

Prediksi Terjadinya Batu Terbang Menggunakan Metode Kecerdasan Buatan Pada Peledakan Kuari Batugamping

Prediction of Flyrock Throw Using Artificial Intelligence Methods in Limestone Quarry Blasting

Hakim Erlangga Bernado Sakti^{*1}, Brigita Christi Widanti², Ika Arsi Anafiati³, Asri Fridtriyanda⁴

^{1,3} Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Sumberdaya Alam Institut Teknologi Yogyakarta

² PT. Dua Mineral Perkasa

⁴ Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya

Corr Author: ^{*}hakimerlangga@ity.ac.id ²brigitaachristi@gmail.com, ³ika.anafiati@ity.ac.id, ⁴asri.frid@gmail.com

ABSTRAK

Beberapa metode telah dikembangkan untuk memprediksi jarak lemparan fragmen batuan hasil peledakan. Salah satu diantara metode-metode tersebut yaitu metode kecerdasan buatan (*artificial intelligence/AI*). Saat ini metode AI dianggap sebagai metode yang paling inovatif di dalam menyelesaikan banyak permasalahan. Metodologi yang digunakan pada penelitian ini merupakan metode kuantitatif. Teknik analisis yang digunakan menggunakan metode perbandingan hasil prediksi jarak lemparan batuan (Fd) menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Murlidhar dkk (2021), Hudaverdi dan Akyildiz (2019), Hasanipanah dkk (2017), dan Lu dkk (2020). Parameter masukan yang digunakan meliputi d (diamter lubang ledak), T (*stemming*), B (*burden*), PF (*powder factor*), S (spasi), H (tinggi jenjang), RQD (*rock quality designation*), ρ_r (densitas batuan), dan Vb (volume blok batuan). Setelah nilai Fd diperoleh kemudian dilakukan penentuan apakah nilai Fd tersebut aman atau tidak (terjadi *flyrock*) dengan menggunakan patokan yang ditetapkan oleh Menteri ESDM (Energi dan Sumber Daya Mineral) yaitu maksimal sejauh 500 m. Lokasi penelitian berada pada kuari Batugamping PT. X yang terletak di wilayah Kabupaten Rembang, Jawa Tengah yang dikelompokkan sebagai Formasi Paciran. Hasil analisis prediksi Fd diperoleh bahwa terdapat perbedaan hasil antara masing-masing persamaan. Hasil tertinggi diperoleh menggunakan persamaan Lu dkk (2020) dengan Fd sebesar 388,575 m sedangkan hasil terendah menggunakan persamaan MLR Hudaverdi dan Akyildiz (2019) dengan Fd sebesar 80,742 m. R² tertinggi terdapat pada persamaan Lu dkk (2020) sebesar 0,883 dan R² terendah terdapat pada persamaan Hudaverdi dan Akyildiz (2019) sebesar 0,843. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui jarak lemparan batuan aktual sehingga dapat dilakukan pencocokan model prediksi batu terbang pada lokasi penelitian.

Kata-kata kunci: Batu Terbang, Kecerdasan Buatan, Prediksi Jarak Lemparan Batuan

ABSTRACT

Several methods have been developed to predict the throwing distance of blasted rock fragments. One of these methods is the method of artificial intelligence (AI). Currently the AI method is considered the most innovative method in solving many problems. The methodology used in this study is a quantitative method by the comparison method for predicting rock throwing distance (Fd) using the equations developed by Murlidhar et al (2021), Hudaverdi and Akyildiz (2019), Hasanipanah et al (2017), and Lu et al (2020). The input parameters used viz. d (blast hole diameter), T (*stemming*), B (*burden*), PF (*powder factor*), S (space), H (bench height), RQD (*rock quality designation*), ρ_r (rock density), and Vb (rock block volume). After the Fd value is obtained, it is then determined whether the Fd value is safe or not (*flyrock* occurs) according to maximum distance 500 m. The research location is in the limestone quarry of PT. X which is located in Rembang Regency, Central Java which is grouped as the Paciran Formation. The highest results were obtained using the Lu et al (2020) equation with an Fd of 388.575 m while the lowest results by Hudaverdi and Akyildiz MLR equation (2019) with an Fd of 80.742 m. The highest R² is by Lu et al (2020) equation of 0.883 and the lowest R² is by Hudaverdi and Akyildiz (2019) equation of 0.843. Further research is needed to determine the actual Fd so that the prediction model for flyrock can be matched at the study site.

