

# Evaluasi *Flyrock* untuk Jarak Aman Alat Menggunakan Metode Empiris

Tito Abadi Nugraha Sugiarto\*, Riam Marlina A., Tri Gamela Saldy, Jukepsa Andas

Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

\* [titoabadinugrahasugiarto@gmail.com](mailto:titoabadinugrahasugiarto@gmail.com)

**Abstrak.** Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi jarak aman *flyrok* maksimum 35 m serta menganalisis prediksi jarak lemparan *flyrock* dan mengidentifikasi parameter peledakan paling berpengaruh terhadap keselamatan alat Kleemann Mobiscreen MSS 802 Evo di Quarry Bukit Tapuan. Metode penelitian adalah penelitian terapan dengan pendekatan empiris, menggunakan model analisis dimensi yang dikembangkan oleh Ebrahim Ghasemi serta rumus empiris Richard and Moore. Data yang dibutuhkan meliputi parameter geometri peledakan aktual, yaitu *burden*, *spacing*, *stemming*, kedalaman lubang ledak, diameter lubang ledak, *powder factor*, dan panjang rata-rata kolom bahan peledak, serta jarak lemparan *flyrock* yang diukur menggunakan *drone*. Persamaan empiris dilakukan untuk menentukan konstanta spesifik lokasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *stemming* memiliki pengaruh yang kuat terhadap jarak lemparan *flyrock*, dengan nilai koefisien determinasi ( $R^2 = 81,23\%$ ) pada model empiris. Peledakan ujicoba yang dilakukan sebanyak 6 kali dengan pengawasan ketat pada *stemming* menghasilkan jarak lemparan aktual maksimum menjadi 35 meter, sehingga tujuan keselamatan yang diinginkan dapat tercapai.

**Kata kunci:** metode empiris, *flyrock*, *stemming*, peledakan, kuari

**Abstract.** This study examines the prediction of *flyrock* throw distance and identifies the most influential blasting parameters to ensure the operational safety of the Kleemann Mobiscreen MSS 802 Evo at the Bukit Tapuan Quarry. The objective is to reduce the maximum safe distance from 64 m to 35 m. An empirical approach was employed by combining actual blasting geometry parameters—*burden*, *spacing*, *stemming*, *blast hole depth*, *blast hole diameter*, *powder factor*, and *average explosive column length*—as independent variables, with *flyrock* throw distance, measured using *drones*, as the dependent variable. Empirical analysis using the dimensional analysis model of Ebrahim Ghasemi and the Richard and Moore formula yielded site-specific constants, revealing that *stemming* had the most significant influence on *flyrock* throw distance ( $R^2 = 81.28\%$ ). To achieve the target safe distance of 35 m, six controlled blasting trials with strict *stemming* supervision were conducted, resulting in a maximum actual throw distance of exactly 35 m. These findings provide a scientific basis for optimizing blasting operations in high-risk areas, emphasizing the accuracy of *flyrock* distance predictions through empirical modeling and site-specific constants.

**Keywords:** empirical method, *flyrock*, *stemming*, blasting, quarry

Tanggal Diterima: 15/08/2025; Tanggal Direvisi: 23/09/2025; Tanggal Disetujui: 01/12/2025; Tanggal Dipublikasi: 10/12/2025

## 1. Pendahuluan

Peledakan termasuk aspek penting yang sangat memengaruhi keberhasilan proses *produksi*, khususnya pada aktivitas penambangan yang menggunakan metode tambang terbuka (*quarry*). Jika penerapan geometri dan pencampuran *explosives* tidak dilakukan dengan tepat, maka bisa menimbulkan berbagai masalah, seperti terganggunya kelancaran produksi, terjadinya *flyrock*, munculnya asap (*fumes*), hasil fragmentasi batuan yang kurang baik, pemborosan biaya, hingga target produksi perusahaan yang tidak tercapai.[1] PT Bukit Asam, Tbk adalah salah satu Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang bergerak di sektor pertambangan batubara dan berlokasi di Kabupaten Muara Enim, Provinsi Sumatera Selatan. Kegiatan penambangan dilakukan dengan sistem tambang terbuka menggunakan metode *open pit mining*. Selain menambang batubara, PT Bukit Asam, Tbk juga memproduksi komoditas mineral lainnya, seperti batu andesit. Penambangan batu andesit ini dilakukan sebagai bagian dari upaya kegiatan pengelolaan lingkungan di PT Bukit Asam

Tbk. Pada aktivitas penambangannya, PT Bukit Asam, Tbk melaksanakan pembongkaran batu andesit dengan kegiatan peledakan. Salah satu parameter keberhasilan kegiatan peledakan adalah ditunjukkan oleh *flyrock*. Dimana *flyrock* yang ada berpengaruh terhadap infrastruktur yang ada di lokasi peledakan serta ukuran fragmentasi yang dihasilkan berpengaruh terhadap proses *loading* dan *crushing*.[2] Departemen *Drill & Blast* secara konsisten melakukan optimisasi guna menekan biaya kapital maupun operasional. Salah satu optimisasi yang pada wilayah Tambang Air Laya adalah dengan menurunkan radius aman peledakan dari 64 m menjadi 35 m dengan alat Kleemann *Mobiscreen* MSS 802 Evo sebagai acuan. Berdasarkan KEPMEN 1827K/30/MEM/2018 halaman 79, disebutkan bahwa jarak aman untuk unit adalah 300 meter dan untuk manusia adalah 500 meter dari batas terluar area peledakan. Namun, peraturan tersebut juga menyatakan bahwa jarak aman tersebut dapat disesuaikan apabila telah dilakukan kajian teknis. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan dalam menentukan jarak

