



## ANALISIS DUA DIMENSI KESTABILAN LERENG AKIBAT AKTIVITAS PELEDAKAN TAMBANG QUARRY A PT INDOCEMENT TUNGGAL PRAKARSA

### TWO-DIMENSIONAL SLOPE STABILITY ANALYSIS DUE TO BLASTING ACTIVITIES IN QUARRY A PT INDOCEMENT TUNGGAL PRAKARSA

D. Lestari<sup>\*1</sup>, T. Karian<sup>2</sup>, B. Sulistianto<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Rekayasa Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung

<sup>1-3</sup>Jalan Ganesha, No.10, Bandung, Jawa Barat

email: \*Diviatari@gmail.com

#### ABSTRAK

Kegiatan peledakan yang dilakukan pada tambang Quarry A menghasilkan getaran di sekitar lereng massa batuan. Getaran peledakan menambah pembebanan pada lereng sehingga kemampuan lereng akan berkurang yang diindikasikan melalui nilai faktor keamanan dan perpindahan lereng. Pada penelitian ini dilakukan penilaian kestabilan lereng Quarry A terhadap pengaruh pembebanan peledakan menggunakan tiga metode yaitu metode pseudostatik, *displacement Newmark* dan dinamik numerik. Kestabilan lereng dianalisis pada jarak 30 meter dari sumber peledakan dengan metode *limit equilibrium method* (LEM) dan *finite element method* (FEM) menggunakan software Slide2 dan RS2. Data yang digunakan dalam analisis berupa *properties* fisik dan mekanik batuan, pemodelan lereng, percepatan getaran (PPA) terhadap waktu durasi peledakan. Pada metode pseudostatik, lereng dipengaruhi nilai PPA maksimum konstan sedangkan pada statistik pseudostatik menggunakan nilai statistika PPA. Pada metode *displacement Newmark*, lereng dipengaruhi data getaran PPA aktual terhadap durasi peledakan selama 3,75 detik dan dipengaruhi faktor pengurangan kekuatan massa batuan. Pada lereng dinamik numerik dianalisis menggunakan data PPA aktual terhadap durasi peledakan dengan mempertimbangkan kondisi dinamik, *damping ratio* dan frekuensi getaran. Berdasarkan hasil analisis diketahui kestabilan lereng pada kondisi kering menggunakan metode pseudostatik dan *Newmark* menghasilkan nilai *maximum total displacement* lereng yaitu 0,45 cm pada SRF 1,77 dan 0,52 cm pada SRF 2,06. Sedangkan berdasarkan dinamik numerik sebesar 0,77 cm. Lereng Quarry A dinyatakan stabil dan tergolong berada pada status kerusakan ringan berupa retakan kecil kemungkinan terbentuk pada lereng berdasarkan kriteria FK minimum dinamik  $\geq 1,1$  serta  $0,5\text{cm} < \text{displacement} < 5\text{cm}$ .

**Kata kunci:** getaran peledakan, kestabilan lereng, pseudostatik, newmark, dinamik numerik

#### ABSTRACT

*Blasting activities was carried out at Quarry A mine may result considerable ground vibration around rock mass slope. Blasting vibration increase the load on the slope so that the stability of slope will be reduced as indicated by safety factor and slope displacement value. This research was carried out the assessment of Quarry A slope stability towards influence of blasting load using three methods: pseudostatic method, displacement Newmark and dynamic numeric. Slope stability is analyzed at a distance of 30 m from the source of blasting using the limit equilibrium method (LEM) and finite element method (FEM) by Slide2 and RS2 Software. The datas used in the analysis are physical and mechanical rock properties, 2D slope model, data vibration acceleration (PPA) to the blast duration. In the pseudostatic method, slope is influenced by constant maximum PPA value, whereas in statistic pseudostatic method using the statistical PPA value. In displacement Newmark method, slope is influenced by data actual PPA to blast duration during 3,75 s and rock mass strength reduction factor. In dynamic numeric, slope is analyzed using data PPA to blast duration and considered dynamic boundary, damping ratio and vibration frequency. Based on analysis result, slope stability in dry condition using pseudostatic and Newmark method produces the maximum value of total slope displacement is about 0,45 cm cm in SRF 1,77 and 0,52 cm in SRF 2,06 while based on dynamic numeric it is 0,77 cm. Quarry A slope is stated stable and classified as having light damage status, which is small cracks likely to happen on the slope based on criteria FK minimum dynamic  $\geq 1,1$  and  $0,5\text{cm} < \text{displacement} < 5\text{cm}$ .*

**Keywords:** blasting vibration, slope stability, pseudostatic, newmark, dynamic numeric



## PENDAHULUAN

PT Indo cement Tunggal Prakarsa Tbk merupakan salah satu produsen semen di Indonesia yang bergerak dalam pertambangan batu gamping. Dalam operasi penambangan *quarry* batu gamping dilakukan kegiatan peledakan yang bertujuan untuk membongkar batuan akibat karakteristik batuan yang keras serta untuk menghasilkan fragmentasi yang sesuai dengan standar perusahaan untuk dilanjutkan ke tahapan pengolahan semen. Kegiatan peledakan pada suatu lereng dapat menghasilkan getaran pada massa batuan dimana getaran tersebut dapat menyebabkan deformasi pada lereng di sekitarnya. Efek dari getaran tanah yang diakibatkan oleh peledakan dapat mempengaruhi perilaku massa batuan sehingga berimplikasi terhadap penurunan nilai kestabilan dari lereng [1]. Untuk itu pada penelitian ini dilakukan assesmen dari kestabilan lereng yang dipengaruhi oleh pembebahan peledakan dan membaginya menjadi tiga kategori, yaitu analisis pseudostatik, analisis *displacement Newmark*, dan analisis dinamik numerik [2].