Keywords: Artificial Intelligence, Flyrock, Throwing Distance Prediction

Submitted: 18-05-2023; Revised: 17-07-2023; Accepted: 08-03-2024; Available Online: 27-07-2024

Published by: Mining Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Lambung Mangkurat

This is an open access article under the CC BYND license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

©2024, Geosapta

PENDAHULUAN

Peledakan merupakan salah satu penggalan batuan yang banyak dipilih. Selain karena alasan geomekanika, peledakan juga dipilih dikarenakan dapat menghasilkan produksi penggalan batuan yang lebih besar dan efisien dibandingkan penggalan mekanis. Meskipun demikian, metode peledakan dapat memberikan beberapa dampak yang harus dapat diprediksi besarnya sebelum dilakukan kegiatan peledakan sehingga dampak yang membahayakan dapat dicegah. Salah satu dampak dari

peledakan batuan yaitu terjadinya batu terbang (*flyrock*) [1]. Batu terbang merupakan fenomena terlemparnya batuan pada jarak di luar jarak aman peledakan. Perlu diketahui bahwa ketika bahan peledakan mengalami detonasi, hanya sekitar 20% - 30% dari energi eksplosif yang terpakai untuk memberai batuan [2,3]. Sisanya, terdistribusikan selain untuk memberai massa batuan dan inilah yang berpotensi menyebabkan fragmen hasil peledakan terlempar hingga pada jarak yang tidak aman. Lebih rinci, batu terbang dapat disebabkan diantaranya oleh: (1) kesalahan di dalam

menganalisis struktur geologi, (2) susunan pola pemboran yang tidak sesuai, (3) geometri peledakan yang tidak sesuai, dan (4) konsentrasi muatan bahan peledak yang terlalu tinggi [4,5] Secara praktek, terjadinya batu terbang hanya dapat diketahui dengan pasti setelah dilakukan kegiatan peledakan. Tetapi, hal ini tentu saja sangat berbahaya sehingga, diperlukan suatu metode untuk memprediksi jarak lemparan batuan yang dihasilkan akibat peledakan batuan. Berdasarkan penyebab-penyebab batu terbang yang diuraikan sebelumnya, diketahui bahwa terdapat beberapa parameter yang mempengaruhi jarak lemparan batuan akibat peledakan sehingga banyak peneliti yang telah mengembangkan metode di dalam memprediksi jarak lemparan batuan akibat peledakan. Hal ini tentu sangat berguna di dalam pengambilan keputusan apakah perencanaan peledakan yang telah dibuat aman atau tidak dari batu terbang.

Beberapa metode telah dikembangkan untuk memprediksi jarak lemparan fragmen batuan hasil peledakan. Salah satu diantara metode-metode tersebut yaitu metode kecerdasan buatan (*artificial intelligence/AI*). Dalam beberapa tahun terakhir, metode AI telah banyak dikembangkan untuk mengatasi berbagai persoalan di dalam kehidupan nyata. Hal ini dikarenakan metode AI dianggap sebagai metode yang paling inovatif di dalam menyelesaikan banyak permasalahan tidak terkecuali dalam masalah prediksi terjadinya batu terbang [6]. Beberapa peneliti kemudian banyak menggunakan metode AI untuk mengembangkan metode prediksi batu terbang yang mana telah diringkas di dalam (Tabel-1). Berdasarkan (Tabel 1), diketahui bahwa metode AI yang digunakan yaitu metode MDA (*multiple discriminant analysis*), MLR (regresi linier ganda), PSO (*particle swarm optimization*).

Tabel-1. Berbagai Metode Prediksi Batu Terbang yang Telah Dikembangkan Menggunakan Metode AI

Peneliti	Parameter		Algoritma AI
	Dapat Dikontrol	Tidak Dapat Dikontrol	
Murlidhar (2021) [6]	d, T, B	RQD	MLR
Hudaverdi dan Akyildiz (2019) [7]	S, B, H, d, T, PF	Vb	MLR dan MDA
Lu dkk (2020) [8]	S, B, T, PF	ρ_r	MLR
Hasanipannah (2017) [9]	S, B, T, PF	ρ_r	MLR dan PSO