aman peledakan adalah melalui analisis terhadap jarak lemparan *flyrock* yang dihasilkan dari aktivitas peledakan.[3] PT Bukit Asam, Tbk memiliki target hasil peledakan yaitu jarak lemparan *flyrock* maksimal 35 meter. Namun dari kondisi aktual peledakan yang telah dilakukan saat ini, didapatkan hasil yang belum sesuai dengan target maksimal *flyrock*. Hasil pengamatan sebanyak 5 kali kegiatan peledakan di *Quarry* yaitu jarak lemparan *flyrock* dengan rata-rata 64 m. Berdasarkan data yang didapat menunjukkan bahwa jarak *flyrock* perlu dilakukan peninjauan kembali agar dapat diketahui faktor yang menyebabkan serta optimalisasi kembali untuk mencapai target aman alat menjadi 35 m. Oleh karena itu, perlu adanya suatu permodelan prediksi lemparan *flyrock* yang mendekati lemparan aktual di lapangan terhadap hasil peledakan. Untuk memperkirakan jarak lemparan *flyrock* yang terjadi di lapangan, digunakan dua metode, yaitu metode empiris dari Richard & Moore dan metode analisis dimensi dari Ebrahim Ghasemi. Sementara itu, untuk mengoptimalkan geometri peledakan, dilakukan analisis statistik terhadap data *flyrock* guna mengetahui faktor mana yang paling berpengaruh. Faktor yang paling berpengaruh tersebut kemudian dievaluasi menggunakan konsep *scaled depth of burial* untuk menilai desain geometri yang digunakan sudah tepat dalam mengendalikan *flyrock* dan menghasilkan peledakan yang efektif. Dengan begitu, perencanaan peledakan berikutnya bisa dilakukan dengan lebih baik, sehingga radius aman peledakan bisa dikurangi tanpa mengurangi aspek keselamatan.

## 2. Tinjauan Pustaka

### 2.1 Peledakan

Peledakan adalah proses pemecahan material batuan dengan memanfaatkan bahan peledak. Tahapan ini diawali dengan pengeboran lubang pada massa batuan, yang kemudian diisi bahan peledak. Kegiatan peledakan diawali dengan kegiatan pengeboran yang dilakukan untuk membuat lubang ledak pada suatu massa batuan tertentu dan kemudian diisi oleh bahan peledak dan kemudian diledakkan. Pada pembongkaran batuan dengan metode peledakan, ukuran material hasil peledakan dantingkat kemudahan material tersebut dimuat menjadi salah satu tolok ukur keberhasilan kegiatan peledakan suatu operasi peledakan.[4]

### 2.2 *Flyrock*

*Flyrock* merupakan fragmen batuan yang terlempar akibat hasil peledakan. Jika lontaran batuan ini melebihi radius aman, dapat menimbulkan kerusakan pada alat berat serta membahayakan keselamatan manusia, bahkan berisiko menyebabkan cedera serius hingga kematian. Keberadaan *flyrock* memaksa alat berat

untuk dipindahkan cukup jauh dari area peledakan, dan proses pemindahan tersebut memerlukan waktu yang tidak sedikit. Kondisi ini berdampak negatif terhadap aktivitas penambangan karena menyebabkan terjadinya loss time atau hilangnya waktu produksi akibat keterlambatan dalam pengoperasian alat. Selain itu, *flyrock* sangat membahayakan bagi para pekerja dan juru ledak yang dekat dengan lokasi peledakan.[5]

#### 2.2.1 Faktor yang Memengaruhi *Flyrock*

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi *flyrock* sebagai salah satu bahaya operasi peledakan diantaranya, ketidaksesuaian *burden* dan spasi, kelebihan bahan peledak, kemiringan lubang, kondisi lubang basah, ketidaksesuaian *stemming* dan penggunaan waktu *delay* [6].

#### 2.2.2 Perhitungan *Flyrock*

Perhitungan *flyrock* akibat peledakan di lokasi penelitian meliputi, sebagai berikut: Perhitungan Jarak Pengukuran koordinat lemparan *flyrock* aktual di lokasi peledakan diukur dengan menggunakan aplikasi *video tracker* melalui video peledakan yang diambil menggunakan *drone*.

#### 2.2.3 Teori Richard and Moore

Tiga parameter utama yang mempengaruhi terjadinya *flyrock* dalam kegiatan peledakan, yaitu:

*Face Burst*, terjadi karena *burden face* terlalu pendek sehingga dapat mengakibatkan *flyrock*. Adapun persamaan yang digunakan adalah:

$$L = \frac{k^2}{g} \left( \frac{\sqrt{m}}{B} \right)^{2,6}$$

#### Keterangan.

- L : Lemparan maksimal (m)
- k : Konstanta
- g : Percepatan gravitasi (9,8 m/s<sup>2</sup>)
- m : Berat isian bahan peledak per meter (kg/m)
- B : *Burden* awal (m)

*Cratering*, terjadi saat tinggi *stemming* yang terlalu pendek serta terdapatnya bidang lemah pada lubang ledak. Adapun persamaan yang digunakan adalah:

$$L = \frac{k^2}{g} \left( \frac{\sqrt{m}}{SH} \right)^{2,6}$$

#### Keterangan.

- SH : Tinggi *stemming* (m)

*Riffling*, terjadi saat material *stemming* yang tidak sesuai yang diikuti ledakan yang tinggi. Adapun rumus yang digunakan sebagai berikut:

$$L = \frac{k^2}{g} \left( \frac{\sqrt{m}}{SH} \right)^{2,6} \sin 2 (\theta)$$

**Keterangan.**

SH : Tinggi *stemming* (m)  
 $\theta$  : Kemiringan lubang ledak

**2.2.4 Metode Analisis Dimensi Ebrahim Ghasemi**

Persamaan untuk memprediksi lemparan maksimum *flyrock* yang dikembangkan oleh Ebrahim Ghasemi dengan menggunakan analisis dimensi dari parameter peledakan yang dapat dikontrol yaitu *burden* (B), *spacing* (S), *stemming* (St), *hole depth* (H), diameter lubang ledak (D), isian bahan peledak per lubang (Q), dan *powder factor* (PF). Dari analisis dimensi parameter peledakan tersebut Ebrahim Ghasemi menghubungkannya menjadi persamaan nonlinear. Persamaan *non-linear* ini yang akan digunakan untuk menentukan persamaan empiris yang paling tepat untuk memprediksi lemparan maksimum *flyrock*.[7] Analisis yang digunakan dalam persamaan untuk memprediksi jarak *flyrock* menggunakan analisis dimensi. *Flyrock* diasumsikan dari parameter peledakan yang dapat dikontrol sebagai berikut:

$$Fd \left( \frac{Pf}{Q} \right)^{\frac{1}{3}} = a + b \ln \left[ B \left( \frac{Pf}{Q} \right)^{\frac{1}{3}} \right] + c \ln \left[ S \left( \frac{Pf}{Q} \right)^{\frac{1}{3}} \right] + d \ln \left[ T \left( \frac{Pf}{Q} \right)^{\frac{1}{3}} \right] + e \ln \left[ H \left( \frac{Pf}{Q} \right)^{\frac{1}{3}} \right] + f \ln \left[ D \left( \frac{Pf}{Q} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