Analisis pseudostatik mengasumsikan lereng selama masa umurnya dipengaruhi oleh percepatan getaran peledakan maksimum konstan, nilai percepatan getaran tidak berfluktuasi terhadap waktu [3]. Sementara, pendekatan *displacement Newmark* menganggap bahwa *displacement* permanen pada lereng terjadi ketika percepatan batuan akibat peledakan melebihi nilai percepatan *critical* lereng [4]. Sedangkan untuk analisis dinamik numerik melibatkan estimasi perilaku deformasi dari lereng menggunakan metode *finite element*. Pada *finite element*, skema berbeda untuk penurunan kekuatan massa batuan digunakan untuk menghasilkan faktor keamanan melalui parameter batuan input [5]. Assesmen kestabilan lereng dalam penelitian ini menggunakan metode *limit equilibrium* dan *finite element*. Pendekatan *finite element*, faktor keamanan muncul secara alami dari analisis tanpa pengguna harus berkomitmen pada bentuk mekanisme tertentu. Sedangkan metode *limit equilibrium* memerlukan permukaan yang kontinu melewati massa batuan atau tanah [6].

Pentingnya analisis dalam melakukan penilaian kestabilan lereng terhadap pembebahan peledakan telah ditekankan dalam beberapa studi. Bazzi, et al. (2020) mengungkapkan efek peledakan yang berulang terhadap kestabilan lereng tambang yang dipengaruhi oleh patahan menggunakan metode analisis dinamik [7]. Badanagki, et al. (2023) menganalisis permanen *displacement* di bawah pembebahan seismik terhadap lereng *in-pit dump* menggunakan metode *simplified pseudo-static*, metode *Newmark*, dan 2D *finite element* [8]. Selain itu, Ganjeh, et al. (2019) menganalisis perbandingan efek gempa bumi dan peledakan terhadap kestabilan lereng tambang menggunakan metode modelling numerik [9]. Hazegh, et al. (2018) menganalisis *final pit* melalui metode *pseudo static*,

*Newmark* dan metode numerik, hasilnya menunjukkan bahwa *pit wall* tidak aman terhadap pengaruh getaran gempa bumi pada kondisi jenuh [2]. Prassetyo, et al. (2020) menganalisis stabilitas dinamik menggunakan pendekatan sederhana dan rasional berdasarkan pada data monitoring getaran peledakan untuk mengestimasi pembebahan dinamik pada lereng tambang [10].

Meskipun beberapa penelitian tersebut telah menilai kestabilan lereng menggunakan pendekatan pseudostatik, *Newmark* dan dinamik numerik, tetapi masih sedikit penelitian yang secara khusus membandingkan dan mengkaji ketiga pendekatan tersebut terhadap hasil faktor keamanan lereng. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan dan memaparkan kelebihan dan kekurangan dari masing-masing pendekatan tersebut pada konteks stabilitas lereng. Sehingga, memungkinkan praktisi peledakan tambang terbuka dapat menentukan analisis yang mendekati dengan kondisi lapangan.

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui nilai faktor keamanan lereng Quarry A melalui analisis pseudostatik, statistik pseudostatik dan *Newmark* serta *displacement* lereng melalui analisis pseudostatik, *displacement Newmark* dan dinamik numerik akibat pengaruh getaran peledakan aktual. Ambang batas nilai faktor keamanan (FK) mengacu pada Kepmen ESDM No. 1827K/30/MEM/2018 dengan FK dinamik minimum sebesar 1,1 dan ambang batas *displacement* mengacu pada klasifikasi tingkat kerusakan lereng akibat getaran peledakan oleh Legg & Slosson Tahun 1984 dengan batas  $0,5 \text{ cm} < D < 5 \text{ cm}$ .

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di PT Indo cement Tunggal Prakarsa di Desa Palimanah Barat, Kecamatan Gempol, Kabupaten Cirebon, Jawa Barat. Metode penelitian ini dibagi menjadi dua tahapan yaitu akuisisi data dan pengolahan data.

### Akuisisi Data

Berikut ini merupakan data-data yang diakuisisi dalam penelitian.

#### 1. Data Karakteristik Material

Lereng Quarry A tersusun atas lima lapisan litologi batuan dengan penyusun utama berupa *limestone*. Parameter kekuatan batuan dalam pemodelan ini menggunakan kriteria Mohr Coulomb. Analisis pemodelan menggunakan karakteristik batuan dengan perilaku elastoplastik sempurna. Data karakteristik material di Quarry A yang digunakan pada pemodelan numerik dapat dilihat pada Tabel 1.

#### 2. Data Pemantauan Getaran

Pemantauan getaran dilakukan menggunakan alat Minimate Plus, data diambil sebanyak 12 kali kegiatan peledakan di Quarry dengan lokasi peledakan pada level 80 mdpl–65 mdpl pada Gambar

1. Data peledakan ini, diasumsikan dapat mewakili kondisi aktual peledakan, karena range data jarak (R) yang tidak besar yaitu  $\pm 100$  m, data diambil pada beberapa titik pemantauan yang berjarak kurang

