

# Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan Raknamo

**DWI NANDA PUTRA, SRI HETTY SUSANTIN**

Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Nasional  
Email: dwinandaputra7@gmail.com

## **ABSTRAK**

*Bendungan Raknamo merupakan bendungan tipe urugan dengan inti tegak pada tubuh bendungan. Bendungan urugan berpotensi mengalami keruntuhan akibat berubahnya tegangan dalam tanah akibat aliran air. Untuk menghindari keruntuhan, maka diperlukan analisis stabilitas yang dihitung secara bersamaan antara aliran air dan deformasi menggunakan metode elemen hingga dan model 2D pada program PLAXIS 2D 2016. Kondisi yang dianalisis yaitu saat selesai konstruksi, muka air normal, muka air maksimum dan muka air minimum, yang akan dikombinasikan dengan beban gempa. Untuk kondisi surut cepat, faktor beban gempa diabaikan. Analisis dengan gempa menggunakan metode gempa pseudostatik. Hasil analisis berupa faktor keamanan (FK) terkritis di hilir terjadi pada kondisi muka air maksimum 1,890 sebelum ada gempa. Faktor keamanan yang dianalisis memenuhi kriteria yang mengacu pada RSNI M-03-2002, dimana nilai faktor keamanan yang diperoleh lebih besar dari kriteria minimum yang disyaratkan.*

**Kata kunci:** bendungan Raknamo, analisis stabilitas, faktor keamanan

## **ABSTRACT**

*The Raknamo dam is an embankment with a center of core rock fill dam. Embankment dam is risky to collapse due to changes of stress while ground water flow. To avoid collapse, it is necessary to do stability analyzes which were calculated simultaneously between water flow and deformation using the finite element method and 2D models in PLAXIS 2D 2016 program. The conditions to be analyzed are after construction, normal water level, high water level, minimum water level, which will be combined with the earthquake load. For rapid drawdown conditions, earthquake loads are ignored. Analysis with earthquake use the pseudostatic earthquake method. The result of analysis in the form of critical safety factor (SF) in the downstream occurred on high water level condition is 1,890. The safety factors analyzed meet the criteria referring to the RSNI M-03-2002, where the value of the safety factor obtained is more than the required minimum criteria.*

**Keywords:** the Raknamo dam, stability analysis, safety factor

## 1. PENDAHULUAN

Menurut Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara II (2014), Provinsi Nusa Tenggara Timur memiliki 2 iklim musim yang berbeda dari wilayah lainnya. Pada musim hujan biasanya dimulai pada pertengahan bulan Desember hingga bulan Maret dengan intensitas curah hujan yang tinggi namun dalam durasi waktu yang pendek yaitu selama 4 bulan, sedangkan musim kemarau terjadi selama 8 bulan kemudian. Hal ini menyebabkan wilayah ini sering mengalami banjir pada musim penghujan dan kekeringan yang berkepanjangan pada musim kemarau. Salah satu upaya untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan membangun suatu struktur penampung volume air berupa bendungan (*dam*). Pemerintah melalui Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat membangun bendungan Raknamo di Kabupaten Kupang Provinsi Nusa Tenggara Timur bertujuan untuk mengendalikan volume air pada saat musim penghujan dan menjaga volume air pada saat musim kemarau. Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis stabilitas tubuh bendungan pada saat kondisi selesai konstruksi, aliran air langgeng muka air normal, saat waduk beroperasi muka air maksimum dan muka air minimum dan kondisi darurat surut cepat. Maksud dan tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk mengetahui nilai faktor keamanan dan jumlah debit rembesan serta arah bidang runtuh yang terjadi pada tubuh bendungan tanpa beban gempa dan dengan beban gempa dengan bantuan program PLAXIS 2D 2016.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan suatu metode dalam menganalisis stabilitas lereng yang sering digunakan saat ini. Permasalahan yang ingin dianalisis dimodelkan dalam bentuk jaring-jaring (*mesh*) sehingga diperoleh kalkulasi dengan algoritma tertentu berupa perhitungan nilai faktor keamanan. Kelebihan dari metode ini adalah kemampuan analisis pada masalah yang hampir beragam dengan mengakomodasikan hampir seluruh bentuk geometri. Model yang dikembangkan yaitu dengan memasukkan faktor perilaku tegangan-regangan tanah meliputi *strees path* yang dimodelkan dalam bentuk urutan konstruksi.