Sehingga, rumus empirik yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Fd = a \left[ B^b \cdot S^c \cdot T^d \cdot H^e \cdot D^f \cdot \left( \frac{P}{F} \right)^x \right]$$

**Dimana:**

Fd : *Flyrock distance* (m)  
B : *Burden* (m)  
S : *Spacing* (m)  
T : *Stemming* (m)  
H : *Hole depth* (m)  
D : Diameter lubang ledak (m)  
PF : *Powder factor* ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
Q : Isian bahan peledak per lubang (kg)  
Ln : Logaritma natural  
a : Konstanta b,c,d,e,f,  
x : Koefisien dari persamaan nonlinear

$$x = \frac{[(b + c + d + e + f) + 1]}{3}$$

**2.3 Teori Scaled Depth of Burial**

Teori *Scale Depth of Burial (SDOB)* dalam geometri peledakan berkaitan dengan kedalaman pengembunan bahan peledak (*burial depth*) dalam hubungannya dengan efektivitas peledakan dan kontrol fragmentasi batuan.[8] Konsep ini sering digunakan dalam peledakan terbuka maupun bawah tanah untuk mengoptimalkan hasil peledakan dengan mengontrol pelepasan energi dan perpindahan massa batuan. Energi pengurungan dalam peledakan dapat diukur secara empiris

menggunakan parameter yang dikenal sebagai *scaled depth of burial (SDOB)*, yaitu perbandingan panjang material *stemming* dengan jumlah bahan peledak dalam volume yang setara dengan sepuluh kali diameter lubang ledak. Adapun nilai dapat dinyatakan melalui rumus sebagai berikut:

$$SD = \frac{D}{W^{\frac{1}{3}}}$$

**Keterangan.**

SD : *Scaled Depth of Burial*  
D : Jarak dari pusat pengaruh ledakan dari permukaan  
W : Muatan bahan peledak

**Tabel 1. Scaled Depth of Burial**

Skala	Hasil
0 – 0,6	Energi tidak terkontrol, <i>flyrock</i> tidak terkendali, <i>airblast</i> bising, banyak debu, fragmentasi sangat halus, membentuk kawah yang baik dan tidak ada sisa <i>fallback</i> pada kawah
0,64 – 0,88	Energi tidak terkontrol, <i>flyrock</i> merusak, <i>airblast</i> bising, banyak debu, fragmentasi moderat, membentuk kawah yang baik, dan ada sisa <i>fallback</i> pada kawah
0,92 – 1,40	Energi terkontrol, fragmentasi baik, volume yang terbongkar besar, <i>vibration</i> , <i>airblast</i> dan <i>flyrock</i> masih dapat diterima
1,44 – 1,80	Energi sangat terkontrol, fragmentasi buruk, dan <i>flyrock</i> sangat pendek
1,84 – 2,40	Sedikit permukaan yang terberai
2,4 >	Permukaan tidak terberai

**2.4 Analisis Regresi**

Regresi *linear* merupakan metode yang digunakan untuk memperkirakan apa yang kemungkinan besar akan terjadi di masa depan, dengan menggunakan data yang tersedia dari masa lalu dan saat ini, sehingga kesalahan prediksi dapat diminimalkan. Secara umum, regresi juga dapat diartikan sebagai upaya untuk memodelkan dan memperkecil kesalahan dalam hubungan antara variabel. Jika model hanya melibatkan satu variabel bebas, maka disebut regresi *linear* sederhana. Namun, jika terdapat lebih dari satu variabel bebas, maka disebut regresi *linear* berganda.[9]

**2.5 Koefisien Korelasi**

Dua variabel dikatakan berkorelasi apabila perubahan dalam satu variabel diikuti oleh perubahan variabel lain, baik yang searah maupun tidak. Hubungan antara variabel dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu korelasi positif, korelasi negatif, dan korelasi nihil. Masing-masing dari korelasi ini memiliki makna yang berbeda. Koefisien korelasi (r) merupakan indikator statistik yang digunakan untuk menentukan tingkat kekuatan dan arah hubungan antara dua variabel. Nilai koefisien korelasi r berkisar antara -1 dan 1 atau ( $-1 \leq r \leq 1$ ). Jika dua variabel berkorelasi

negative sehingga nilai koefisien korelasinya akan mendekati -1, jika dua variabel tidak berkorelasi maka nilai koefisien korelasinya akan mendekati 0, sedangkan jika dua variabel berkorelasi positif maka nilai koefisien korelasinya akan mendekati satu [10].

**Tabel 2.** Koefisien Korelasi

Interval Koefisien	Tingkat Hubungan
0,000 – 0,199	Sangat Rendah
0,200 – 0,399	Rendah
0,400 – 0,599	Sedang
0,600 – 0,799	Kuat
0,800 – 1,000	Sangat Kuat

## 2.6 Koefisien Determinasi

Koefisien determinasi ( $R^2$ ) adalah hasil pengkuadratan dari koefisien korelasi (R) yang menggambarkan seberapa besar total variasi pada variabel terikat (Y) dapat dijelaskan oleh variabel bebas (X) melalui model regresi. Koefisien determinasi digunakan untuk mengetahui persentase besarnya pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen.[11] Apabila koefisien korelasi dikuadratkan akan menjadi koefisien penentu (KP) atau koefisien determinasi yang artinya penyebab perubahan pada variabel Y yang datang dari variabel X yaitu sebesar kuadrat koefisien korelasinya.[12] Koefisien penentu ini menjelaskan besarnya pengaruh atau kontribusi nilai suatu variabel (variabel X) terhadap naik/turunnya (variasi) nilai variabel lainnya (variabel Y). Adapun persamaan yang digunakan:

$$KP = r^2 \times 100\%$$

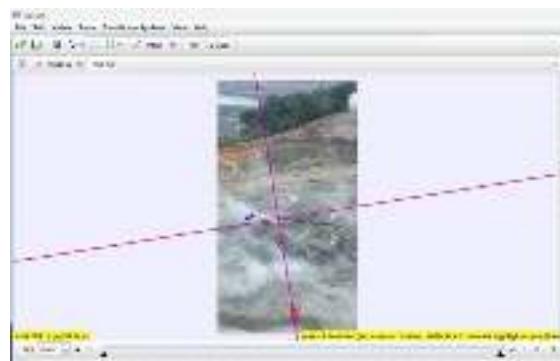
## Keterangan.