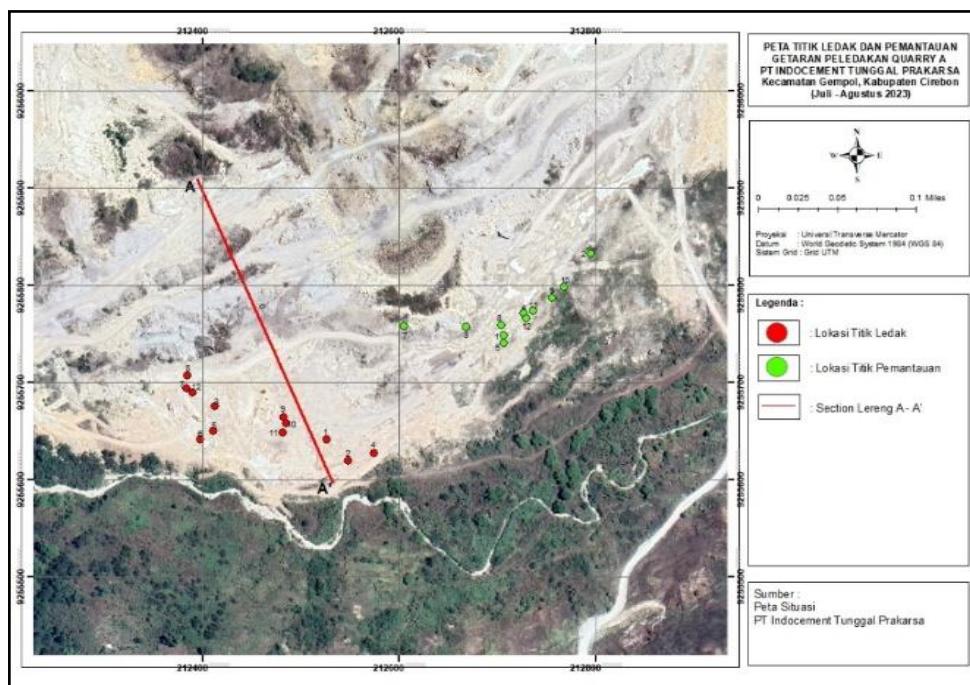
lebih sejauh 200 m sampai dengan 348 m dari titik peledakan. Data pemantauan getaran peledakan ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 1.** Karakteristik Material Pemodelan Lereng

Litologi	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	$\phi$ (°)	E (MPa)	v
High Grade Limestone	24,12	200	24	11.177,47	0,223
Alternating Limestone - clay, limestone rich	21,57	150	26	8.000	0,25
Marly Limestone	21,57	100	20	10.000	0,3
Alternating Limestone - clay, claystone rich	20,59	125	22	7.000	0,3
Claystone	18,63	100	20	5.000	0,3

**Tabel 2.** Data Pemantauan Getaran Peledakan

No	Waktu Peledakan	Jarak - R (m)	Qmax (kg)	Scaled Distance (m/kg <sup>0,5</sup> )	PPV (mm/s)			PVS (mm/s)	PPA (g)		
					Tran	Vert	Long		Tran	Vert	Long
1	14 Juli 2023	210	7,81	75,13	1,143	0,778	1,222	1,465	0,0248	0,0166	0,0381
2	17 Juli 2023	326	20,70	71,65	0,635	0,556	0,444	0,681	0,0084	0,0099	0,0084
3	18 Juli 2023	269	18,75	62,12	0,667	0,46	0,873	0,939	0,0149	0,0099	0,0165
4	20 Juli 2023	210	15,00	54,22	2,254	1,143	2,238	2,529	0,0546	0,0447	0,0381
5	21 Juli 2023	310	20,83	67,92	1,746	0,524	1,318	1,778	0,0248	0,0133	0,0232
6	25 Juli 2023	200	21,09	43,55	1,064	0,73	1,714	1,758	0,0117	0,01	0,0198
7	26 Juli 2023	231	19,79	51,92	0,841	0,73	0,952	1,0609	0,0199	0,0165	0,0431
8	28 Juli 2023	324	19,53	73,31	1,667	0,651	1,587	1,8	0,058	0,025	0,066
9	01 Agustus 2023	300	20,31	66,56	1,254	1,175	2,286	2,4	0,0513	0,0398	0,0927
10	02 Agustus 2023	315	20,31	69,89	0,937	1,349	0,254	1,608	0,0299	0,0348	0,005
11	03 Agustus 2023	284	20,31	63,01	1,508	1,064	2,73	2,758	0,0513	0,0332	0,075
12	04 Agustus 2023	348	20,83	76,24	0,635	0,667	0,127	0,878	0,0149	0,01	0,0067



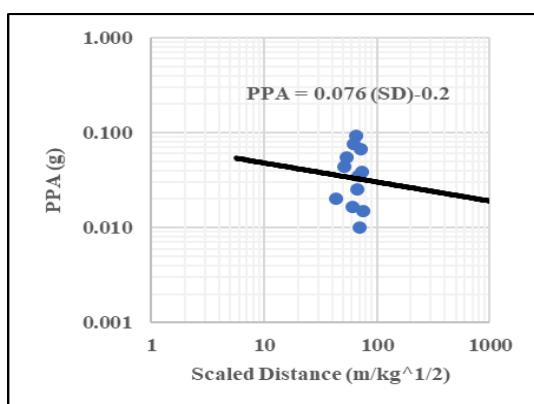
**Gambar 1.** Peta Titik Ledak dan Pemantauan Getaran Quarry A

## Pengolahan Data

Berikut ini merupakan tahapan pengolahan data yang dilakukan:

- Hubungan *Scaled Distance* dengan *Peak Particle Acceleration*

Dari data rekaman getaran peledakan sebanyak 12 *event* peledakan, dicari hubungan antara *Scaled Distance* terhadap PPA (*Peak Particle Acceleration*) yang dapat dilihat pada Gambar 2. Korelasi antara SD dan PPA bertujuan untuk memperkirakan nilai percepatan getaran pada jarak asumsi 30 m terhadap penampang lereng Quarry A.



