

## KESETIMBANGAN BATAS DETERMINISTIK VS PROBABILISTIK METODE MORGENSTERN-PRICE DI BENDUNGAN NADRA, CILEGON

Ahmad Rofikun<sup>1\*</sup>, Raden Irvan Sophian<sup>1</sup>, Zufialdi Zakaria<sup>1</sup>, Pulung Arya Pranantya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

<sup>2</sup>Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

\*Korespondensi: ahmad15016@mail.unpad.ac.id

### ABSTRAK

Bendungan Nadra merupakan bendungan yang di kelola oleh PT. Krakatau Tirta Industri dan terletak di Desa Masigit, Kecamatan Ciwandan, Kota Cilegon, Banten. Bendungan ini merupakan bendungan tipe urugan tanah, sehingga perlu dilakukan analisis kestabilan lereng bendungan sebagai sarana penunjang operasi. Tujuan dilakukan penelitian ini yaitu untuk mengetahui keamanan lereng menggunakan analisis deterministik dan analisis probabilistik dengan metode kesetimbangan batas Morgenstern-Price. Simulasi dilakukan pada ketiga profil lereng bendungan dengan elevasi muka air maksimum, normal, dan minimum. Setiap profil lereng diberikan beban gempa 0,26 dan 0,46. Hasil simulasi kestabilan lereng adalah nilai faktor keamanan deterministik ( $FK_{\text{Deterministik}}$ ), faktor keamanan rata-rata ( $FK_{\text{mean}}$ ), dan probabilitas kelongsoran (PK). Lereng dalam keadaan aman dengan analisis deterministik didasarkan pada batas minimum nilai faktor keamanan. Batas minimum nilai faktor keamanan lereng dengan beban gempa yaitu 1,2 (Badan Standardisasi Nasional, 2016). Sedangkan berdasarkan analisis probabilistik lereng dalam keadaan aman memiliki nilai probabilitas kelongsoran 0%. Kondisi Bendungan Nadra berdasarkan analisis deterministik lereng hulu profil I-I dan lereng hilir semua profil dengan beban gempa 100 tahun dalam keadaan aman. Sedangkan berdasarkan analisis probabilistik lereng hulu profil I-I dan lereng hilir semua profil dengan beban gempa 100 tahun, serta profil II-II lereng hilir dengan beban gempa 5000 tahun dalam keadaan aman. Maka dari itu dapat disimpulkan bahwa lereng yang termasuk dalam kategori aman berdasarkan analisis deterministik belum tentu aman berdasarkan analisis probabilistik dan begitu juga sebaliknya.

**Kata kunci :** Beban Gempa, Bendungan Nadra, Deterministik, Morgenstern-Price, Probabilistik

### ABSTRACT

*Nadra Dam is a dam managed by PT. Krakatau Tirta Industri and is located in Masigit Village, Ciwandan District, Cilegon City, Banten. This dam is landfill-typed which requires slope stability analysis as means of operational support. The aim of this study is to know the safety level of dam's slope using deterministic and probabilistic analysis with Morgenstern-Price's limit equilibrium method. Simulation have been done from 3 dam's slope profile at the stage of maximum, normal and minimum water level. Each of slope profile have been given seismic load of 0.26 and 0.46. The simulation results of slope stability are the values of deterministic safety factors ( $FK_{\text{Deterministic}}$ ), the average safety factor ( $FK_{\text{mean}}$ ), and the probability of failure (PF). The slope is safe with deterministic analysis based on the minimum value of the safety factor. The minimum value of safety factor with seismic load is 1.2 (National Standardization Agency, 2016). While based on probabilistic analysis of slopes in safe condition has a probability value of 0% slope. Based on deterministic analysis, the Nadra Dam condition of upstream slope profile I-I and all of downstream slope profiles are safe with 100-year seismic load. Whereas based on probabilistic analysis, the Nadra Dam condition of upstream slope profile I-I and all of downstream slope profiles with 100-year seismic load and also downstream slope profile II-II with 5000-year seismic load are safe. Therefore, the slopes that are in safe state based on deterministic analysis are not necessarily safe based on probabilistic analysis and vice versa.*

**Keywords :** Sismic Load, Nadra Dam, Deterministic, Morgenstern-Price, Probabilistic

## 1. PENDAHULUAN

Bendungan Nadra merupakan bendungan yang dikelola oleh PT. Krakatau Tirta Industri untuk menyuplai air bersih kepada industri hulu dan masyarakat. Bendungan ini berada di Desa Masigit, Kecamatan Ciwandan, Kota Cilegon, Provinsi Banten. Bendungan nadra merupakan bendungan tipe urugan atau timbunan tanah, sehingga perlu dilakukan analisis stabilitas lereng tanah pada bendungan. Analisis stabilitas lereng bendungan dilakukan karena merupakan sarana penunjang operasi. Jika lereng yang terbentuk tidak aman, maka kegiatan produksi akan terganggu. Selain itu juga akan menimbulkan bencana fatal yang berakibat pada keselamatan penduduk sekitar bendungan berupa harta dan nyawa.