KP : Koefisien penentu

r : Koefisien korelasi

## 2.7 Aplikasi Video Tracker

Aplikasi *video tracker* merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menganalisis gerak benda maupun cahaya dalam kajian fisika. Penggunaan *video tracker* pada analisis lemparan batu terbang sangat sesuai karena objek yang diamati berupa fragmen batuan yang bergerak. Melalui aplikasi ini, hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel dan grafik lintasan gerak sehingga dapat diketahui jarak lemparan maksimum baik secara horizontal maupun vertikal



**Gambar 1.** Video Tracker

## 3. Metodologi Penelitian

### 3.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini merupakan penelitian terapan, yaitu penelitian yang dilakukan dengan tujuan untuk mengembangkan solusi atau jawaban atas permasalahan yang dihadapi di lapangan. Penelitian ini difokuskan pada penerapan teori ke dalam praktik nyata guna menghasilkan rekomendasi yang dapat langsung digunakan untuk menyelesaikan masalah secara efektif.[13] Penelitian ini akan mencakup beberapa data seperti geometri peledakan aktual meliputi, *burden*, spasi, diameter lubang ledak, *powder factor* dan isian rata-rata bahan peledak, jarak lemparan *flyrock* dari *drone* serta kondisi lubang ledak.

### 3.2 Tahapan Penelitian

Pengumpulan data dilakukan langsung di daerah penelitian yaitu di PT Bukit Asam, Tbk. adapun tahapan dalam kegiatan ini adalah sebagai berikut:

#### 3.2.1 Studi Literatur

Pada tahap ini, penulis mempelajari berbagai landasan teori yang berkaitan dengan peledakan, *flyrock*, serta metode empiris dari berbagai sumber referensi. Kajian tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam penyusunan tinjauan Pustaka, yang mendukung pemahaman dan analisis dalam penelitian ini.

#### 3.2.2 Observasi Data Lapangan

Pengamatan lapangan dilakukan secara langsung di area operasional peledakan yang dilakukan di Bukit Tapuan Quarry PT. Bukit Asam, Tbk. Perencanaan dan perancangan area peledakan, pengeboran lubang ledak, pengisian bahan peledak, perangkaian pola peledakan, operasi peledakan dan pengecekan hasil peledakan. Mengumpulkan data primer melalui lapangan serta data sekunder. Data primer dilakukan dengan observasi lapangan, pengukuran geometri serta pengukuran hasil *flyrock* yang dihasilkan akibat kegiatan peledakan.

#### 3.2.3 Teknis Analisis Data

Pada tahap analisis yang dilakukan dalam penelitian ini bertujuan untuk menganalisis data perencanaan peledakan yang efektif agar target

*flyrock* maksimal 35 m di Bukit Tapuan Quarry PT. Bukit Asam, Tbk dengan menggunakan bantuan perangkat lunak Ms. Excel.

### 3.2.3.1 Pembahasan

Hasil dari pengolahan data berupa hasil perhitungan dan analisis yang nantinya dapat digunakan sebagai acuan untuk melakukan peledakan di Bukit Tapuan Quarry PT. Bukit Asam, Tbk kedepannya.

### 3.2.3.2 Tahapan Penyusunan

Tahap ini merupakan tahap akhir dari kegiatan penelitian dengan melakukan penyusunan laporan berdasarkan data-data yang telah diperoleh dari pengamatan, pengukuran dan perhitungan di lapangan.

### 3.2.3.3 Kesimpulan

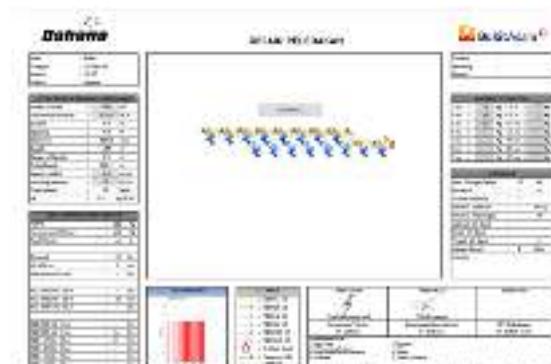
Kesimpulan akan dituliskan berdasarkan hasil korelasi antar analisis data yang telah dilakukan dengan harapan dapat memberikan rekomendasi yang terbaik bagi perusahaan. Saran akan disampaikan berdasarkan hal yang menjadi kekurangan dalam penelitian guna peneliti selanjutnya sebagai ide serta inovasi di penelitian berikutnya.

## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1 Hasil Penelitian

#### 4.1.1 Desain Peledakan

*Blast Design* atau desain peledakan adalah proses perencanaan teknis dan sistematis yang bertujuan untuk mengatur parameter-parameter peledakan agar menghasilkan fragmentasi batuan yang optimal, meminimalkan dampak peledakan, serta menjamin keselamatan dan efisiensi operasional dalam kegiatan peledakan di sektor pertambangan dan konstruksi. Berikut merupakan salah satu desain peledakan yang digunakan oleh PT Bukit Asam:



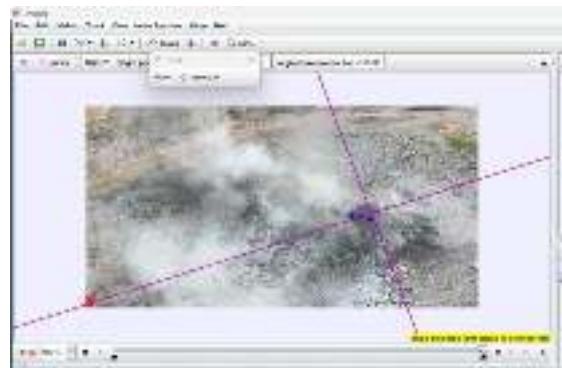
**Gambar 2.** Desain Peledakan

#### 4.1.2 Geometri Peledakan

Geometri peledakan pada penelitian ini terdapat dua bagian yaitu geometri peledakan *existing* dari 5 s.d. 25 Februari 2025 dan geometri peledakan uji coba dari 7 s.d. 19 Maret 2025.