Gambar 2. Regresi Hubungan *Scaled Distance* dan PPA

Didapatkan nilai SD dengan acuan nilai Qmax yang merupakan muatan bahan peledak terbesar dalam 12 hari pemantauan di lapangan yaitu sebesar 21 kg. Sehingga nilai *scaled distance* pada jarak 30 meter sebesar  $6,55 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-0,5}$ .

$$SD = \frac{R}{\sqrt{Q_{max}}} = \frac{30}{\sqrt{21}} = 6,55 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-0,5}$$

Perkiraan nilai percepatan getaran PPA pada jarak 30 m yaitu:

$$PPA = 0,076 (SD)^{-0,2}$$

$$PPA = 0,076 (6,55)^{-0,2}$$

$$PPA = 0,0522 \text{ g}$$

Selain itu juga dilakukan *upsampling* gelombang percepatan getaran peledakan untuk jarak 30 m dengan data acuan *event* peledakan pada tanggal 21 Juli 2023.

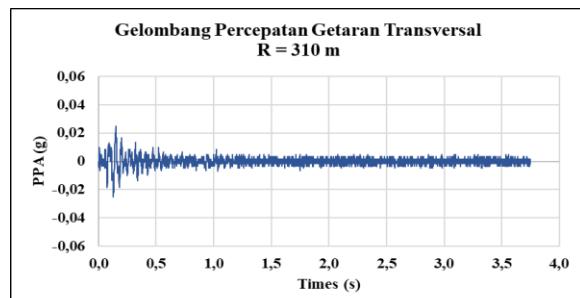
$$PPA (\text{pada jarak } 30 \text{ m}) = 0,0522 \text{ g}$$

$$PPA (\text{pengukuran pada jarak } 310 \text{ m}) = 0,025 \text{ g}$$

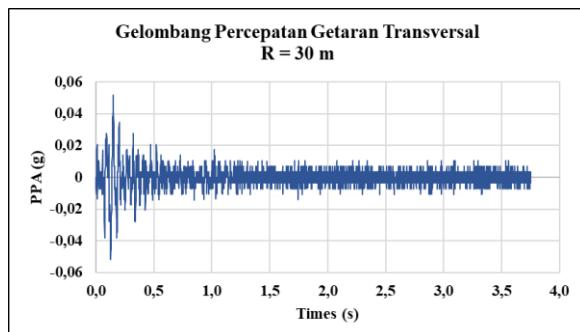
$$\text{Rasio PPA} = 2,088$$

Besaran rasio 2,088 merupakan konstanta yang dikalikan ke dalam data gelombang percepatan getaran transversal pada jarak 310 m yang

ditunjukkan pada Gambar 3 sehingga dihasilkan data gelombang percepatan di jarak 30 m seperti pada Gambar 4.



Gambar 3. Visualisasi PPA Transversal pada 310 m



Gambar 4. Visualisasi PPA Transversal pada 30 m

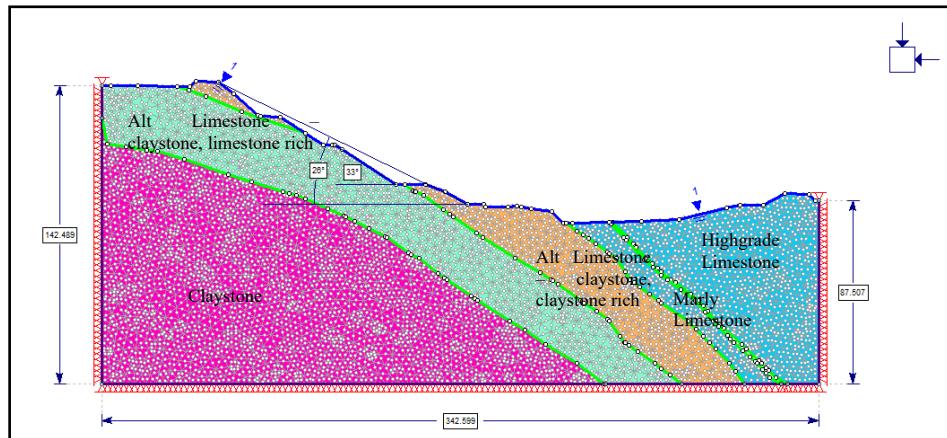
Tujuan dari *upsampling* gelombang ini yaitu sebagai parameter input dalam analisis dinamik numerik lereng, sedangkan dalam analisis *displacement* Newmark lereng dipengaruhi percepatan getaran maksimum yang konstan yaitu sebesar 0,052 g selama durasi peledakan 3,75 s dan getaran tidak berfluktuasi terhadap waktu peledakan.

- Perhitungan Statistika *Peak Particle Acceleration*

Dari hasil perhitungan statistika 12 data percepatan getaran peledakan untuk jarak 30 m dengan muatan bahan peledak yang digunakan pada setiap *event* peledakan didapatkan nilai rata-rata percepatan getaran di jarak 30 m sebesar 0,0515 dengan data terdistribusi secara normal. Standar deviasi percepatan yaitu 0,0014, *relative minimum* sebesar 0,0042 dan *relative maximum* sebesar 0,0007.

- Geometri Pemodelan Lereng Quarry A

Pemodelan geometri lereng Quarry A terdiri atas empat jenjang dengan lereng keseluruhan (*overall slope*) memiliki sudut  $26^\circ$ , dengan tinggi jenjang (*single slope*)  $\pm 9-18$  m dengan kemiringan *single slope* sebesar  $30^\circ$  (Gambar 5). Metode analisis kestabilan lereng yang digunakan yaitu metode *Bishop Circular* dengan *limit equilibrium* dan metode *strength reduction factor* dengan *finite element*.