Salah satu metode dalam analisis kestabilan lereng yaitu metode kesetimbangan batas yang didasarkan pada nilai faktor keamanan, yaitu perbandingan gaya penahan dengan gaya penggerak yang bekerja di bidang runtuh. Pada era 1990-an analisis didasarkan pada analisis deterministik, tetapi terdapat ketidakpastian dalam perhitungan faktor keamanan (Giani, 1992, dalam Arif, 2016). Ketidakpastian tersebut disebabkan oleh variabel material penyusun lereng dan dalam pengukuran. Selain analisis deterministik, terdapat juga analisis probabilistik. Perbedaan analisis deterministik dan analisis probabilistik terdapat pada banyaknya parameter yang dimasukkan. Analisis deterministik hanya menggunakan satu parameter yang dianggap mewakili, sedangkan analisis probabilistik menggunakan semua data yang ada untuk mengakomodasi setiap variasi yang mungkin terjadi. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui keamanan lereng Bendungan Nadra dengan menggunakan analisis deterministik dan analisis probabilistik.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Kestabilan Lereng

Das (1995) mendefinisikan bahwa lereng adalah suatu permukaan tanah yang miring

dan membentuk sudut tertentu terhadap suatu bidang horisontal dan tidak terlindungi. Berdasarkan jenisnya lereng dibagi menjadi 2 yaitu lereng alami dan lereng buatan. Lereng alami merupakan lereng yang terbentuk secara alami akibat aktivitas geologi dan belum direkayasa, sedangkan lereng buatan merupakan lereng yang terbentuk akibat aktivitas manusia atau telah direkayasa.

Kondisi kestabilan lereng dalam metode kesetimbangan batas dinyatakan dalam indeks faktor keamanan. Faktor keamanan dihitung menggunakan kesetimbangan gaya, kesetimbangan momen, atau menggunakan kedua kondisi kesetimbangan tersebut, tergantung metode perhitungan yang dipakai. Secara sederhana, faktor keamanan merupakan perbandingan dari akumulasi gaya penahan dan akumulasi gaya penggerak yang berasal dari lereng itu sendiri. Jika gaya penggerak lebih besar dari gaya penahan, maka lereng dapat dikatakan pada kondisi kritis dan juga sebaliknya, apabila gaya penahan lebih besar dari gaya penggerak, maka lereng tersebut dapat dikatakan berada pada kondisi stabil. Nilai faktor keamanan dapat ditentukan melalui persamaan dibawah ini (Hoek dan Bray, dalam Wyllie & Mah, 2004):

$$F = \frac{\sum \text{Gaya Penahan}}{\sum \text{Gaya Penggerak}} \dots\dots\dots \text{Persamaan 1}$$

Namun, hal itu tidak selalu sesuai dengan kondisi yang ada dilapangan secara langsung, melainkan lebih banyak lagi aspek yang mengontrol kestabilan suatu lereng. Oleh karena itu, diperlukan berbagai penggunaan metode yang sesuai dengan kondisi material dan kondisi lapangan yang ada agar perhitungan nilai faktor keamaan dapat lebih akurat.

Kestabilan lereng dipengaruhi oleh faktor internal (dari tubuh lereng sendiri) maupun faktor eksternal, antara lain : kegempaan, curah hujan, vegetasi, morfologi, batuan/tanah, maupun situasi setempat (Anwar dan Kesumadharma, 1991: Hirnawan, 1994), tingkat kelembababn tanah, adanya rembesan, dan aktivitas

geologi seperti patahan, rekahan dan liniasi (Sukandar, 1991) (dalam Zakaria, 2011).

## 2.2 Analisis Deterministik dan Probabilistik

Analisis deterministik merupakan pendekatan yang hanya menggunakan satu variabel parameter masukan yang menghasilkan nilai faktor keamanan tertentu. Parameter masukan tersebut berupa nilai rata-rata dari data yang ada, karena dianggap mewakili dari keseluruhan data.