#### 4.1.3 Jarak Lemparan Flyrock dari Drone

PT Bukit Asam, Tbk memiliki target hasil peledakan yaitu jarak lemparan *flyrock* maksimal 35 meter. Jarak lemparan aktual diambil menggunakan *drone* yang kemudian diolah menggunakan aplikasi *video tracker*. Penggunaan aplikasi *video Tracker* dalam berbagai bidang, terutama dalam analisis gerakan dan peledakan. Dalam peledakan batuan, aplikasi digunakan untuk memantau fenomena *flyrock* dan fragmentasi dengan cara merekam kejadian peledakan secara *real-time*.



**Gambar 3.** Video Tracker

Berdasarkan hasil dari pengolahan jarak aktual melalui *video tracker* didapatkan data sebagai berikut:

#### 4.1.3.1 Data Flyrock Aktual Existing

Berikut merupakan data *flyrock existing* aktual dari tanggal 5 s.d. 25 Februari 2025:

**Tabel 3.** Flyrock Existing

Tanggal	Lokasi	Flyrock Aktual (m)
05/02/2025	Quarry	65
06/02/2025	Quarry	64
10/02/2025	Quarry	63
12/02/2025	Quarry	61
25/02/2025	Quarry	65
<b>Rata-rata</b>		<b>64</b>

Berdasarkan Tabel 3 didapatkan rata-rata *flyrock* aktual yaitu sejauh 64 m dengan jarak terendah adalah 61 m yang terdapat pada tanggal 12 Februari dan terjauh yaitu 65 m pada kegiatan peledakan tanggal 5 dan 25 Februari 2025.

#### 4.1.3.2 Data Flyrock Aktual Ujicoba

Berikut adalah data *flyrock* ujicoba aktual yang diperoleh dari tanggal 7 s.d. 19 Maret 2025:

**Tabel 4.** Flyrock Ujicoba

Tanggal	Lokasi	Flyrock Aktual (m)
07/03/2025	Quarry	32
12/03/2025	Quarry Pama	36
12/03/2025	Quarry Dahana 1	26
14/03/2025	Quarry	65

Tanggal	Lokasi	Flyrock Aktual (m)
17/03/2025	Quarry	34
19/03/2025	Quarry	35
<b>Rata-rata</b>		<b>35</b>

Berdasarkan Tabel 4 rata-rata *flyrock* aktual adalah 35 meter dengan jarak minimum sejauh 26 meter. Kegiatan ujicoba peledakan dengan rencana peledakan dari PT. Bukit Asam, Tbk terjadi anomali yaitu pada tanggal 14 Maret terdapat kesalahan yang dilakukan oleh pekerja dengan pengisian *stemming* yang tidak sesuai dengan *plan*, hal ini menyebabkan lemparan *flyrock* hasil peledakan mencapai 65 meter.

#### 4.1.4 Kondisi Lubang Ledak

Kondisi lubang ledak dapat mempengaruhi jarak lemparan *flyrock* secara aktual, oleh karena itu peneliti melakukan pengecekan terhadap keadaan lubang ledak berdasarkan data *existing* dan ujicoba meliputi lubang basah, kemiringan lubang dan waktu *delay* yang digunakan.

##### 4.1.4.1 Data Existing Kondisi Lubang Ledak

Berikut merupakan data *existing* kondisi lubang ledak dan penggunaan waktu *delay* dari tanggal 5 Februari sampai 25 Februari 2025:

**Tabel 5.** Kondisi Lubang Ledak *Existing*

No.	Tanggal	N	Lokasi	Kondisi Lubang		Delay (ms)
				Berair	Kering	
1.	05/02/2025	28	Quarry	2	26	67 dan 109
2.	06/02/2025	36	Quarry	2	34	42 dan 67
3.	10/02/2025	40	Quarry	15	25	42 dan 67
4.	12/02/2025	32	Quarry	15	15	42 dan 67
5.	25/02/2025	30	Quarry	15	17	42 dan 67

Berdasarkan tabel 5 dapat diketahui bahwa terdapat lubang ledak yang berair dengan setiap peledakan yaitu dengan lubang berair terbanyak pada tanggal 10 dan 12 Februari 2025 sebanyak 15 lubang, waktu *delay* yang digunakan adalah 42 ms dan 67 ms serta kemiringan lubang tidak diketahui karena belum dilakukan pengecekan.

##### 4.1.4.2 Data Ujicoba Kondisi Lubang Ledak

Berikut merupakan data ujicoba kondisi lubang ledak dan penggunaan waktu *delay* dari tanggal 7 s.d. 19 Maret 2025:

**Tabel 6.** Kondisi Lubang Ledak Ujicoba

No.	Tanggal	N	Lokasi	Kondisi Lubang			Delay (ms)
				Berair	Kering	Kemiringan (°)	
1.	07/03/2025	45	Quarry	0	45	87	17 dan 42
2.	12/03/2025	75	Quarry Pama	32	30	86	17 dan 42
3.	12/03/2025	72	Quarry Dahana	27	0	89	17 dan 25
4.	14/03/2025	69	Quarry	3	66	87	17, 25,

No.	Tanggal	N	Lokasi	Kondisi Lubang			Delay (ms)
				Berair	Kering	Kemiringan (°)	
5.	17/03/2025	73	Quarry	28	45	88	17 dan 42
6.	19/03/2025	47	Quarry	0	47	87	17 dan 25

Berdasarkan tabel 6 dapat diketahui bahwa terdapat lubang ledak yang berair dengan setiap peledakan yaitu dengan lubang berair terbanyak pada tanggal 12 dan 17 Maret 2025 sebanyak 32 dan 28 lubang, dan waktu *delay* yang digunakan berbeda dengan sebelumnya yaitu 42ms, 67ms dan 109ms menjadi 17ms, 25ms dan 42ms ini dilakukan untuk mengetahui waktu *delay* yang sesuai agar potensi *flyrock* dapat dikurangi serta untuk kemiringan lubang aktual mencapai nilai 86° pada tanggal 12 Maret 2025.