Gambar 5. Geometri Pemodelan Lereng Quarry A

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Quarry A, kegiatan peledakan dilakukan pada setiap hari kerja untuk memenuhi target produksi limestone. Dengan dilakukannya kegiatan peledakan setiap hari di lokasi Quarry A ini, maka dalam perhitungan kestabilan lereng perlu menganalisis pengaruh PPA. Selain itu lereng berada dalam kondisi aktual kering yang direpresentasikan melalui nilai Hu coefficient dengan nilai  $Hu = 0$ .

Penilaian kestabilan lereng Quarry A diindikasikan melalui nilai faktor keamanan dan displacement lereng di bawah pengaruh pembebahan peledakan serta faktor muka air tanah. Assessmen kestabilan lereng dikategorikan menjadi tiga metode, yaitu:

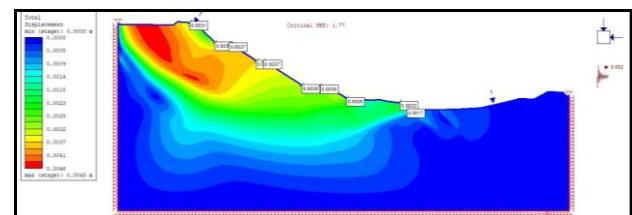
- Analisis pseudostatik, lereng dibebani dengan percepatan getaran (PPA) maksimum konstan dengan jarak asumsi titik ledak sejauh 30 m dari penampang lereng. Sedangkan, analisis statistik pseudostatik, lereng dibebani dengan PPA dari data dua belas event peledakan yang distatistikkan pada jarak asumsi 30 m.
- Analisis displacement Newmark, lereng diberikan pembebahan peledakan berupa data PPA transversal actual yang telah diupscaling pada jarak 30 m terhadap waktu durasi peledakan dan menggunakan strength reduction factor dalam penentuan permanent displacement lereng.
- Analisis dinamik numerik, lereng dibebani dengan data PPA transversal pada jarak 30 m terhadap durasi peledakan, dengan mempertimbangkan beberapa kondisi dinamik pada lereng.

### Faktor Keamanan dan Displacement Lereng Quarry A Melalui Analisis Pseudostatik dan Statistik Pseudostatik

Secara praktis, analisis pseudostatik ini digunakan dalam penilaian awal (*initial assessment*) dalam kestabilan lereng dikarenakan metode ini kurang akurat dalam

merepresentasikan kondisi getaran aktual yang mempengaruhi kestabilan, dari hasil *monitoring* getaran, gelombang getaran peledakan berfluktuasi terhadap waktu selama *event* peledakan terjadi.

Dalam analisis kestabilan, PPA maksimum konstan yang membebani lereng sebesar 0,052 g pada arah horizontal. *Displacement pseudostatik* pada lereng dihasilkan melalui pembebahan material lereng itu sendiri, pembebahan peledakan serta pengaruh *strength reduction factor*. Dalam analisis keamanan lereng pseudostatik menghasilkan nilai critical SRF dan pada saat kondisi ini *total displacement* lereng akan ditentukan. *Total displacement* yang terjadi pada lereng pseudostatik yaitu bernilai 0,17 cm hingga 0,45 cm, dengan *maximum total displacement* terjadi pada bagian *upper bench* dari lereng keseluruhan dan arah displacement mengarah ke muka lereng seperti pada Gambar 6.

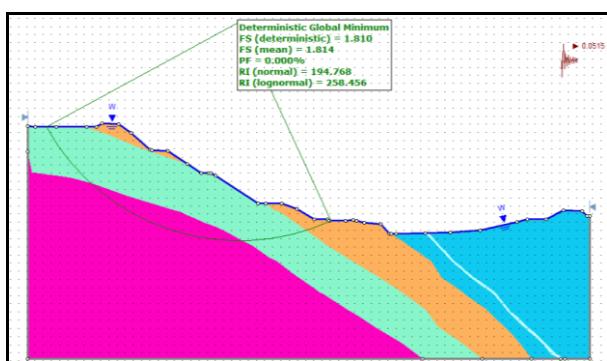


Gambar 6. Lereng Pseudostatik Kondisi Kering ( $Hu = 0$ )

Pada analisis statistik pseudostatik, lereng Quarry A pada Gambar 7 diberi pembebahan peledakan berupa nilai PPA yang distatistikkan dari dua belas event peledakan. Perkiraan nilai PPA dari setiap *event* peledakan tersebut dihasilkan dengan asumsi jarak 30 m serta masing-masing besaran muatan bahan peledak yang digunakan pada setiap *event* menggunakan rumus empirik hasil regresi sebelumnya yaitu  $PPA = 0,076$

(SD)<sup>-0,2</sup>. Dari hasil perhitungan statistika sederhana didapatkan nilai rata-rata percepatan getaran di jarak 30 m sebesar 0,0515 dengan data terdistribusi secara normal. Standar deviasi percepatan yaitu 0,0014, *relative minimum* sebesar 0,0042 dan *relative maximum* sebesar 0,0007.

Berdasarkan nilai faktor keamanan lereng *Quarry A* pada Tabel 3. menunjukkan lereng dinamik dalam kondisi kering (tanpa pengaruh air) memiliki nilai faktor keamanan yang aman (stabil) merujuk pada ketentuan Kepmen 1827K/30/MEM/2018 dengan nilai FK minimum dinamik di atas 1,1.