Sedangkan analisis probabilistik merupakan suatu pendekatan yang mempertimbangkan seluruh variasi yang ada pada parameter masukan yang menghasilkan nilai faktor keamanan (FK) tertentu (Azizi, 2012). Hal ini didasarkan bahwa nilai seluruh parameter masukan acak tersebut memiliki peluang yang sama dalam menghasilkan FK tertentu akibat adanya ketidakpastian dari seluruh parameter masukan. Cara ini lebih merepresentasikan nilai variasi alami yang dimiliki masing-masing parameter masukan mengingat dalam pengambilan data parameter masukan tersebut sangatlah minim dengan pertimbangan biaya yang mahal.

Pada metode probabilistik diperlukan parameter statistik sebagai nilai masukan sebagai dasar dari analisis. Terdapat beberapa parameter statistik yang digunakan untuk analisis kestabilan lereng diantaranya rata-rata, standar deviasi, nilai relatif maksimum, dan nilai relatif minimum.

Selain itu, terdapat fungsi distribusi probabilitas, fungsi distribusi probabilitas merupakan suatu susunan distribusi yang berdasarkan teori peluang dapat mempermudah dalam menentukan nilai probabilitas kemunculan suatu peristiwa. Fungsi distribusi probabilitas sangat penting dalam analisis probabilistik untuk mengetahui probabilitas kemunculan suatu nilai variabel acak atau parameter dalam suatu sebaran data. Fungsi distribusi probabilitas memiliki sifat – sifat penyebaran yang khas dan menjadikan

fungsi satu akan berbeda dengan fungsi yang lainnya.

## 2.3 Beban Gempa

Menurut pedoman analisis bendungan tipe urugan akibat beban gempa “Pd T-14-2004-A” yang dikeluarkan oleh Kementerian Permukiman dan Prasarana Wilayah (Anonim, 2004), terdapat klasifikasi kelas risiko beban gempa yang harus digunakan dalam desain ditentukan oleh tingkat risiko bangunan dengan nilai pembobotan tertentu.

$$FR_{tot} = FR_k + FR_t + FR_e + FR_h. \text{Persamaan 2}$$

dengan:

$FR_{tot}$  = Faktor risiko total

$FR_k$  = faktor risiko pengaruh kapasitas waduk

$FR_t$  = faktor risiko pengaruh tinggi bendungan

$FR_e$  = faktor risiko kebutuhan evakuasi

Setelah diketahui faktor risiko total bendungan selanjutnya dilakukan perhitungan koefisien gempa desain. Berikut persamaan yang digunakan untuk perhitungan.

$$PGA_M = F_{PGA} \cdot SB \dots \dots \dots \text{Persamaan 3}$$

$$K_h = PGA_M / g \dots \dots \dots \text{Persamaan 4}$$

$$K_o = \alpha_2 \times K_h \dots \dots \dots \text{Persamaan 5}$$

dengan :

$PGA_M$  adalah nilai percepatan puncak di permukaan tanah berdasarkan klasifikasi jenis tanah,

$F_{PGA}$  adalah faktor amplifikasi untuk PGA

$K_h$  adalah koefisien gempa dasar tergantung pada periode ulang T,

g adalah gravitasi (dimana  $1g = 980,665 \text{ cm/dt}^2$ ),

$K_o$  adalah koefisien gempa terkoreksi di permukaan tanah,

$\alpha_2$  adalah koefisien pengaruh jenis struktur, untuk bendungan tipe urugan = 0,5,

Dalam analisis stabilitas ini koefisien gempa pada kedalaman Y dari puncak bendungan berbeda-beda. Untuk analisis

stabilitas, peninjauan dilakukan pada Y/H (H adalah tinggi bendungan) dengan menggunakan Kh pada periode ulang sesuai dengan yang dipersyaratkan. Koefisien gempa rata-rata K pada Y yang berbeda-beda dapat dihitung dengan persamaan-persamaan sebagai berikut.