#### 4.2 Pembahasan

##### 4.2.1 Analisis Data Existing Peledakan

Analisis data dilakukan berdasarkan data peledakan PT Bukit Asam, Tbk sebelumnya dari tanggal 5 s.d. 25 Februari 2025 untuk mengetahui jarak lemparan *flyrock*.

##### 4.2.1.1 Analisis Flyrock

Pengolahan jarak lemparan aktual diolah menggunakan aplikasi *video tracker* berdasarkan video peledakan aktual melalui *drone*. Prediksi jarak lemparan *flyrock* dilakukan dengan metode empiris yaitu dengan metode Ebrahim Ghasemi dan Richard and Moore.

**Tabel 7.** Prediksi Jarak Lemparan *Flyrock* *Existing*

Tanggal	Lokasi	Metode Richard and Moore		Jarak Flyrock Aktual (Video Tracker)
		Metode Ebrahim Ghasemi	Cratering	
			Riffing	
05/02/2025	Quarry	69	37,3	0,0, 65
06/02/2025	Quarry	70	37,7	0,0, 64
10/02/2025	Quarry	69	37,7	0,0, 63
12/02/2025	Quarry	69	37,7	0,0, 61
25/02/2025	Quarry	69	37,7	0,0, 65
<b>Rata-rata</b>		<b>69</b>	<b>38</b>	<b>0,0, 64</b>

Berdasarkan Tabel 7 tersebut dapat diketahui bahwa rata-rata jarak lemparan *flyrock* aktual melalui *video tracker* adalah 64 meter. Hasil perhitungan prediksi jarak lemparan *flyrock* menggunakan metode Ebrahim Ghasemi menunjukkan jarak sejauh 69 meter, sedangkan berdasarkan metode Richard and Moore dengan dua parameter perhitungan yaitu *cratering* 38 m dan *riffing* 0 m karena derajat kemiringan lubang dianggap sebesar 0° karena belum dilakukan pengukuran. Namun hasil ini belum mencapai target maksimal jarak lemparan *flyrock* PT Bukit Asam, Tbk yaitu 35 meter.

#### 4.2.1.2 Analisis Scaled Depth of Burial (SDoB)

Nilai perhitungan *Scaled Depth of Burial (SDoB)* menggunakan parameter *stemming* untuk mengetahui bagaimana hasil peledakan dari kegiatan peledakan sebelumnya. Hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel di bawah, sebagai berikut:

**Tabel 8.** Nilai *SDoB* Terhadap *Stemming* Data Existing

Tanggal	Lokasi	<i>Stemming Plan</i>		<i>Stemming Aktual</i>		Nilai <i>SDoB</i>	
		m	m	Aktual	Plan	Aktual	Plan
05/02/2025	Quarry	2,5	2,5	1,30	1,32		
06/02/2025	Quarry	2,5	2,3	1,24	1,32		
10/02/2025	Quarry	2,5	2,1	1,29	1,32		
12/02/2025	Quarry	2,5	2,5	1,15	1,32		
25/02/2025	Quarry	2,5	2,5	1,31	1,32		
Rata-rata		2,5	2,5	1,26	1,32		

Berdasarkan Tabel 8 melalui perhitungan nilai *SDoB* dari geometri *plan* dan aktual menghasilkan rata-rata nilai *SDoB* 1,32 dan 1,26 dimana peledakan sebelumnya termasuk kategori *controlled energy* (energi terkontrol) yaitu *flyrock* masih dapat diterima.

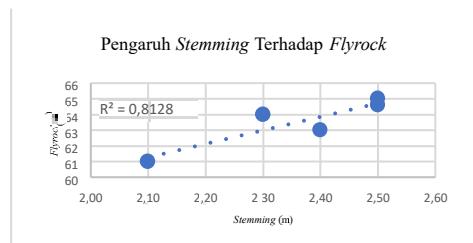
#### 4.2.1.3 Analisis Regresi

Berdasarkan geometri aktual tanggal 5 s.d. 25 Februari 2025 di Bukit Tapuan *Quarry* kemudian dilakukan analisis regresi untuk mengetahui pengaruh geometri terhadap ketidaksesuaian lemparan *flyrock*.

**Tabel 9.** Nilai Regresi Geometri Peledakan Existing dengan *Flyrock*

Parameter	r	R <sup>2</sup>	Determinasi (%)	Faktor Lain
<i>Burden</i>	0,2293	0,0526	5,26	94,74
Spasi	0,2871	0,0824	8,24	91,76
<i>Stemming</i>	0,9016	0,8128	81,28	18,72
Kedalaman Lubang	0,4781	0,2286	22,86	77,14
<i>Powder Column</i>	0,6882	0,4736	47,36	52,64

Berdasarkan Tabel 9 tersebut dapat diketahui bahwa nilai regresi yang paling berhubungan dengan jarak lemparan *flyrock* adalah nilai *stemming*, dengan nilai R<sup>2</sup> sebesar 0,8128 atau 81,28%. Hubungan *stemming* dengan *flyrock* yaitu sangat kuat. Berikut merupakan grafik hubungan *stemming* dengan *flyrock*:



**Gambar 4.** Hubungan *Stemming* dengan *Flyrock*

#### 4.2.2 Analisis Optimalisasi Perencanaan

Peledakan Menggunakan Data Ujicoba PT. Bukit Asam, Tbk Berdasarkan hasil peledakan dari tanggal 5 Februari sampai 25 Februari 2025 maka perlu dilakukan optimalisasi untuk mendapatkan perencanaan peledakan yang efektif. Berikut merupakan data perencanaan ujicoba peledakan PT. Bukit Asam, Tbk:

**Tabel 10.** Data Rencana Ujicoba Peledakan

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
<i>Burden</i>	B	2,8	m
Spasi	S	3,2	m
Diameter Lubang Ledak	D	127	mm
Kedalaman Lubang	H	5	m
<i>Stemming</i>	T	2	m
Panjang Kolom Isian	PC	3	m

#### 4.2.2.1 Analisis *Flyrock*

Pengolahan jarak lemparan aktual diolah menggunakan aplikasi *video tracker* berdasarkan video peledakan aktual melalui *drone*. Prediksi jarak lemparan *flyrock* dilakukan dengan metode empiris yaitu dengan metode Ebrahim Ghasemi dan Richard and Moore.