### 2.2 Permeabilitas dan Rembesan

Permeabilitas adalah kemampuan tanah untuk dapat dirembesi pada tanah dalam kondisi jenuh. Penetapan permeabilitas dalam tanah baik vertikal maupun horisontal sangat penting dalam pengelolaan tanah dan air. "Bahan yang mempunyai pori-pori kontinu disebut dapat tembus air (*permeable*) seperti kerikil yang mempunyai sifat dapat tembus air yang tinggi sedangkan lempung kaku mempunyai sifat tembus air yang sangat rendah, oleh karena itu lempung disebut tidak dapat tembus air (*impermeable*)" (Soedarmo, 1997).

### 2.3 Stabilitas Lereng

Tujuan utama dari analisis stabilitas lereng adalah untuk memberikan suatu tinjauan dan perencanaan lereng yang aman dan ekonomis. Adanya perbedaan elevasi menyebabkan suatu talud/lereng yang mempunyai kecenderungan untuk longsor. Kelongsoran yang terjadi tergantung jenis tanah yang membentuk lereng dan kondisi alam. Kestabilan lereng dapat dibedakan atas lereng alam (*natural slopes*) dan lereng buatan (*man made slopes*). Lereng buatan dapat terjadi dengan pemotongan tebing atau pembangunan suatu *embankment* dan galian.

### 2.4 Kriteria Nilai Faktor Keamanan Stabilitas Lereng Bendungan

Gambaran kondisi keamanan lereng bendungan diberikan dari hasil analisis stabilitas lereng bendungan berupa nilai Faktor Keamanan (FK). RSNI M-03-2002 (Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan) membahas tentang analisis stabilitas lereng statik

bendungan tipe urugan dengan kriteria nilai faktor keamanan untuk berbagai kondisi bendungan, yang disajikan pada **Tabel 1**.

**Tabel 1. Kriteria Nilai Faktor Keamanan Minimum**

No.	Kondisi	Kuat Geser	Tekanan Air Pori	FK tanpa Gempa	FK dengan Gempa	
1	<b>Selesai konstruksi tergantung:</b>  1. Jadwal konstruksi. 2. Hubungan antara tekanan air pori dan waktu Lereng U/S dan D/S  Dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 50% koef. Gempa desain.	1. Efektif	Peingkatan tekanan air pori pada urugan dan fondasi dihitung menggunakan data lab. dan pengawasan instrumen.	1,30	1,20	
			2.Total	Idem hanya tanpa pengawasan instrument.	1,40	1,20
				Hanya pada urugan tanpa data lab. dan dengan/tanpa pengawasan instrument.	1,30	1,20
				Tanpa pengawasan instrument.	1,30	1,20
2	<b>Aliran langgeng tergantung:</b>  1. Elevasi muka air normal sebelah udik. 2. Elevasi muka air disebelah hilir. Lereng U/S dan D/S.  Dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 100% koef. Gempa desain.	1. Efektif	Dari analisis rembesan	1,50	1,20	
3	<b>Pengoperasian waduk tergantung:</b>  1. Elevasi muka air maksimum di udik. 2. Elevasi muka air minimum di udik ( <i>dead storage</i> ).  Lereng U/S harus dianalisis untuk kondisi surut cepat.	1. Efektif	Surut cepat dari elevasi muka air normal sampai elevasi muka air minimum. Lereng U/S dan D/S	1,30	1,10	
				Surut cepat dari elevasi muka air maksimum sampai elevasi muka air minimum. Pengaruh gempa diambil 0% dari koef. Gempa desain.	1,30	-
4	<b>Kondisi darurat tergantung:</b>  1. Pembuntuan pada sistem drainase. 2. Surut cepat karena penggunaan air melebihi kebutuhan. 3. Surut cepat keperluan darurat,	1. Efektif	Surut cepat dari elevasi muka air maksimum sampai elevasi terendah bangunan pengeluaran.	1,20	-	
				Pengaruh gempa diabaikan.		

(Sumber: RSNI M-03-2002)