Gambar 7. Lereng Statistika Pseudostatik Kondisi Kering

Tabel 3. Nilai Faktor Keamanan dan *Displacement* Lereng *Quarry A* melalui Pseudostatik dan Statik Pseudostatik

Parameter	$H_u = 0$	
	Slide2	RS2
FK Statik	2,062	2,02
FK Pseudostatik	1,813	1,77
FK Statistik Pseudostatik	1,814	-

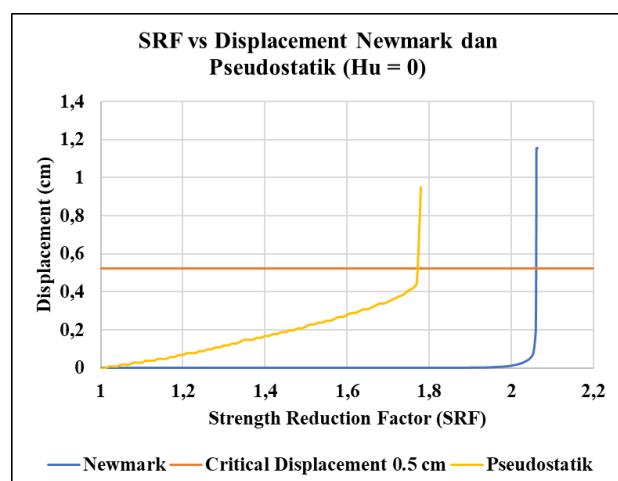
#### *Displacement* Lereng *Quarry A* melalui Analisis *Displacement Newmark*

Pada analisis *displacement* Newmark, lereng diberikan pembebanan peledakan berupa data getaran gelombang PPA transversal selama durasi peledakan 3,75 s, percepatan getaran berfluktuasi terhadap waktu. Secara konseptual, *displacement* Newmark telah mewakili kondisi getaran aktual yang mempengaruhi lereng, walaupun belum mempertimbangkan beberapa kondisi dinamik lainnya. Analisis ini ditujukan sebagai metode yang menjembatani gap antara metode pseudostatik dan dinamik numerik. Pada analisis ini, *permanent displacement* dapat terjadi ketika percepatan *critical* lereng terlampaui oleh percepatan batuan akibat getaran peledakan. *Permanent displacement* dihasilkan melalui prinsip *strength reduction factor* yaitu penurunan nilai

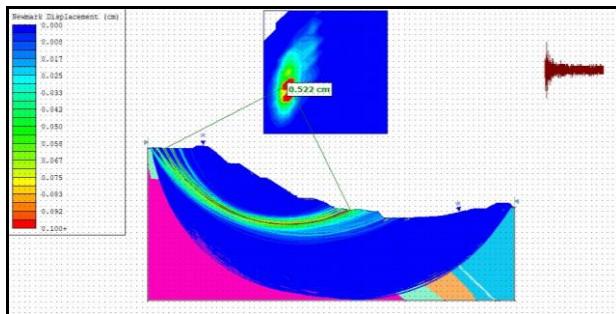
kuat geser massa batuan hingga *displacement* yang dihasilkan pada lereng mencapai kriteria keruntuhan yang telah ditetapkan.

Dalam analisis lereng *displacement Newmark* dilihat pada Gambar 9, kriteria keruntuhan yang ditetapkan yaitu bernilai 0,5 cm, dengan lereng berada dalam kondisi terjadinya retakan kecil yang terbentuk di sepanjang permukaan bidang gelincir menurut Legg & Slosson, 1984. Pada titik *displacement* sebesar 0,5 cm tersebut ditentukan nilai FK critical lereng Newmark dengan prinsip SRF. Untuk mendapatkan critical *displacement* tersebut, dilakukan penurunan nilai kohesi dan sudut gesek dalam dari masing – masing litologi perlapisan sebesar 2,06, sehingga nilai tersebut merupakan titik critical SRF dari lereng.

Berdasarkan Gambar 8, jika dibandingkan antara critical *displacement* Newmark dan pseudostatik pada titik SRF lereng *critical* masing-masing analisis, maka *Newmark* memiliki nilai FK lebih besar dibandingkan FK pseudostatik. Dari hal tersebut, dapat disimpulkan lereng melalui analisis pseudostatik memiliki kecenderungan lebih konservatif akibat pengaruh percepatan getaran maksimum yang dibebani pada lereng. Sama halnya pada *displacement* yang dihasilkan dari kedua metode, *displacement* lereng pseudostatik jauh lebih konservatif seiring dengan penurunan SRF. Ketika melewati batas *critical* SRF, lereng mengalami peningkatan *displacement* yang sangat signifikan. Sementara melalui analisis Newmark seiring dengan peningkatan SRF lereng hanya akan mengalami *displacement* maksimum hingga 1,157 cm.