Keterangan: d (diamter lubang ledak), T (*stemming*), B (*burden*), PF (*powder factor*), S (spasi), H (tinggi jenjang), RQD (*rock quality designation*), ρ_r (densitas batuan), Vb (volume blok batuan), MDA (*multiple discriminant analysis*), MLR (regresi linier ganda), PSO (*particle swarm optimization*)

Berdasarkan (Tabel-1), parameter yang digunakan untuk memprediksi batu terbang dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu parameter yang dapat dikontrol dan yang tidak dapat dikontrol. Parameter yang dapat dikontrol adalah parameter yang berkaitan dengan desain peledakan yang dapat diubah pada satu lokasi yang sama. Sedangkan

parameter yang tidak dapat dikontrol merupakan parameter yang tidak dapat diubah di suatu lokasi yang umumnya berkaitan dengan kondisi geologi dan geomekanik pada batuan yang akan diledakkan. Jika dilihat kedua kelompok parameter tersebut sesuai dengan yang telah diuraikan oleh [4,5] pada paragraf pertama sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa metode prediksi yang telah dikembangkan tersebut dapat digunakan di dalam memperkirakan terjadinya batu terbang akibat kegiatan peledakan batuan.

Berdasarkan uraian di atas, penulis tertarik untuk membuat analisis prediksi perkiraan terjadinya batu terbang pada peledakan di kuari batugamping. Diharapkan penelitian ini dapat digunakan di dalam memberikan informasi rekomendasi geometri peledakan yang aman dari terjadinya batu terbang sehingga kegiatan peledakan yang dilakukan tidak memberikan dampak yang negatif baik pada tambang maupun masyarakat sekitar.

METODOLOGI

Metodologi yang digunakan pada penelitian ini merupakan metode kuantitatif. Teknik analisis yang digunakan menggunakan metode perbandingan hasil prediksi jarak lemparan batuan (F_d) menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh peneliti terdahulu (Tabel-1). Adapun persamaan yang digunakan yaitu:

- Persamaan Murlidhar dkk (2021) [6]

$$F_d = 2,421d + 95,479 \frac{T}{B} + 3,503RQD - 243,139 \quad (1)$$

- Metode Hudaverdi dan Akyildiz (2019) [7]
 Metode ini menggunakan persamaan empiris [7]:

$$F_d = -33,045 \frac{S}{B} + 18,657 \frac{H}{B} - 17,664 \frac{B}{d} - 42,082 \frac{T}{B} - 105,316PF - 8,260Vb + 630,554 \quad (2)$$

serta menggunakan model MDA. Adapun model MDA diperoleh dengan menghitung dua nilai faktor diskriminan (DF_1 dan DF_2) yang dihitung menggunakan persamaan [7]:

$$DF_1 = 16,155 \frac{S}{B} - 3,105 \frac{H}{B} + 2,376 \frac{B}{d} + 8,560 \frac{T}{B} + 24,420PF + 0,338Vb - 95,035 \quad (3)$$

$$DF_2 = 40,936 \frac{S}{B} - 4,045 \frac{H}{B} + 3,044 \frac{B}{d} + 15,837 \frac{T}{B} + 55,311PF + 0,435Vb - 165,512 \quad (4)$$

Setelah nilai DF_1 dan DF_2 diperoleh, kedua nilai tersebut diplotkan pada grafik *flyrock throw* (Gambar-1) [7]. Rentang dari jarak lemparan batuan menurut (Gambar-1) dapat dilihat pada (Tabel-2). Nilai V_b yang digunakan pada metode ini menggunakan nilai spasi diskontinu rata-rata.

- Persamaan Lu dkk (2020) [8]