## 2.5 Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa

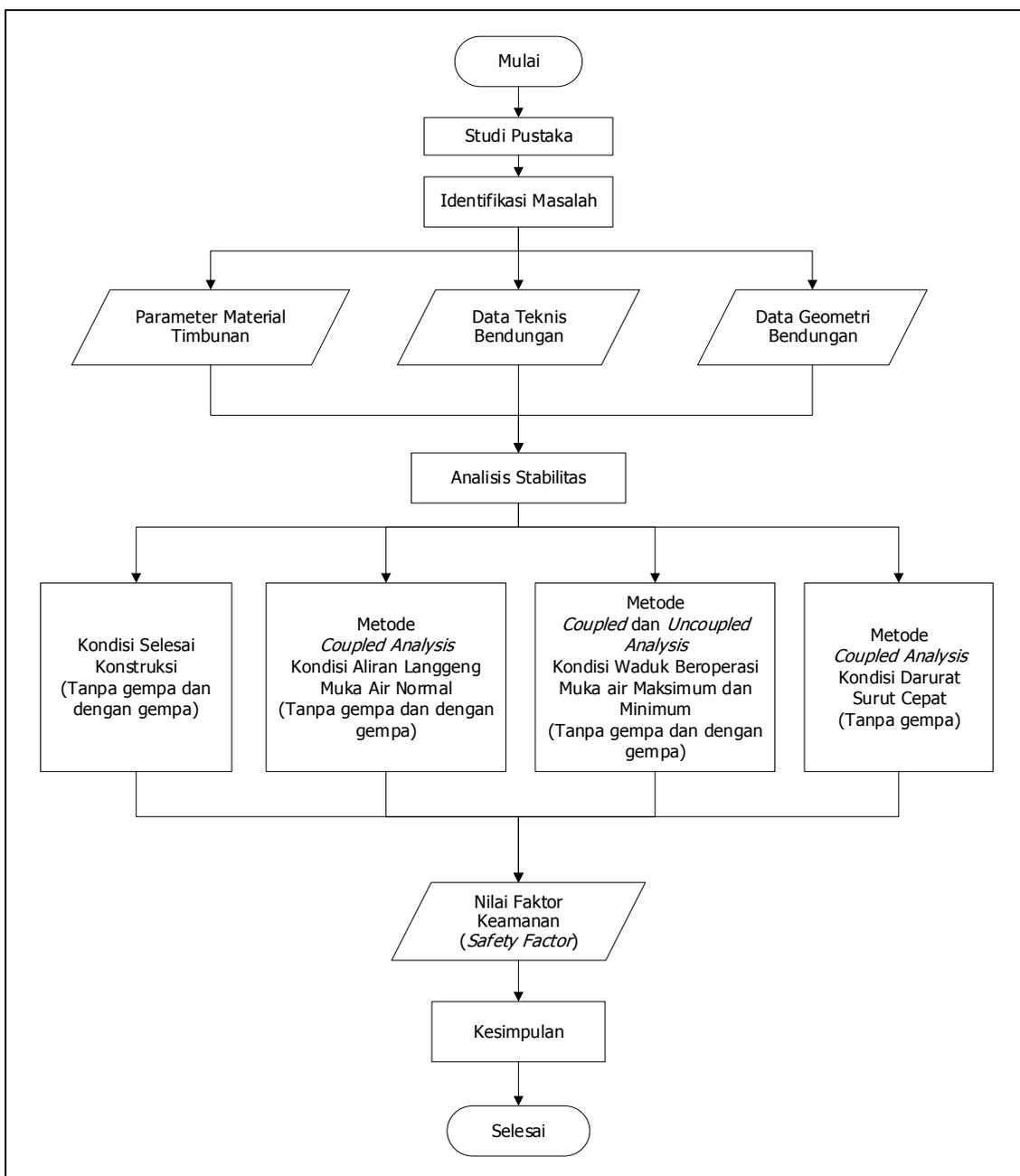
Bendungan adalah konstruksi yang tingkat risikonya tinggi, karena bila terjadi kerusakan akan menimbulkan kerugian yang besar, dari segi materi dan korban jiwa. Maka dari itu, diperlukan perencanaan yang teliti untuk mendapatkan desain bendungan yang memenuhi

syarat keamanan. Salah satu gaya yang dapat menimbulkan kerusakan yang parah pada bendungan adalah gaya gempa. Peta zona gempa yang digunakan adalah peta zona gempa Indonesia tahun 2017.

### 3. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Tahapan Kegiatan Penelitian

Tugas Akhir ini membahas tentang perbandingan faktor keamanan beban gempa dan tanpa beban gempa menggunakan cara perhitungan *coupled analysis* pada stabilitas tubuh bendungan Raknamo menggunakan bantuan *software* PLAXIS 2D 2016. Secara umum prosedur perancangan dan analisis secara sederhana disajikan dengan bagan alir seperti pada **Gambar 1**.



**Gambar 1.** Bagan alir metodologi penelitian

## 4. ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Analisis Data

Data parameter tanah yang digunakan berupa data sekunder yang diperoleh dari PUSLITBANG Sumber Daya Air pada proyek pembangunan bendungan Raknamo.