**Tabel 11.** Prediksi Jarak Lemparan *Flyrock* Ujicoba

Tanggal	Lokasi	Metode Ebrahim Ghasemi	Metode Richard and Moore		Jarak <i>Flyrock</i> Aktual (Video Tracker)
			Cratering	Riffling	
			M	m	
07/03/2025	Quarry	34	67,6	59,3	31
12/03/2025	Quarry Pama	42	18,4	16,1	36
12/03/2025	Quarry Dahana	27	67,6	59,3	26
14/03/2025	Quarry	72	67,6	59,3	65
17/02/2025	Quarry	38	67,6	59,3	34
19/03/2025	Quarry	38	67,6	59,3	35
Rata-rata		42	59	52	35

Berdasarkan Tabel 11 tersebut dapat diketahui bahwa rata-rata jarak lemparan *flyrock* aktual melalui *video tracker* adalah 35 meter. Hasil perhitungan prediksi jarak lempar *flyrock* menggunakan metode Ebrahim Ghasemi yaitu 42 meter dan Richard and Moore dengan dua parameter perhitungan yaitu *cratering* 59 m dan *riffling* 52 m dengan derajat kemiringan lubang dianggap mendekati 90° yaitu 88°. Pada tanggal 14 Maret 2025 terdapat kesalahan dalam pengisian *stemming* han dalam pengisian *stemming* yang menyebabkan lemparan *flyrock* mencapai 64 meter. Hasil ini menunjukkan bahwa perhitungan prediksi dengan metode Ebrahim Ghasemi sesuai dengan target maksimal jarak lemparan *flyrock* PT Bukit Asam, Tbk yaitu 35 meter.

#### 4.2.2.2 Analisis Scaled Depth of Burial (SDoB)

Nilai perhitungan *Scaled Depth of Burial (SDoB)* menggunakan parameter *stemming* untuk

mengetahui bagaimana hasil peledakan dari kegiatan peledakan berdasarkan data ujicoba PT. Bukit Asam, Tbk. Hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel dibawah, sebagai berikut:

**Tabel 12.** Nilai *SDoB* Terhadap *Stemming* Data Ujicoba

Tanggal	Lokasi	<i>Stemming Plan</i>		<i>Stemming Aktual</i>		Nilai <i>SDoB</i>
		<i>m</i>	<i>m</i>	Aktual	<i>Plan</i>	
07/03/2025	<i>Quarry</i>	2	2,15	1,1	1,24	
12/03/2025	<i>Quarry Pama</i>	3,3	3,1	1,1	1,66	
12/03/2025	<i>Quarry Dahana</i>	2	2	1,1	1,59	
14/03/2025	<i>Quarry</i>	2	1,6	1,1	0,88	
17/03/2025	<i>Quarry</i>	2	2	1,1	1,11	
19/03/2025	<i>Quarry</i>	2	2	1,1	1,11	
<b>Rata-rata</b>		<b>2</b>	<b>2,5</b>	<b>1,1</b>	<b>1,27</b>	

Berdasarkan Tabel 12 melalui perhitungan nilai *SDoB* dari geometri *plan* dan aktual menghasilkan rata-rata nilai *SDoB* 1,11 dan 1,27 dimana peledakan termasuk kategori *controlled energy* (energi terkontrol). Pada tanggal 14 Maret terdapat kesalahan dalam pengisian *stemming* dengan panjang *stemming* tidak sesuai dengan *plan* yaitu 1,6 m dengan nilai *SDoB* 0,89 yang termasuk dalam kategori *uncontrolled energy* (energi tidak terkontrol) dimana *flyrock* tidak terkendali dan ini sesuai dengan *flyrock* aktual yang melebihi target yang diinginkan.

#### 4.2.2.3 Analisis Regresi

Berdasarkan geometri aktual tanggal 7 s.d. 19 Maret 2025 di Bukit Tapuan *Quarry* kemudian dilakukan analisis regresi untuk mengetahui pengaruh geometri terhadap ketidaksesuaian lemparan *flyrock*.

**Tabel 13.** Analisis Regresi Geometri Peledakan Ujicoba dengan *Flyrock*

Parameter	r	R <sup>2</sup>	Determinasi (%)	Faktor Lain (%)
Burden	0,1578	0,0249	2,49	97,51
Spasi	0,1261	0,0159	1,59	98,41
<i>Stemming</i>	0,9013	0,8123	81,23	18,77
Kedalaman Lubang	0,0959	0,0092	0,92	99,08
Diameter Lubang	0,3615	0,1307	13,07	86,93
<i>Powder Column</i>	0,4516	0,2039	20,39	79,61

Berdasarkan Tabel 13 tersebut dapat diketahui bahwa nilai regresi yang paling berhubungan dengan jarak lemparan *flyrock* adalah nilai *stemming*, dengan nilai R<sup>2</sup> sebesar 0,8123 atau 81,23% yang berarti hubungan *stemming* dengan *flyrock* adalah sangat kuat, sesuai dengan keadaan dilapangan yaitu pada tanggal 14 Maret 2025 dengan pengisian *stemming* yang tidak sesuai menyebabkan *flyrock* melebihi target yang diinginkan.

#### 4.2.3 Analisis Faktor yang Mempengaruhi *Flyrock*

##### 4.2.3.1 Kondisi Lubang Ledak

Kondisi lubang ledak yang berarir pada tanggal 12 Maret 2025 (Pama) mencapai 32 lubang dengan *flyrock* aktual mencapai 36 meter. Kondisi ini menandakan bahwa risiko *flyrock* akibat lubang berair menjadi sangat tinggi, sehingga perlu dilakukan penanganan khusus.

##### 4.2.3.2 Ketidaksesuaian *Stemming*

Hasil pengamatan di lapangan kegiatan peledakan berdasarkan data ujicoba PT. Bukit Asam, Tbk pada tanggal 14 Maret 2025 menunjukkan adanya kesalahan dalam proses pengisian *stemming*. Hal ini berdampak besar terhadap hasil peledakan dengan jarak *flyrock* mencapai 65 meter.