Gambar 8. Grafik SRF Pseudostatik dan Newmark terhadap *Maximum Total Displacement*



Gambar 9. Lereng Newmark Displacement Kondisi Kering

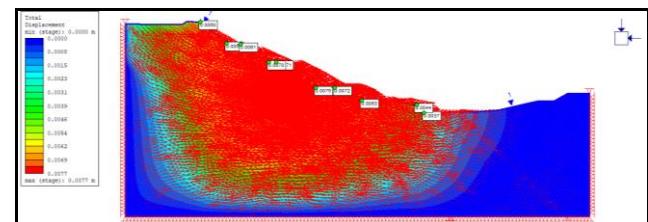
#### Displacement Lereng Quarry A melalui Analisis Dinamik Numerik

Pada analisis lereng dinamik numerik, pembebanan eksternal yang diterapkan pada model lereng Quarry A berupa data percepatan getaran (PPA) selama durasi peledakan sebesar 3,75 s dengan mempertimbangkan beberapa faktor dinamik, yaitu:

- 1) *Damping ratio* dan frekuensi getaran, menurut Biggs, 1964 bahwa material geologi seperti tanah dan batuan memiliki nilai *damping ratio* sekitar 2% - 5%. Sistem dinamik kehilangan energi kinetiknya secara konstan untuk mencapai kondisi statik. *Damping ratio* menentukan jumlah kehilangan energi per satuan waktu. Semakin besar *damping ratio* yang diterapkan pada model maka energi peledakan yang terserap oleh massa batuan semakin besar sehingga sisanya berupa getaran (kecepatan maupun percepatan getaran) semakin kecil. *Damping ratio* yang diterapkan pada pemodelan lereng sebesar 2% dan input frekuensi getaran 7,8 Hz dan 20 Hz.
- 2) Diskritisasi, tipe *mesh* berupa *uniform*, dengan tipe elemen 6 Noded Triangles dan jumlah *mesh* elemens sebanyak 3000.
- 3) Kondisi tegangan, *field stress* yang diberikan pada lereng berupa tegangan *gravity* yaitu *actual ground surface* dan *effective stress ratio*.
- 4) Kondisi *boundary* eksternal, model lereng bagian lateral sisi samping dan *bottom* lereng dipasang *restraint xy* artinya model lereng tidak dapat bergerak bebas secara vertikal maupun horizontal.
- 5) Kondisi *boundary* dinamik, batas dinamik yang dipasang pada model lereng berupa batas *absorb* pada *bottom* lereng dan *transmit* pada sisi lateral lereng.
- 6) Pembebanan Dinamik, kondisi pembebanan tersebut diberikan pada bagian *base* dari model lereng.

Untuk melihat distribusi *displacement* serta PPA yang berpengaruh pada lereng Quarry A dalam kondisi kering seperti pada Gambar 10, diplotkan *time query* di sepanjang permukaan lereng pada bagian *crest* dan *toe* lereng sehingga dihasilkan *time query* sebanyak 10 titik. Titik *query time* dapat menggambarkan besaran PPA terhadap fungsi waktu durasi peledakan yang

mempengaruhi masing-masing titik lereng tersebut serta *displacement* yang terjadi selama durasi peledakan berlangsung.

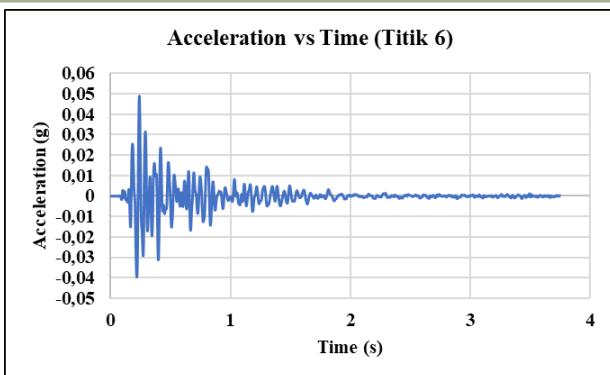


Gambar 10. Arah Total Displacement Lereng Dinamik Numerik Kondisi Kering ( $H_u = 0$ )

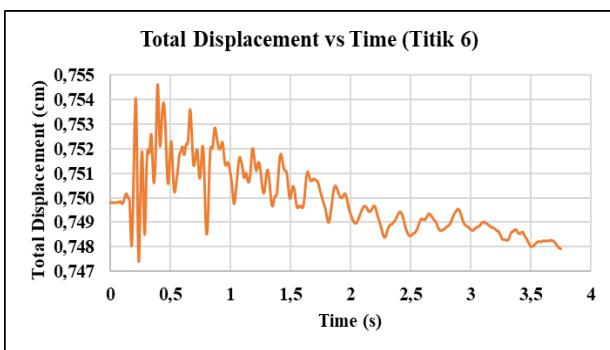
Tabel 4. Nilai Acceleration dan Total Displacement Lereng Quarry A melalui Analisis Dinamik Numerik

Titik	$H_u = 0$	
	Acceleration (g)	Max Total Displacement (cm)
1	0,059	0,508
2	0,049	0,588
3	0,062	0,617
4	0,048	0,710
5	0,043	0,719
6	0,049	0,755
7	0,061	0,727
8	0,046	0,636
9	0,068	0,449
10	0,051	0,381

Diketahui berdasarkan Tabel 4 dan pada Gambar 11, bahwa pada lereng dengan kondisi kering, *maximum total displacement* lereng akibat pengaruh PPA terjadi pada titik lereng 4, 5 dan 6 di bagian *middle bench* dengan besaran nilai yaitu 0,710 cm, 0,719 cm, 0,755 cm. Melalui analisis lereng dinamik numerik ini didapatkan *maximum total displacement* lereng sebesar 0,77 cm yang terjadi di bagian *middle bench* dari lereng keseluruhan dilihat pada Gambar 12. dan arah *displacement* mengarah ke muka lereng. Dan *displacement* terbesar kedua terjadi pada bagian *lower bench*, dan *minimum* di *upper bench* Quarry A. Sehingga dari hasil tersebut disimpulkan di sepanjang permukaan lereng Quarry A berada dalam kategori kerusakan sedang berupa terbentuknya retakan/ rekanan kecil pada lereng berdasarkan kriteria Legg & Slosson, 1984 dimana *displacement* lereng dalam rentang  $0,5 \text{ cm} < D < 5 \text{ cm}$ .