### 4.2 Analisis Menggunakan Program PLAXIS 2D 2016

Analisis stabilitas tubuh bendungan akan menggunakan metode elemen hingga dengan model 2D. Analisis stabilitas yang menggunakan bantuan program PLAXIS 2D 2016 akan menghasilkan nilai faktor keamanan pada masing-masing kondisi. Pada perangkat lunak ini terdapat *staged constructions* mode yang dapat mensimulasikan secara realistis proses konstruksi dengan mengaktifkan dan me-nonaktifkan sebagian volume tanah, objek struktur, beban yang diaplikasikan dan lain-lain. *Output* berupa rangkaian lengkap secara visualisasi dan grafik untuk memeriksa secara detail struktur yang kompleks dari model tanah dan struktur bawah tanah secara 2 dimensi. Program ini terdiri dari masukan (*input*), perhitungan (*calculation*), dan keluaran (*output*). Analisis perhitungan dilakukan secara otomatis berdasarkan prosedur numerik.

### 4.3 Analisis Stabilitas Tanpa Beban Gempa dan Dengan Beban Gempa

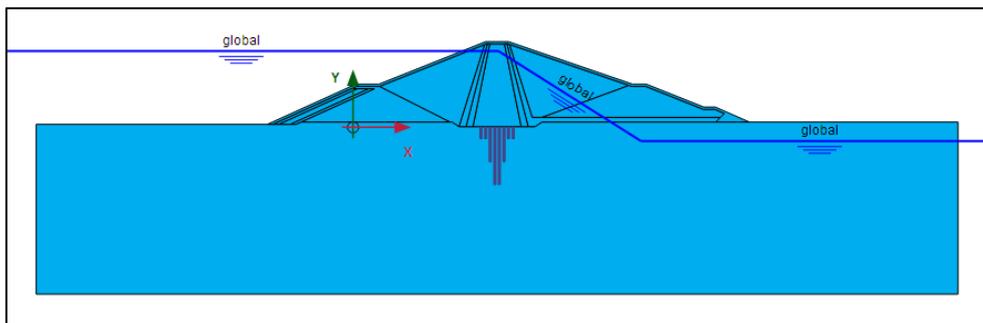
Untuk menganalisis stabilitas pada bendungan Raknamo tanpa beban gempa dan dengan beban gempa digunakan bantuan *software* PLAXIS 2D 2016 yang menghasilkan *output safety factor* pada masing-masing kondisi yang dianalisis. Analisis gempa yang dilakukan adalah persyaratan tanpa kerusakan pada periode gempa ulang  $T = 100$  tahun dengan FK minimum 1,2. Persyaratan diperkenankan ada kerusakan, tetapi tanpa keruntuhan pada periode gempa ulang  $T = 5.000$  tahun (MDE) dengan FK minimum 1,0. Jika tidak terpenuhi, maka harus dilakukan analisis dinamik untuk menghitung alihan tetap. Aliran tetap harus kurang dari 50% tinggi jagaan bendungan.

### 4.4 Analisis Pada Kondisi Waduk Mencapai Elevasi Muka Air Maksimum Tanpa Beban Gempa

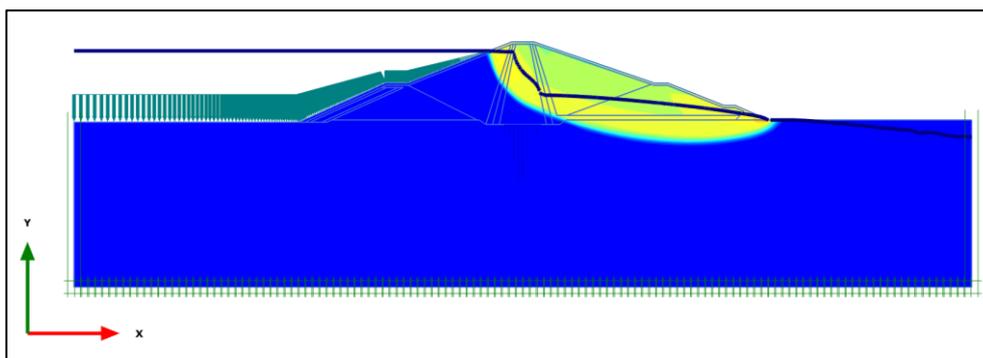
Pada saat muka air telah mencapai elevasi muka air maksimum, struktur bendungan akan rentan terhadap ketidakstabilan lereng hilir. Oleh karena itu, diperlukan analisis stabilitas pada kondisi muka air maksimum. Pada tahap *initial phase*, perhitungan awal yang dilakukan akan mengikuti kondisi muka air yang telah mencapai elevasi muka air maksimum. Kondisi batas muka air maksimum pada bendungan berada pada elevasi +106,3 m terlihat pada **Gambar 2**.