Untuk  $0 < Y/H \leq 0,4$

$K = K_0 \times \{2,5 - 1,85 \times (Y/H)\}$  .. Persamaan 6

Untuk  $0,4 < Y/H \leq 1$

$K = K_0 \times \{2,0 - 0,6 \times (Y/H)\}$  .... Persamaan 7

### 3. METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu analisis deterministik dan probabilistik dengan metode kesetimbangan batas Morgenstern-Price. Parameter yang digunakan berupa sifat fisik dan mekanik material dengan keruntuhan Mohr-Coloumb. Analisis deterministik menggunakan data rata-rata material, sedangkan analisis probabilistik menggunakan data rata-rata, standar deviasi, relatif maksimum, relatif minimum, dan fungsi distribusi. Untuk mempermudah perhitungan faktor keamanan digunakan alat bantu berupa program komputer Rocscience Slide 2018.

Simulasi stabilitas lereng bendungan dilakukan pada tiga profil lereng (gambar

1) yang memiliki geometri berbeda, tetapi material penyusun masing-masing lereng sama. Kondisi muka air bendungan yaitu elevasi muka air maksimum (+21,20 m), normal (+20,50), dan minimum (18,50 m).

Dalam menentukan keamanan bendungan menggunakan nilai faktor keamanan minimum berdasarkan Badan Standardisasi Nasional (2016) tentang metode analisis stabilitas lereng statik bendungan urugan.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Data Material

Berdasarkan hasil uji laboratorium material timbunan merupakan lempung pasir-lanauan dengan indeks plastisitas rendah dan termasuk kedalam kelompok CL. Material timbunan memiliki berat jenis 18,6 kN/m<sup>3</sup>; kohesi 22,3; dan sudut geser dalam 22<sup>o</sup>. Material tanah dasar merupakan tuf batuapung dengan berat jenis 18,6 kN/m<sup>3</sup>; kohesi 58,8 kPa; dan sudut geser dalam 28,6<sup>o</sup>.

Sedangkan material *toe drain* merupakan batupasir dengan berat jenis 20 kN/m<sup>3</sup>; kohesi 50 kPa; dan sudut geser dalam 30<sup>o</sup>. Secara umum data material yang digunakan untuk penelitian ini disajikan dalam tabel 1.

**Tabel 1** Data Material Bendungan

Data Tanah	Tubuh Bendungan	Tanah Dasar	Toe Drain
Jenis Material	Lempung Pasir-Lanauan	Tuf Batuapung	Batupasir
Berat jenis (kN/m <sup>3</sup> )	18.6	18.6	20
Kohesi (kPa)	22.3	58.8	50
Sudut Geser Dalam (°)	22	28.6	30

### 4.2 Faktor Indeks Risiko Bendungan

Koefisien gempa desain bendungan mengikuti pedoman analisis bendungan tipe urugan akibat beban gempa “Pd T-14-2004-A” yang dikeluarkan oleh Kementerian Permukiman dan Prasaranan Wilayah. Analisis stabilitas bendungan urugan akibat beban gempa dimulai dengan menentukan faktor risiko keamanan bendungan. Berdasarkan total bobot skor (tabel 3) faktor risiko keamanan bendungan, maka

Bendungan Nadra termasuk kelas risiko III (tinggi).

**Tabel 2** Total Bobot Skor Faktor Risiko Keamanan Bendungan

Faktor Risiko	Kriteria Bendungan Nadra	Bobot Faktor Risiko
FR <sub>k</sub>	Kapasitas Waduk = 3.0 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	4
FR <sub>t</sub>	Tinggi Bendungan 17 m	2
FR <sub>e</sub>	Kebutuhan evakuasi <	8

	1000 jiwa	
FR <sub>h</sub>	Tingkat Kerusakan Hilir = Tinggi	8

FR <sub>tot</sub>	Faktor Risiko Total	22
-------------------	---------------------	----

**Tabel 3** Hasil Perhitungan Kelas Risiko

Faktor Risiko Total	Kelas Risiko	Kelas Risiko dengan massa guna	Persyaratan tanpa kerusakan		Persyaratan diperkenankan ada kerusakan tanpa keruntuhan	
			T (tahun)	Metode Analisis	T (tahun)	Metode Analisis
0-6	I (Rendah)	IV N = 50 – 100	100 – 200 a <sub>d</sub> ≥ 0,1 g	Koef. Gempa	10000	Koef. Gempa/ dinamik
7-18	II (Moderat)	III N = 50 – 100	50 – 100 a <sub>d</sub> ≥ 0,1 g	Koef. Gempa	5000	Koef. Gempa/ dinamik
19-30	III (Tinggi)	II N = 50 – 100	50 – 100 a <sub>d</sub> ≥ 0,1 g	Koef. Gempa	3000	Koef. Gempa/ dinamik
>31	IV (Ekstrem)	I N = 50 – 100	50 – 100 a <sub>d</sub> ≥ 0,1 g	Koef. Gempa	1000	Koef. Gempa/ dinamik

### 4.3 Uji Statistik

Uji statistik digunakan sebagai parameter masukan dalam analisis probabilistik. Pada penelitian ini pengujian statistik dilakukan pada material tubuh bendungan, karena material tersebut memiliki data yang beragam. Hasil dari uji statistik ini yaitu nilai rata-rata, standar deviasi, relatif maksimum, relatif minimum, dan fungsi distribusinya yang ditunjukkan pada tabel 4.