Gambar 11. Grafik Acceleration di Titik 6



Gambar 12. Grafik Total Displacement di Titik 6

Jika dibandingkan dengan *displacement* yang dihasilkan melalui analisis pseudostatik dan Newmark, metode dinamik numerik menghasilkan *displacement* lebih besar dibandingkan keduanya. Hal ini terjadi karena metode dinamik numerik menyesuaikan dan mempertimbangkan kondisi dinamik dari lereng, seperti kondisi batas dinamik yaitu dengan memperhatikan bagian atau batasan yang dijadikan sebagai batas domain lereng untuk menyerap gelombang getaran masuk dan batas untuk mentransmisikan getaran tersebut sehingga seluruh domain lereng berada di bawah pengaruh getaran peledakan. Selain itu juga metode ini memperhatikan *damping ratio* suatu lereng sebagai suatu nilai kehilangan energi kinetik dari percepatan getaran per satuan waktu yang diterapkan pada lereng dan mempertimbangkan frekuensi input minimum dan maksimum getaran.

Dari ketiga metode analisis lereng di bawah pengaruh pembebanan peledakan ini memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Ketiga metode dapat digunakan sesuai dengan data yang tersedia dan kebutuhan dari pengguna metode tersebut. Pendekatan pseudostatik dapat digunakan sebagai metode penilaian awal dari suatu analisis dengan output nilai berupa FK serta *displacement* lereng. Namun, pendekatan ini mengambil suatu pilihan analisis bahwa lereng berada

dalam keadaan *worst condition* dan tidak mempertimbangkan data getaran aktual di lapangan. Sementara, pendekatan Newmark mempertimbangkan penggunaan data percepatan getaran yang aktual dalam pembebanan suatu lereng namun tidak dipengaruhi oleh karakteristik lainnya dari kondisi dinamik suatu getaran. Serta metode ini juga bersifat *manually calculated* dalam penentuan SRF untuk mendapatkan suatu *critical displacement* lereng.

Terakhir, metode dinamik numerik dengan metode FEM menghasilkan output hanya berupa nilai *displacement* lereng tanpa ada pengaruh dari SRF. Pendekatan ini mempertimbangkan keseluruhan karakteristik dari batasan dinamik yang diterapkan pada suatu lereng. Sehingga, perhitungan yang dihasilkan akan lebih akurat mendekati keadaan aktual di lapangan. Kekurangan dari metode ini adalah tidak dapat mengeluarkan nilai FK *critical* dan dalam proses komputasinya membutuhkan waktu yang lebih lama dari kedua metode sebelumnya

## KESIMPULAN

Faktor keamanan pada lereng *Quarry A* melalui analisis pseudostatik, statistik pseudostatik dan Newmark berada dalam kondisi aman atau stabil berdasarkan Kepmen 1827K/30/MEM/2018 dengan FK dinamik  $>1$ . *Displacement* pada lereng *Quarry A* melalui analisis pseudostatik, *displacement* Newmark dan dinamik numerik berada dalam kondisi tingkat kerusakan sedang, yaitu terbentuknya rekahan atau retakan kecil akibat getaran peledakan berdasarkan kriteria Legg & Slosson tahun 1984. Analisis kestabilan lereng menggunakan metode pseudostatik menghasilkan nilai *maximum total displacement* sebesar 0,45 cm pada SRF critical 1,77, *displacement* Newmark menghasilkan nilai yaitu 0,52 cm pada SRF critical 2,06 pada kondisi lereng kering. Sedangkan *maximum total displacement* melalui analisis dinamik numerik yaitu sebesar 0,77 cm.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arif, Irwandy. (2016). Geoteknik Tambang. Gramedia Pustaka Utama.
- [2] Hazegh, Noferesti. (2018). Comparison of Pseudostatic, Newmark and Dynamic Response Analysis of Final Pit Wall on The Sungun Copper Mine. *International Journal of Mining and Geo Engineering*, 142-146.
- [3] Toh et al. (2013). Earthquake Stability Assessment for Open Pit Mine Slopes. *Australian Centre for Geomechanics, Perth*, 1188-1193.
- [4] Yinbin, Zhang. (2015). Stability and Run-Out Analysis of Earthquake-Induced Landslide. *Department of Geotechnical Engineering, Southwest Jiaotong University*, 204-208.
- [5] Beyene, Yared. (2017). Comparison of Finite Element and Limit Equilibrium Methods for



Slope Stability Analysis. Addis Ababa Science and Technology University.

- [6] Rabie, M. (2013). Comparison Study Between Traditional and Finite Element Methods for Slopes Under Heavy Rainfall. *HBRC Journal*, 161-166.
- [7] Bazzi, Noferesti. (2020). Modelling The Effect of Blast Induced Vibrations on The Stability of Faulted Mine Slope. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 120(10), 592-594.
- [8] Badanagki, M., Li, F., Armstrong, C. (2023). Comparison Between Newmark Time History Analysis and Finite Element Method for Estimating Seismically Induced Slope Displacement. Atlantis Press, 172-177.
- [9] Ganjeh, S., dkk. (2019). A Comparison Between Effects of Earthquake and Blasting on Stability of Mine Slopes: Case Study of Chadormalu Open Pit Mine. *Journal of Mining and Environment*. 10(1), 235-237.
- [10] Prassetyo, H.S., Simangunsong, M.G., Sadikin, A. (2020). Dynamic Stability of Mine Slopes due to Bench Blasting. *ISRM*, ISBN 978-0-36742284-4, 3508-3512.