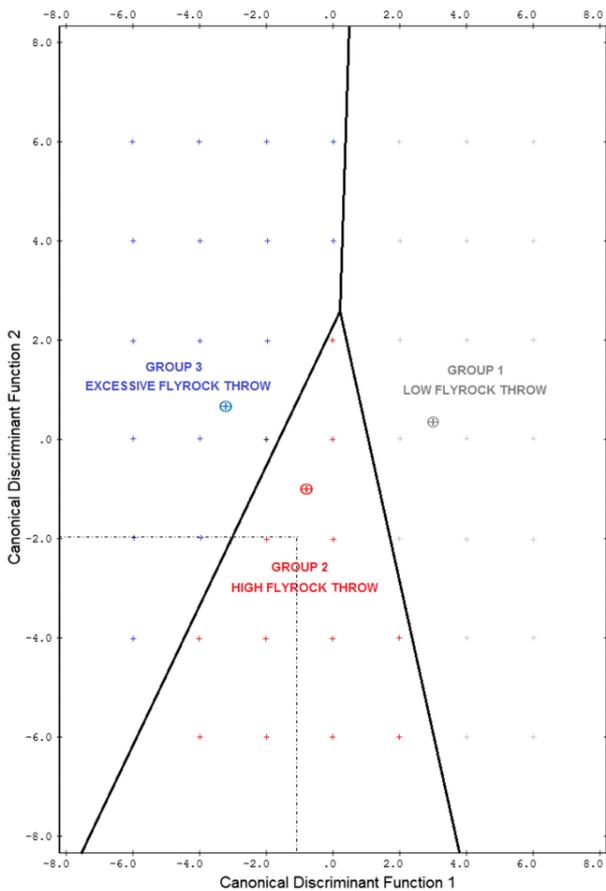
$$Fd = 610,42 - 167,57S + 125,55B - 24,9T - 226,61PF + 47,74\rho_r \quad (5)$$

- Metode Hasanipah dkk (2017) [9]
 Metode ini menggunakan persamaan MLR:

$$Fd = 558,1 - 167,6S + 127,8B - 28,9T - 207,3PF + 61,4\rho_r \quad (6)$$

serta persamaan PSO:

$$Fd = 2090,13S^{-0,45} + 188,45B^{0,82} + 1969,3T^{-6,57} + 1,9PF^{-123,3} + 94,14\rho_r^{0,64} - 1.377,09 \quad (7)$$



Gambar-1. Grafik *Flyrock Throw* [7]

Tabel-2. Klasifikasi Rentang Jarak Lemparan Batuan Berdasarkan Grafik *Flyrock Throw* [7]

Nomor Grup	Kategori	Rentang Jarak Lemparan Batuan
1	Low	≤ 55 m
2	High	55 m – 110 m
3	Excessive	> 110 m

Setelah nilai F_d diperoleh kemudian dilakukan penentuan apakah nilai F_d tersebut aman atau tidak (terjadi *flyrock*). Patokan aman atau tidak menggunakan ketentuan jarak aman peledakan yang ditetapkan oleh Menteri ESDM (Energi dan Sumber Daya Mineral) melalui [10] yaitu sejauh 500 m.

Lokasi penelitian berada pada kuari Batugamping PT. X yang terletak di wilayah Kabupaten Rembang, Jawa Tengah dengan peta lokasi dapat dilihat pada (Gambar-2). Adapun endapan batugamping yang ditambang merupakan Satuan Batugamping Formasi Paciran. Formasi ini tersusun oleh litologi batugamping pejal dan batugamping dolomitan [11,12]. Karakteristik massa batuan di lokasi tambang dapat dilihat pada (Tabel-3). Geometri peledakan yang digunakan pada analisis merupakan geometri peledakan rencana perusahaan. Agen peledak yang digunakan yaitu amonium nitrat *fuel oil* (ANFO). Geometri rencana tersebut menggunakan metode [13] dengan persamaan sebagai berikut:

$$AF_1 = \left(\frac{SG \times VoD^2}{SG_{std} \times VoD_{std}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

$$AF_2 = \left(\frac{\rho_{std}}{\rho_r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

$$Kb = 30 \times AF_1 \times AF_2 \quad (10)$$

$$B = Kb \times d \quad (11)$$

$$T = 0,75 \times B \quad (12)$$

$$S = 1,5 \times B \quad (13)$$

$$H = 60,5 \times d \quad (14)$$

dengan SG adalah *specific gravity* ANFO 0,84; VoD adalah kecepatan detonasi ANFO sebesar 10.827 fps; SG_{std} merupakan SG bahan peledak standar sebesar 1,2; VoD_{std} adalah VoD standar sebesar 12.000 fps; ρ_{std} adalah densitas batuan standar sebesar 2,6 g/cc; AF_1 adalah faktor koreksi bahan peledak; AF_2 faktor koreksi batuan; dan Kb adalah faktor koreksi *burden*. Nilai dari karakteristik massa batuan serta geometri peledakan dapat dilihat pada (Tabel-3).



