	1,601	12,93
	Fine	2,239	450	1,374	2,241	2.988	1,567	12,32
	Very Fine	1,601	934	1,363	1,601	8.356	1,503	9,31
2	Medium	13,976	233	1,784	13,57	3.857	1,956	8,79
	Fine	9,51	481	1,751	9,502	9.357	1,936	9,56
	Very Fine	6,788	868	1,747	6,787	24.460	1,868	6,48

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis rembesan dan stabilitas bendungan bajulmati dengan metode elemen hingga diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada kondisi pembebanan *after construction*, muka air minimum, muka air maksimum dan surut cepat pada model 2D sebelum diberi beban gempa diperoleh nilai *safety factor* berturut-turut sebesar 2,088; 1,876; 1,965; 1,750 dan 1,823; 1,688; 1,461; 1,452 untuk hasil analisis setelah diberi beban gempa.
2. Arah bidang runtuh pada model 2D sebelum terjadi gempa berturut-turut bergerak ke arah hilir, hulu, hilir dan hulu. Sedangkan, untuk kondisi setelah terjadi gempa arah bidang runtuh keseluruhannya bergerak ke arah hilir.
3. Hasil faktor keamanan pada model 3D berurut-turut adalah sebesar 2,321 1,951; 2,103; 1,890 dan arah bidang longsor ke arah hulu, hulu, hilir dan hulu.
4. Nilai faktor keamanan yang diperoleh dari model 2D dan 3D keseluruhannya memenuhi syarat keamanan berdasarkan RSNI-M-03-2002 dengan nilai syarat *SF* sebesar 1,1 s/d 1,5 (Badan Standarisasi Nasional, 2002).

DAFTAR RUJUKAN

- Badan Standarisasi Nasional (2002). Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan, RSNI M-03-2002. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Google Earth. (2016). Lokasi Studi Kasus Bendungan Bajulmati. Diunduh April 6, 2016, dari <https://www.google.com/earth>.
- Kramer, S.L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. New Jersey, Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc.
- PLAXIS. (2014). Tutorial Manual PLAXIS 2D AE 2014. Netherland: PLAXIS Company.
- PLAXIS. (2013). Tutorial Manual PLAXIS 3D 2013. Netherland: PLAXIS Company.
- Sosrodarsono, S. (1977). Bendungan Tipe Urugan. Jakarta: Pradnya Paramita.
- USSD. (2007). Strength of Materials for Embankment Dams. Denver: United States Society on Dams.