Proses perhitungan untuk menganalisis stabilitas bendungan pada kondisi muka air maksimum melewati 3 tahapan perhitungan dengan model Mohr-Coulomb. Tahapan pertama adalah menghitung berat sendiri struktur bendungan dengan mode *gravity loading* dengan tipe analisis berupa *steady state flow* pada muka air maksimum. Tahapan kedua adalah menghitung aliran air dan deformasi secara bersamaan dengan *fully coupled flow-deformation*. Prosedur perhitungan pada tahap ketiga merupakan proses perhitungan untuk menentukan nilai faktor keamanan dengan Metode phi-c *reduction* dengan mode pilihan berupa safety pada PLAXIS.

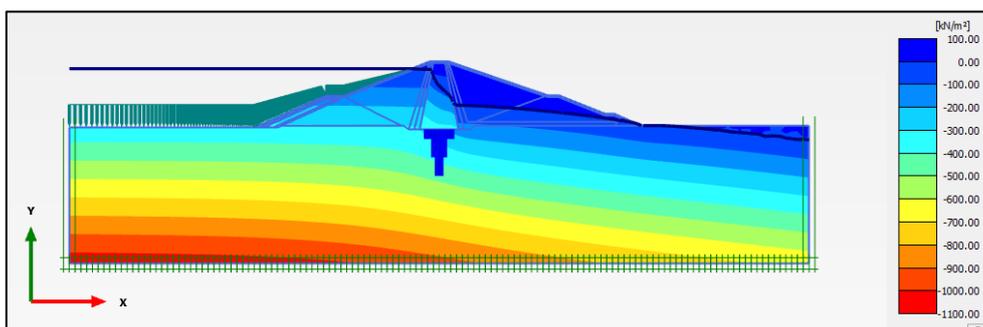
Hasil perhitungan untuk kondisi muka air maksimum tampak seperti **Gambar 3** yang berupa arah bidang runtuh pada lereng bendungan yang bergerak kearah hilir. Nilai faktor keamanan untuk kondisi muka air maksimum sebesar 1,890. Besaran debit maksimum yang terjadi pada kaki hilir bendungan sebesar  $0,1929 \text{ m}^3/\text{m}/\text{day}$  dan **Gambar 4** menunjukkan distribusi tekanan pori pada kondisi muka air maksimum.



**Gambar 2. Kondisi batas pada muka air maksimum**



**Gambar 3. Arah bidang runtuh pada hilir saat kondisi muka air maksimum**



**Gambar 4. Distribusi tekanan pori pada kondisi muka air maksimum**

Hasil analisis stabilitas tubuh bendungan Raknamo dengan metode elemen hingga menggunakan PLAXIS 2D 2016 tanpa beban gempa dengan analisis ganda (*coupled analysis*) dan analisis tidak ganda (*uncoupled analysis*), direkapitulasi nilai faktor keamanannya seperti disajikan pada **Tabel 2**.

**Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Analisis tanpa Beban Gempa**

No.	Kondisi	Metode Analisis	Tanpa Gempa			Keterangan
			Arah Bidang Runtuh	FK	FK Syarat Minimum	
1	<i>After Construction</i>	<i>Coupled</i>	Hulu	1,920	1,3	Memenuhi Syarat
2	Aliran Langgeng ( <i>Normal Water Level</i> )	<i>Coupled</i>	Hilir	1,990	1,5	Memenuhi Syarat

**Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Analisis tanpa Beban Gempa lanjutan**

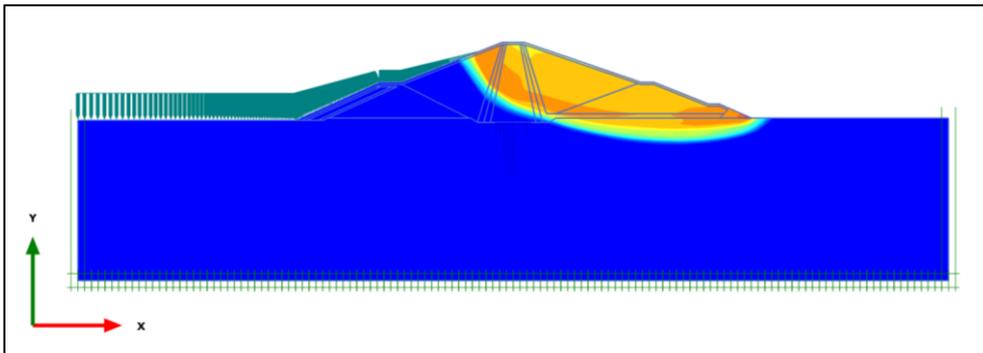
No.	Kondisi	Metode Analisis	Tanpa Gempa			Keterangan	
			Arah Bidang Runtuh	FK	FK Syarat Minimum		
3	Waduk Beroperasi	<i>Coupled</i>	Hilir	1,890	1,3	Memenuhi Syarat	
			Hilir	1,923			
		<i>Uncoupled</i>	Hulu	2,112	1,3		
			Hulu	2,220			
4	Kondisi Darurat ( <i>Rapid Drawdown</i> )	<i>Coupled</i>	1 hari	Hulu	1,919	1,3	Memenuhi Syarat
			3 hari	Hulu	1,999		
			5 hari	Hulu dan Hilir	2,002		
			7 hari	Hulu dan Hilir	2,032		