**Tabel 4** Hasil Uji Statistik Tubuh Bendungan

	Kohesi	Sudut Geser Dalam
Distribusi	Normal	Normal
Rata-rata	22,3	22
Standar Deviasi	3,2	1,9
Rel.Maksimum	4	3,1
Rel. Minimum	6,2	2,1

### 4.4 Koefisien Gempa

Kriteria beban gempa yang digunakan untuk analisis yaitu periode gempa 100 tahun dan 5000 tahun (tabel 3). Untuk mengetahui beban gempa 100 tahun dan 5000 tahun, penelitian ini menggunakan peta sumber dan bahaya gempa tahun 2017

yang diterbitkan oleh Pusat Studi Gempa Nasional (Irsyam dkk, 2017). Berdasarkan peta gempa 2017, lokasi penelitian diperoleh nilai percepatan puncak di batuan dasar (S<sub>B</sub>) sebesar 0,15 (lampiran 1 peta gempa 100 tahun) dan 0,5 ( lampiran 2 peta gempa 5000 tahun).

Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai percepatan puncak di permukaan tanah dengan persamaan 3. Lalu koefisien gempa dasar dengan persamaan 4 dan koefisien gempa di permukaan tanah dengan persamaan 5. Perhitungan koefisien gempa koreksi untuk analisis stabilitas bendungan dilakukan perhitungan dengan persamaan 6 dan persamaan 7. Hasil perhitungan ditunjukkan dalam tabel 5.

**Tabel 5** Hasil Perhitungan Koefisien Gempa Koreksi

Gempa	S <sub>B</sub>	F <sub>PGA</sub>	PGA <sub>M</sub>	K <sub>koreksi</sub>	
100 th	0.15	1.7	0.26	Y/H = 0.25	0.26
				Y/H = 0.5	0.22
				Y/H = 0.75	0.20
				Y/H = 1	0.18
5000 th	0.5	0.9	0.36	Y/H = 0.25	0.46
				Y/H = 0.5	0.38
				Y/H = 0.75	0.35
				Y/H = 1	0.32

Dalam analisis stabilitas bendungan, koefisien gempa yang digunakan yaitu Y/H

=0,25; 0,5; 0,75; 1. Namun pada penelitian kali ini hanya menggunakan koefisien gempa pada  $Y/H = 0,25$ , karena merupakan koefisien gempa terbesar dan untuk menjaga kemungkinan terburuk.