Gambar-2. Peta Lokasi Penelitian

HASIL DAN DISKUSI

Hasil analisis prediksi jarak lemparan batuan dapat dilihat pada (Tabel-4). Berdasarkan (Tabel-4), diperoleh bahwa terdapat perbedaan hasil antara masing-masing persamaan. Hasil tertinggi diperoleh menggunakan persamaan (5) dengan jarak lemparan batuan sebesar 388,575 m sedangkan hasil terendah menggunakan persamaan (2) dengan jarak lemparan batuan sebesar 80,742 m. Tetapi ada hal menarik dimana ada persamaan yang menghasilkan nilai jarak lemparan batuan yang terlalu besar yaitu model PSO [9]. Untuk model MDA [7] diperoleh nilai DF_1 sebesar -1,9 dan DF_2 sebesar -8,0 sehingga berdasarkan plot nilai pada grafik (Gambar-3) diperoleh klasifikasi jarak lemparan batuan yang tinggi (*high*) dengan rentang jarak antara 55 m – 110 m. Dapat disimpulkan, untuk studi kasus pada lokasi penelitian dan geometri peledakan yang digunakan tidak dapat menggunakan semua jenis persamaan empiris.

Tabel-3. Karakteristik Massa Batuan dan Geometri Peledakan Pada Lokasi Penelitian

Parameter	Nilai
Karakteristik Massa Batuan	
RQD	83,84%
Vb	2,32 m
ρ_r	2,64 g/cc
Geometri Peledakan	
d	0,076 m
B	2,00 m
T	1,50 m
S	3,00 m
H	4,60 m
PF	0,26 kg/m ³
Agen Peledak	ANFO

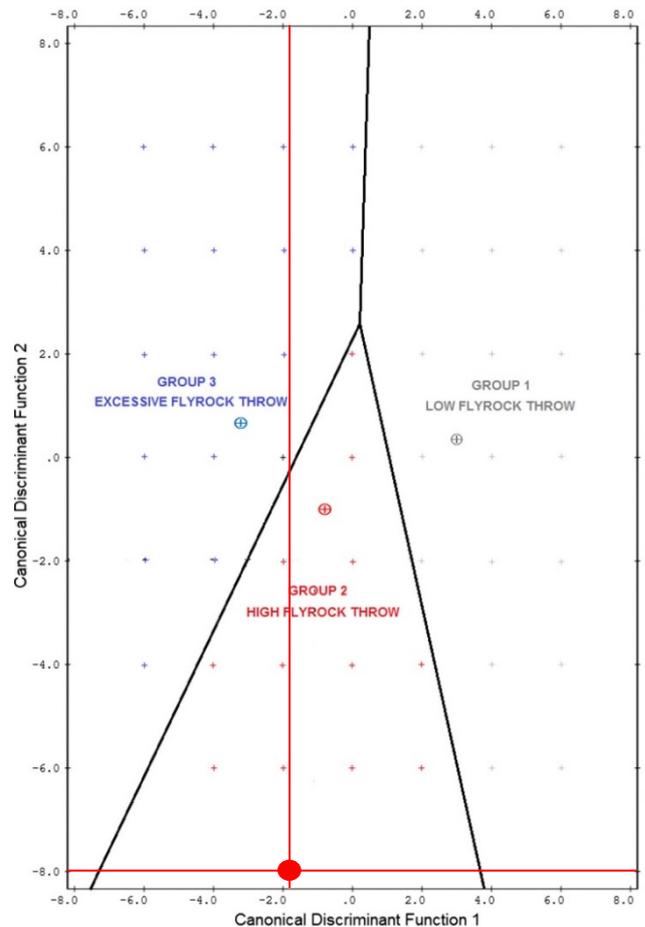
Tabel-4. Hasil Prediksi Nilai Fd

Metode	Fd (m)
[6]	122,346
[7]	
MLR	80,742
MDA	High (55 – 110)
[8]	388,575
[9]	
MLR	375,748
PSO	Teralalu Besar

Metode [6] disusun menggunakan pendekatan regresi linier berganda (MLR). Dikembangkan melalui penelitian pada tiga kuari granit di wilayah Johor, Malaysia. Lokasi ini berada pada wilayah beriklim tropis sehingga pelapukan batuan sangat mendominasi bagian permukaan. Pelapukan batuan dapat mengubah komposisi mineral penyusun batuan dan akan berdampak pada

berubahnya karakteristik geomekanik batuan tersebut [6, 14–16]. Secara litologi, lokasi penelitian memiliki litologi penyusun yang berbeda dimana lokasi penelitian tersusun atas litologi batugamping. Tetapi, untuk iklim lokasi penelitian memiliki kesamaan yaitu memiliki iklim tropis. Secara statistik, metode ini memiliki nilai koefisien determinasi (r^2) sebesar 0,867.