#### 4.5 Analisis Pada Kondisi Waduk Mencapai Elevasi Muka Air Maksimum Dengan Beban Gempa

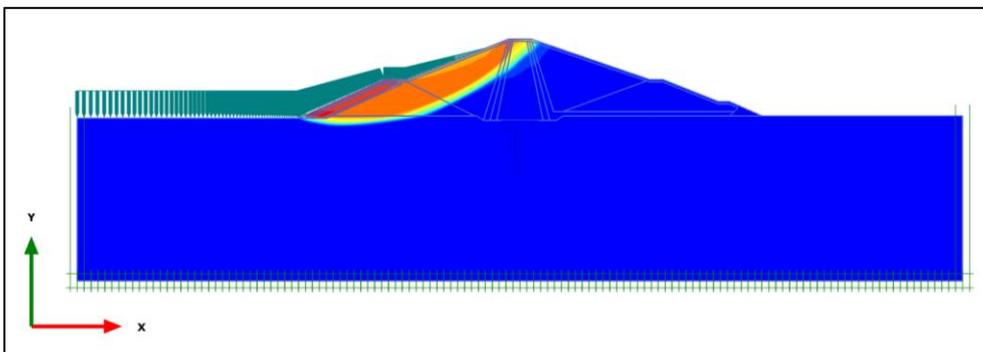
Analisis Stabilisasi bendungan pada saat kondisi waduk beroperasi muka air maksimum (HWL) akan semakin riskan bila struktur bendungan diterpa gempa. Untuk mengantisipasi keruntuhan akibat dari penambahan beban gempa, maka diperlukan analisis stabilitas pada kondisi muka air maksimum. Pada kondisi muka air maksimum dilakukan analisis stabilitas dengan kombinasi gempa *pseudostatic* dengan memberikan gaya gempa *pseudostatic* dari gempa arah *negative* (-) dan gempa arah *positive* (+) pada tubuh bendungan. Metode perhitungan yang digunakan adalah metode *coupled analysis* atau analisis ganda yang merupakan metode dimana aliran air dan deformasi yang terjadi pada bendungan dianalisis secara bersamaan untuk menghasilkan analisis yang mendekati kondisi yang sebenarnya.

Kondisi batas muka air maksimum pada bendungan berada pada elevasi +106,3 m terlihat pada **Gambar 2**. Prosedur perhitungan untuk kondisi muka air maksimum meliputi 4 tahapan (*phase*) perhitungan yang menggunakan parameter Mohr-Coulomb. Perhitungan pada fase pertama (*initial phase*) adalah perhitungan berat *sendiri* (*gravity loading*) bendungan. Perhitungan pada fase kedua adalah mode *fully coupled flow-deformation* untuk menghitung aliran air dan deformasi secara bersamaan. Perhitungan pada fase ketiga adalah mode *plastic* untuk mengaktifkan beban *pseudostatic* yang bervariasi pada PLAXIS. Pada fase keempat digunakan perhitungan dengan mode *safety* untuk mendapatkan nilai faktor keamanan dari masing-masing kondisi.