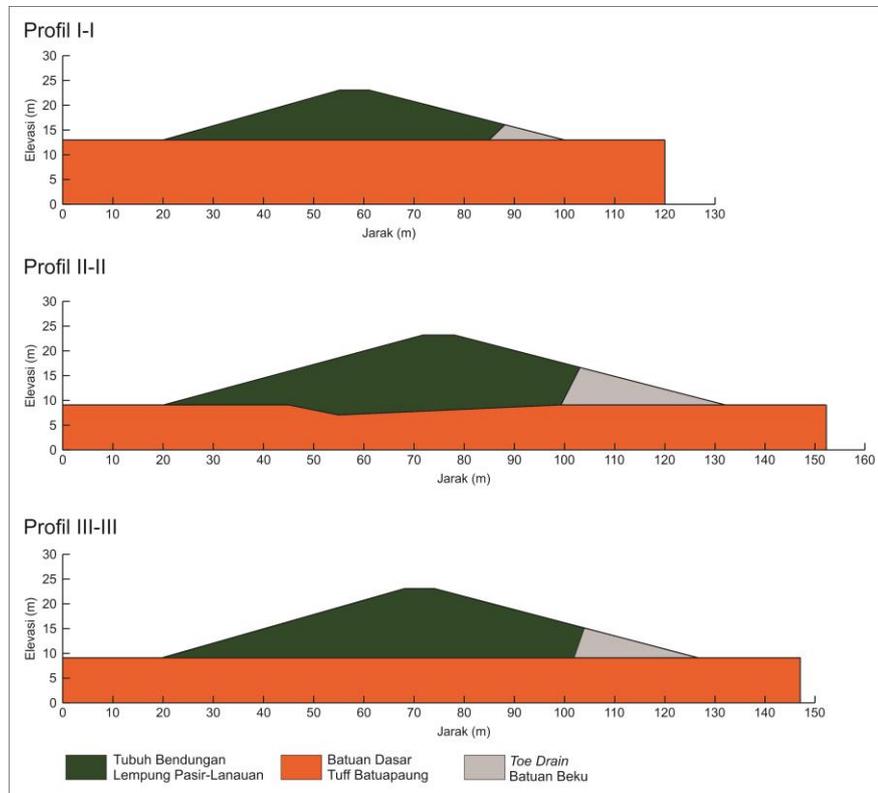
### 4.3 Simulasi Kestabilan Lereng

Simulasi menggunakan alat bantu *software Rocscience Slide 2018* dengan metode Morgenstern-Price. Simulasi dilakukan pada ketiga profil lereng (gambar 1) dengan data parameter masukkan berupa berat jenis, kohesi, dan sudut geser dalam. Hasil simulasi kestabilan lereng bendungan yaitu nilai faktor keamanan deterministik ( $FK_{\text{Deterministik}}$ ), faktor keamanan rata-rata ( $FK_{\text{mean}}$ ), dan probabilitas kelongsoran (PK). Nilai faktor keamanan deterministik ( $FK_{\text{Deterministik}}$ ) adalah faktor keamanan yang dihitung untuk permukaan bidang gelincir

*Global Minimum* dari analisis stabilitas lereng reguler (non-probabilistik). Ini merupakan faktor keamanan yang sama ketika hanya melakukan simulasi biasa. Faktor keamanan deterministik adalah nilai faktor keamanan ketika semua parameter input tepat sama dengan nilai rata-ratanya.

Nilai faktor keamanan rata-rata ( $FK_{\text{mean}}$ ) adalah faktor keamanan yang diperoleh dari analisis probabilistik. Ini merupakan faktor keamanan rata-rata dari semua faktor keamanan yang dihitung untuk permukaan bidang gelincir *global minimum*. Nilai probabilitas kelongsoran diperoleh dari jumlah analisis dengan faktor keamanan kurang dari satu (1) dibagi dengan jumlah total sampel. Nilai probabilitas kelongsoran memiliki satuan persen (%).

Hasil simulasi lereng ditunjukkan dalam tabel 6 dan tabel 7.



Gambar 1 Profil Bendungan Nadra

**Tabel 6** Hasil Simulasi Kestabilan Lereng pada Kondisi Beban Gempa 100 tahun

Beban Gempa 100 th		Profil I-I			Profil II-II			Profil III-III		
		FK det	FK mean	PK	FK det	FK mean	PK	FK det	FK mean	PK
Hulu	Maksimum	1.385	1.387	0	1.209	1.208	0.4	1.190	1.190	1.1
	Normal	1.364	1.367	0	1.189	1.195	0.6	1.174	1.175	1.5
	Minimum	1.350	1.353	0	1.182	1.184	1	1.160	1.160	1.7
Hilir	Maksimum	1.497	1.504	0	1.598	1.603	0	1.429	1.436	0
	Normal	1.510	1.517	0	1.634	1.639	0	1.449	1.456	0
	Minimum	1.566	1.568	0	1.640	1.644	0	1.524	1.529	0

**Tabel 7** Hasil Simulasi Kestabilan Lereng pada Kondisi Beban Gempa 5000 tahun

Beban Gempa 5000 th		Profil I-I			Profil II-II			Profil III-III		
		FK det	FK mean	PK	FK det	FK mean	PK	FK det	FK mean	PK
Hulu	Maksimum	0.899	0.904	95	0.784	0.789	100	0.777	0.785	100
	Normal	0.896	0.900	96.1	0.778	0.779	100	0.771	0.774	100
	Minimum	0.895	0.898	97	0.769	0.775	100	0.761	0.769	100
Hilir	Maksimum	1.037	1.041	26.9	1.133	1.138	0	1.012	1.020	36.8
	Normal	1.047	1.055	21	1.158	1.156	0	1.026	1.034	29.6
	Minimum	1.086	1.093	7.9	1.163	1.161	0	1.076	1.084	9.2