Metode [7] disusun menggunakan pendekatan MLR dan MDA. Metode ini dikembangkan melalui serangkaian penelitian pada kuari batupasir Formasi Trakya, Kawasan Kemberburgaz, Turki. Formasi ini tersusun oleh batupasir dengan sisipan serpih dan batugamping yang berumur Karbon. Banyak ditemukan struktur perlipatan, patahan naik dengan kemiringan curam, laminasi dan terdapat banyak kekar dengan dengan spasi rata-rata 1,15 dan set kekar yang beragam tetapi umumnya bearah baratlaut-tenggara. Banyak dijumpai intrusi andesit dan dike basal. Densitas batupasir rata-rata 2,70 g/cc dengan kadar silika 60% [7, 17]. Jika dibandingkan dengan lokasi penelitian, terdapat perbedaan litologi dimana lokasi penelitian tersusun oleh batugamping yang berumur lebih muda yaitu Tersier. Selain itu jika dilihat dari iklim wilayah Turki memiliki iklim subtropis sehingga pelapukan tidak setinggi lokasi penelitian yang beriklim tropis. Untuk agen peledak yang digunakan yaitu sama-sama menggunakan ANFO. Metode ini memiliki nilai R^2 sebesar 0,843.



Gambar-3. Rentang Jarak Lemparan Batuan Pada Lokasi Penelitian Menurut Grafik [7]

Metode [8] disusun menggunakan pendekatan MLR. Lokasi penelitian sama dengan lokasi penelitian [6]. Agen peledakan yang digunakan adalah ANFO. Metode ini memiliki nilai R^2 sebesar 0,883.

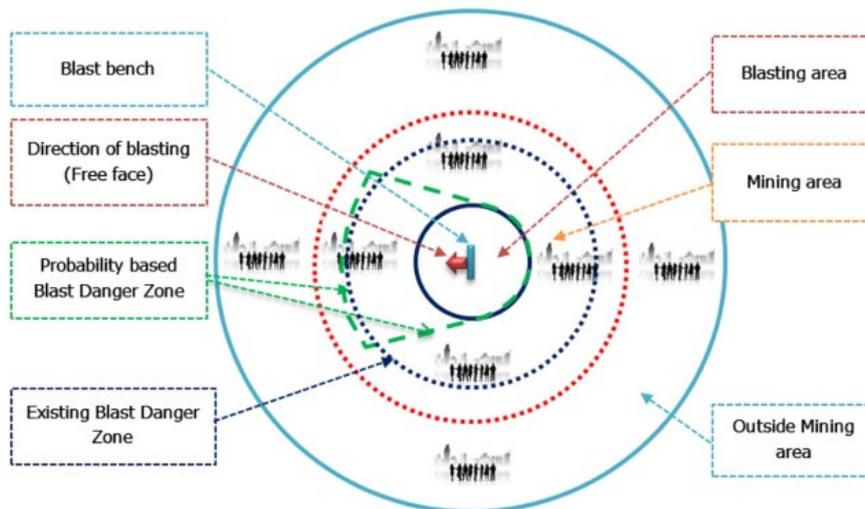
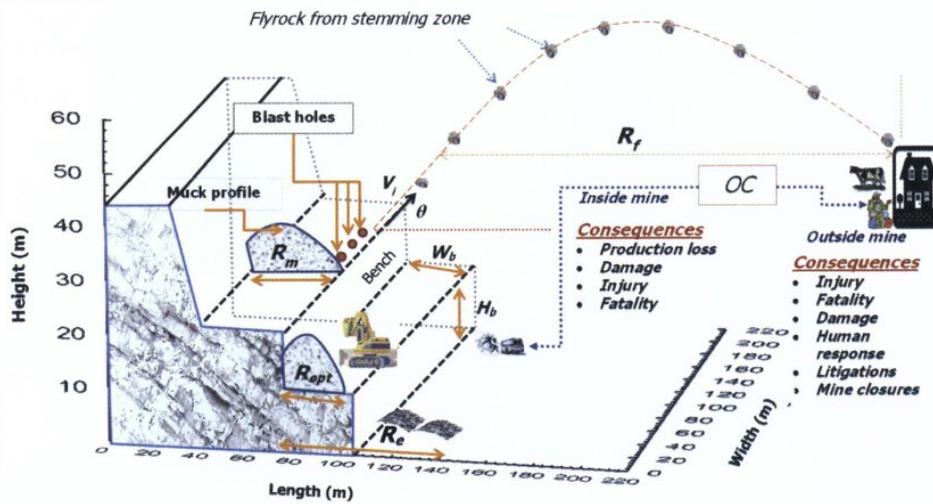
Metode [9] disusun menggunakan pendekatan MLR dan PSO. Lokasi penelitian sama dengan lokasi penelitian [6, 8]. Agen peledakan yang digunakan adalah ANFO. Model MLR dan PSO masing-masing memiliki nilai R^2 sebesar 0,88 dan 0,96.