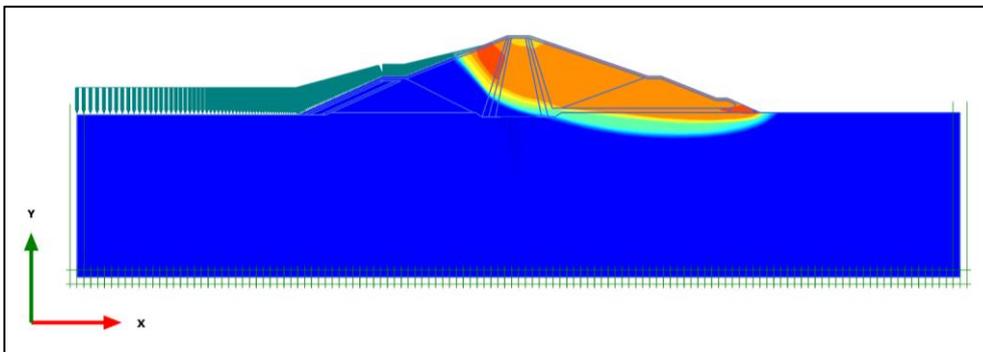
Hasil analisis yang telah dilakukan untuk kondisi gempa  $T = 100$  tahun (*Operation Based Earthquake*, OBE) dari gempa arah *negative* (-)  $FK = 1,441$  dan gempa arah *positive* (+)  $FK = 1,671$ . Untuk kondisi gempa  $T = 5.000$  tahun (*Maximum Design Earthquake*, MDE) dari gempa arah *negative* (-)  $FK = 1,236$  dan gempa arah *positive* (+)  $FK = 1,373$ . *Output* arah bidang runtuh dengan beban gempa telah disajikan seperti pada **Gambar 5 sampai dengan Gambar 8** dan *output* besaran debit maksimum yang terjadi pada kaki hilir bendungan sebesar  $0,1756 \text{ m}^3/\text{m}/\text{day}$ .



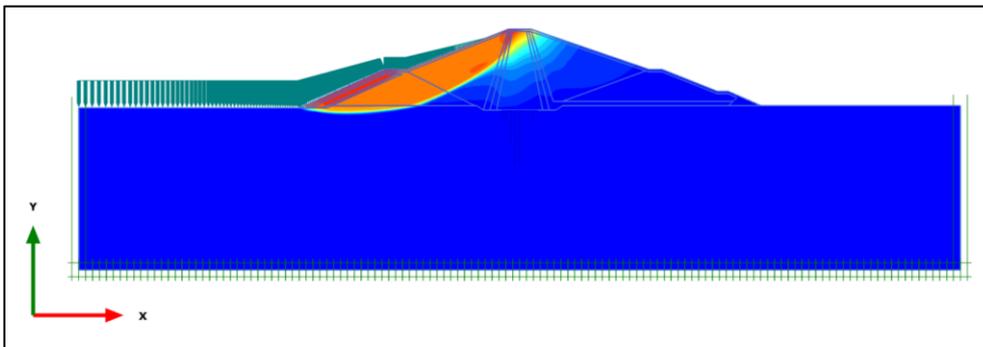
Gambar 5. Arah bidang runtuh pada hilir saat kondisi muka air maksimum setelah terjadi gempa  $T = 100$  tahun dari gempa arah *negative (-)*



Gambar 6. Arah bidang runtuh pada hulu saat kondisi muka air maksimum setelah terjadi gempa  $T = 100$  tahun dari gempa arah *positive (+)*



Gambar 7. Arah bidang runtuh pada hilir saat kondisi muka air maksimum setelah terjadi gempa  $T = 5.000$  tahun dari gempa arah *negative (-)*



Gambar 8. Arah bidang runtuh pada hulu saat kondisi muka air maksimum setelah terjadi gempa  $T = 5.000$  tahun dari gempa arah *positive (+)*

Hasil analisis stabilitas tubuh bendungan Raknamo dengan metode elemen hingga menggunakan PLAXIS 2D 2016 dengan tambahan beban gempa, direkapitulasi nilai faktor keamanannya seperti disajikan pada **Tabel 3**.

**Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Analisis dengan Beban Gempa**

No.	Kondisi	Metode Analisis	Dengan Gempa						Keterangan
			Arah Gempa	Arah Bidang Runtuh	FK		FK Syarat Minimum		
					T=100 Tahun OBE	T=5.000 Tahun MDE	OBE	MDE	
1	After Construction	Coupled	→ (-)	Hilir	1,872	1,645	1,2	1,0	Memenuhi Syarat
			← (+)	Hulu	1,554	1,386			
2	Aliran Langgeng (Normal Water Level)	Coupled	→ (-)	Hilir	1,459	1,245	1,2	1,0	Memenuhi Syarat
			← (+)	Hulu	1,619	1,342			
3	Waduk Beroperasi	Coupled	→ (-)	Hilir	1,441	1,236	1,2	1,0	Memenuhi Syarat
			← (+)	Hulu	1,671	1,373			
		Uncoupled	→ (-)	Hilir	1,460	1,244	1,2	1,0	
			← (+)	Hulu	1,609	1,319			
		Coupled	→ (-)	Hilir	1,639	1,408	1,2	1,0	
			← (+)	Hulu	1,549	1,314			
Uncoupled	→ (-)	Hilir	1,647	1,421	1,2	1,0			
	← (+)	Hulu	1,489	1,253					

Pengaruh muka air sangat besar terhadap kestabilan bendungan dimana pada saat muka air maksimum memiliki nilai faktor keamanan terkecil. Kondisi akan semakin kritis saat kondisi muka air maksimum dikarenakan semakin tinggi muka air maka semakin besar beban air yang di tahan oleh tubuh bendungan.