Lereng dalam keadaan aman ditunjukkan dengan kolom berwarna hijau, sedangkan lereng dalam keadaan tidak aman ditunjukkan dengan kolom berwarna merah. Keamanan lereng dengan analisis deterministik melihat nilai faktor keamanannya (FK). Batas minimum nilai faktor keamanan tersebut berdasarkan Badan Standardisasi Nasional (2016) yaitu 1,2 (dengan beban gempa). Sedangkan keamanan lereng dengan analisis probabilistik melihat dari nilai probabilitas kelongsorannya (PK). Ketika nilai PK 0% maka tidak mungkin terjadi keruntuhan (aman), sedangkan nilai PK lebih dari 0% mungkin terjadi keruntuhan (tidak aman).

Berdasarkan analisis deterministik lereng hulu dengan beban gempa 100 tahun profil I-I dalam keadaan aman. Pada profil II-II elevasi muka air maksimum dalam keadaan aman, tetapi elevasi muka air normal dan minimum dalam keadaan tidak aman. Profil III-III lereng hulu dalam keadaan tidak aman. Pada lereng hilir dengan beban gempa 100 tahun semua profil lereng dalam keadaan aman. Kondisi beban gempa 5000

tahun lereng hulu dan lereng hilir dalam keadaan tidak aman.

Berdasarkan analisis probabilistik lereng hulu dengan beban gempa 100 tahun profil I-I dalam keadaan aman, tetapi profil II-II dan III-III dalam keadaan tidak aman. lereng hilir semua profil dalam keadaan aman. Pada kondisi beban gempa 5000 tahun, lereng hulu dalam keadaan tidak aman. Lereng hilir profil I-I dan III-III dalam keadaan tidak aman, tetapi profil II-II dalam keadaan aman.

Terdapat perbedaan keamanan lereng antara analisis deterministik dan analisis probabilistik. Berdasarkan analisis deterministik pada profil II-II lereng hulu elevasi muka air maksimum dengan beban gempa 100 tahun dalam keadaan aman, tetapi dengan analisis probabilistik dalam keadaan tidak aman. Selain itu, pada profil II-II lereng hilir dengan beban gempa 5000 tahun berdasarkan analisis deterministik lereng dalam keadaan tidak aman, tetapi berdasarkan analisis probabilistik dalam keadaan aman.

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa lereng yang termasuk dalam kategori aman berdasarkan analisis probabilistik belum tentu aman berdasarkan analisis deterministik dan begitu juga sebaliknya. Perbedaan ini bisa disebabkan oleh adanya ketidakpastian material yang dipakai ataupun perhitungannya.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Dengan terselesaikannya artikel ini, penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada PT. Krakatau Tirta Industri dan Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat yang telah memberikan ijin kepada penulis untuk melakukan penelitian ini.

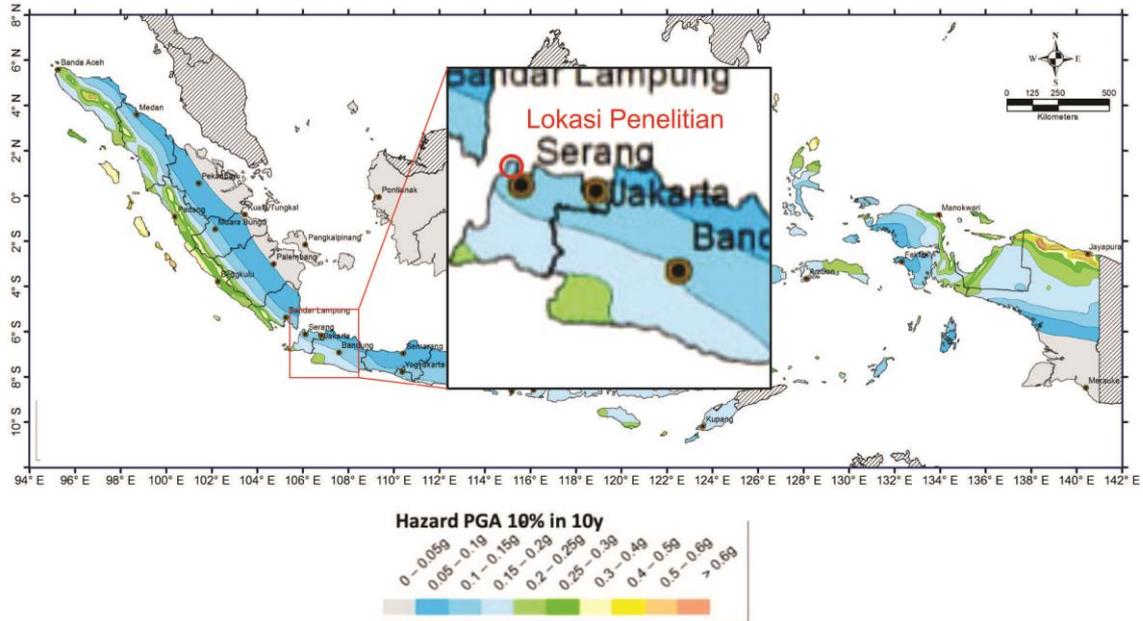
## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. (2004). *Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa*. Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah.
- Anonim. (2016). *Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