##### 4.2.3.3 Waktu Tunda

Pada kegiatan peledakan uji coba dengan waktu tunda yang lebih pendek yaitu 17 ms, 25 ms, dan 42 ms. Hasil uji coba tersebut memberikan perubahan dengan lemparan batuan (*flyrock*) dengan jarak maksimum, yaitu 35 meter. Kemiringan Lubang Hasil pengamatan di lapangan menunjukkan bahwa kemiringan lubang bor pada tanggal 12 maret 2025 (Pama) sudut kemiringan mencapai 86° yang mengakibatkan lemparan *flyrock* aktual mencapai 36 meter.

## 5. Kesimpulan dan Saran

### 5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, peneliti dapat mengambil kesimpulan sebagai berikut: Berdasarkan hasil pengolahan data dapat diketahui bahwa nilai regresi yang paling berhubungan dengan jarak lemparan *flyrock* adalah nilai *stemming*, dengan nilai R<sup>2</sup> sebesar 0,8128 atau 81,28% dengan jarak lemparan *flyrock* aktual sejauh 64 m dan untuk prediksi *flyrock* menggunakan metode Ebrahim Ghasemi yaitu 69 m dan Richard and Moore untuk *cratering* dengan parameter *stemming* jarak lemparan *flyrock* sejauh 38 m. Berdasarkan hasil pengujian dari tanggal 7 Maret sampai dengan 19 Maret 2025 diketahui bahwa nilai regresi paling berpengaruh adalah *stemming* yaitu R<sup>2</sup> sebesar 0,8123 atau 81,23% dengan jarak lemparan *flyrock* aktual sejauh 35 meter sedangkan untuk prediksi *flyrock* menggunakan metode Ebrahim Ghasemi yaitu 42 m dan Richard and Moore untuk *cratering* dengan parameter *stemming* jarak lemparan *flyrock* sejauh 59 m. Faktor yang mempengaruhi *flyrock* selain geometri peledakan adalah kondisi lubang ledak berair, ketidaksesuaian *stemming*, waktu tunda yang tidak sesuai dan kemiringan lubang.

### 5.2 Saran

Dari keseluruhan rangkaian penelitian yang telah dilakukan, adapun saran yang dapat diberikan kedepannya adalah: Pengawasan lebih

ketat terhadap proses pengisian stemming karena berpengaruh besar terhadap jarak lemparan flyrock. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap optimalisasi yang telah dilakukan ujicoba di PT Bukit Asam, Tbk Dilakukan pengecekan kondisi lapangan yang mendetail terkait kondisi lubang ledak.

## Referensi

- [1] Abdurrachman, H., Saptono, S., & Wiyono, B. *Analisis Flyrock Untuk Mengurangi Radius Aman Alat Pada Peledakan Overburden Penambangan Batubara*. Seminar Nasional Kebumian ke-8. 2015.
- [2] Ayu, N., Ariyanto, D., & Indrajaya, F. *Analisis Jarak Lemparan Flyrock Akibat Kegiatan Peledakan Di CV kalimantan Makmur Kota Palangkaraya*. 2024; 8(1)51-59.
- [3] Azzahra, S.,dkk, *Kajian Teknis Geometri Peledakan terhadap Flyrock Hasil Peledakan di PT. Petrosea Kbl Site Ccm Kalimantan Utara*. 2023.
- [4] Aprilia, S., & Yulianti, A. *Analisis Flyrock Untuk Mengurangi Radius Aman Alat Pada Peledakan Batuan Andesit Di Kecamatan Margaasih, Kabupaten Bandung, Provinsi Jawa Barat*. 2021.
- [5] Al Qudusi, S., Prabawa, D., & Yulanda, Y. *Kajian Teknis Fly rock Hasil Peledakan Berdasarkan Persamaan Empiris dan Teori Scaled Depth Of Burial di PT Semen Padang*, 2024;10(1).
- [6] Babaeian, M., Sereshki, F., Ataei, M., Nehring, M., & Mohammadi, S. *Application of Soft Computing, Statistical and Multi-Criteria Decision-Making Methods to Develop a Predictive Equation for Prediction of Flyrock Distance in Open-Pit Mining*. 2023;Mining 2023, 3, 304–333.
- [7] Davarzani, M., Ataei, M., & Sereshki, F. *Flyrock risk assessment in blasting operations of road construction in hard rock using the FFTA-FDAHP Method*. Iranian Journal of Earth Science.2024;17(2).
- [8] Guspani, N. *Analisis Flyrock Untuk Mengurangi Jarak Aman Minimum Alat Pada Operasi Peledakan Overburden PT. Antareja Mahada Makmur Site PT. Multi Harapan Utama Kalimantan Timur*. Instituional Repository UIN Syarif Hidayatullah Jakarta. 2022.
- [9] Hakim, M. *Kajian Teknis Peledakan untuk Memperkecil Flyrock di Pit Pelikan Pamapersada Nusantara Jobsite PT. Kaltim Prima Coal*. Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta; 2022
- [10] I. Ghasemi, "Development of an Empirical Model for Predicting The Effects of Controllable Blasting Parameters on Fly Rock Distance in Surface Mines," Internasional Jurnal of Rock Mechanic and Mining Sciences, pp. 2012;163-170.
- [11] Nopiadie, E., Saismana, U., Hakim, R. N., & Aditya, M. *Kajian Teknis Geometri Peledakan Lapisan Batubara di PT Pamapersada Nusantara District PT Adaro Indonesia, Kabupaten Tabalong kalimantan Selatan*. Jurnal Geosapta, 2018.
- [12] Novrianto. *Analisis Pengaruh Geometri Peledakan terhadap Flyrock Hasil Peledakan Di PT. Bintang Sumatra Pacific Kec. Pangkalan Kab. Lima Puluh Kota Provinsi Sumatera Barat*. Sekolah Tinggi Teknologi Industri Padang; 2020.
- [13] Putri, H. A., Yuliadi, & Marmer, D. *Analisis Arah dan Jarak Lemparan Fly Rock Akibat Kegiatan Peledakan di PT Dahana Jobsite PT Adaro Indonesia ,Kabupaten Tabalong, Provinsi Kalimantan Selatan*. Universitas Islam Bandung; 2017.