Pembebanan gempa yang diterapkan dalam analisis menggunakan percepatan *pseudostatic* berdampak cukup signifikan terhadap kestabilan bendungan dengan memberikan arah gempa *negative* (-) maka secara otomatis daerah tubuh bendungan yang paling menderita atau mendapatkan dorongan gempa adalah pada hilir tubuh bendungan, sedangkan untuk arah gempa *positive* (+) sebaliknya kondisi yang paling menderita adalah pada hulu tubuh bendungan, dimana arah aliran air yang menggenangi tubuh bendungan berada pada hulu bendungan.

Hasil faktor keamanan dengan menggunakan analisis tidak ganda (*uncoupled analysis*) apabila dibandingkan dengan nilai faktor keamanan dengan analisis ganda (*coupled analysis*) tidak berbeda jauh, namun faktor keamanan pada analisis stabilitas dengan analisis tidak ganda (*uncoupled analysis*) lebih besar dari analisis stabilitas dengan analisis ganda (*coupled analysis*). Hal ini dikarenakan pada analisis tidak ganda, aliran air dan deformasi pada tubuh bendungan dianalisis secara terpisah sehingga pengaruh terhadap stabilitas bendungan semakin kecil. Hasil analisis berupa nilai faktor keamanan yang dibandingkan dengan kriteria minimum untuk desain stabilitas bendungan dari RSNI-M-03-2002 untuk keseluruhan kondisi memenuhi syarat keamanan.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Hasil analisis stabilitas tubuh bendungan Raknamo dengan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan program komputer PLAXIS 2D 2016 dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Untuk Hasil analisis stabilitas tubuh bendungan Raknamo menggunakan metode elemen hingga dengan analisis ganda (*coupled analysis*) dan analisis tidak ganda (*uncoupled analysis*) tanpa gempa dan dengan gempa menghasilkan nilai faktor keamanan yang memenuhi kriteria faktor keamanan minimum menurut RSNI M-03-2002.
2. Kondisi akan semakin kritis saat kondisi muka air maksimum dikarenakan semakin tinggi muka air maka semakin besar beban air yang di tahan oleh tubuh bendungan.
3. Penambahan beban gempa *pseudostatic* berpengaruh sangat besar bagi kestabilan tubuh bendungan, dimana nilai faktor keamanan yang diperoleh pada keseluruhan kondisi analisis akan lebih kecil dibanding analisis tanpa beban gempa, tetapi tetap aman untuk digunakan.
4. Analisis stabilitas tanpa gempa dan dengan tambahan beban gempa menggunakan metode analisis ganda (*coupled analysis*), nilai faktor keamanan yang dihasilkan lebih kritis dibandingkan dengan nilai faktor keamanan hasil analisis dengan menggunakan metode analisis tidak ganda (*uncoupled analysis*). Hal ini disebabkan oleh karena aliran air tanah akan mempengaruhi besaran dari deformasi sehingga mempengaruhi nilai dari faktor keamanannya.

### 5.2 Saran

Saran-saran yang dapat diberikan setelah melakukan proses analisis stabilitas tubuh bendungan Raknamo adalah:

1. Untuk analisis selanjutnya disarankan menggunakan *software* lain sebagai pembanding hasil kalkulasi program.
2. Pemodelan 3D sebaiknya dilakukan agar hasil kalkulasi program mendekati kondisi sebenarnya untuk dibandingkan dengan pemodelan 2D yang lebih konservatif.
3. Perlu dilakukan pemodelan akibat pengaruh *phreatic line* yang terbentuk berdasarkan kedalaman material.
4. Perlu dilakukan analisis dengan tambahan beban gempa dinamik termodifikasi.

## DAFTAR RUJUKAN

- Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara II. (2014). *Google*. Dipetik September 2017, dari Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara II: <http://bwsnt2.org/web/?q=raknamo>
- RSNI M-03-2002. (2002). *Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Soedarmo, G. D. dan Purnomo, S. J. E. (1997). *Mekanika Tanah 1*. Yogyakarta: Kanisius.