- Arif, I. (2016). *Geoteknik Tambang*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Azizi, M. A. (2012). Analisis Risiko Kestabilan Lereng Tambang Terbuka (Studi Kasus Tambang Mineral X). *Prosiding Simposium dan Seminar Geomekanika Ke-1*, (p. 4-19).
- Das, B. M., Endah, N., & Mochtar, I. B. (1993). *MEKANIKA TANAH (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Irsyam, M., Widiyantoro, S., Natawidjaja, D. H., Meilano, I., Rudyanto, A., Hidayati, S., . . . Sunarjito. (2017). *PETA SUMBER DAN BAHAYA GEMPA INDONESIA TAHUN 2017*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Pemukiman.
- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2006). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining. 4th Edition (Based on the 3th edition by E. Hoek and J. Bray)*. London and New York: Taylor & Francis Group.
- Zakaria, Z. (2009). *Analisis Kestabilan Lereng Tanah*. Bandung: Unpad.

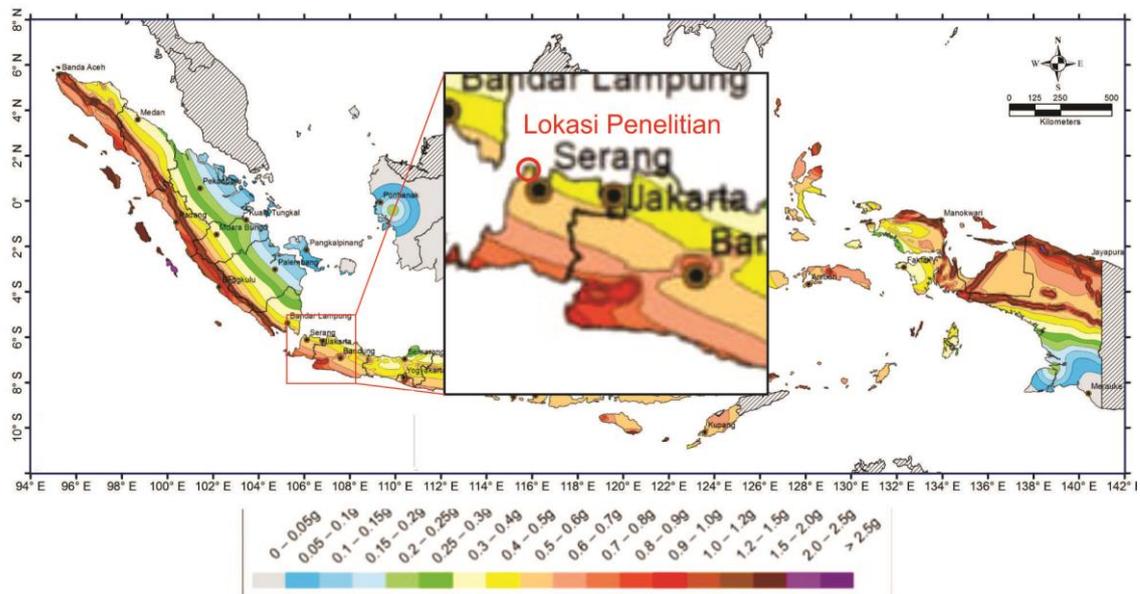
## LAMPIRAN

Peta percepatan puncak di batuan dasar ( $S_B$ ) untuk probabilitas terlampaui 10% dalam 10 tahun



Lampiran 1 Peta Gempa Periode 100 tahun

Peta percepatan puncak di batuan dasar ( $S_B$ ) untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 100 tahun



Lampiran 2 Peta Gempa Periode 5000 tahun