Berdasarkan (Tabel-4) diperoleh semua hasil prediksi F_d menghasilkan jarak lemparan batuan kurang dari 500 m. Mengacu kepada [10] dapat disimpulkan bahwa geometri peledakan rencana untuk lokasi penelitian tidak akan menghasilkan batu terbang. Hal ini dikarenakan jarak lemparan batuan yang masih dalam batas radius aman. Jika kita asumsikan bahwa jarak lemparan menggunakan nilai prediksi yang paling jauh, maka diperoleh nilai F_d sebesar 388,575 m. Jika mengacu kepada nilai R^2 yang terbesar (hanya yang memberikan nilai F_d yang wajar) maka nilai F_d prediksi terbesar memiliki nilai R^2 yang terbesar senilai 0,883.

Sebagaimana yang telah didefinisikan pada pendahuluan, batu terbang merupakan terlemparnya batuan dari muka lereng tambang yang diledakkan pada jarak di luar radius aman atau melebihi dari radius yang dikehendaki. Pada dasarnya jika jarak lemparan batuan tersebut pada jarak yang dikehendaki (misal pada jarak dimana alat muat berada) maka hal tersebut merupakan sesuatu yang diinginkan dikarenakan akan memudahkan untuk proses pemuatan (proses setelah peledakan). Lebih

jauh, jika jarak lemparan terlalu jauh, selain menyebabkan batu terbang yang membahayakan, hal ini tentu akan memperlambat proses pemuatan fragmentasi hasil peledakan dikarenakan alat muat harus berpindah tempat menuju area dimana fragmentasi batuan terlempar. Hal ini tentu akan sangat tidak efisien terlebih pada tambang dengan multi jenjang (*open pit*) jika fragmen batuan terlempar pada level jenjang yang berbeda dengan posisi alat muat [18–20].

Dampak batu terbang secara garis besar dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu dampak jika terjadi pada area penambangan dan dampak jika terjadi di luar area penambangan. Jika terjadi di dalam area penambangan, batu terbang dapat mengakibatkan beberapa dampak yaitu terhentinya penambangan (berkurangnya produksi), merusak peralatan dan fasilitas tambang, menyebabkan luka atau meninggalnya pekerja tambang. Adapun jika terjadi di luar area penambangan, maka dampak-dampak yang telah disebutkan sebelumnya dapat terjadi pada masyarakat dan fasilitas umum yang berada di sekitar tambang. Skema dampak tersebut dapat dilihat pada blok diagram (Gambar-4) [18]. Jika ditinjau dari arah kemiringan lereng (arah lemparan batuan), maka dampak dari batu terbang dapat dilihat melalui skema (Gambar-5) [21].



Di dalam menganalisis batu terbang, penting untuk membuat daftar dari objek yang berpotensi untuk menerima dampak dari batu terbang atau objek kekhawatiran/*object of concern* (OC) dari potensi bahaya terjadinya batu terbang. Daftar objek tersebut nantinya dapat digunakan untuk membuat suatu deliniasi dari zona bahaya peledakan (*blast damage zone*/BDZ). Beberapa OC dari potensi bahaya terjadinya batu terbang dapat dilihat pada (Tabel-5). Selain itu, penting untuk membuat suatu analisis probabilitas untuk kejadian batu terbang. Probalitas ini nantinya dapat digunakan untuk memperikasikan besaran resiko dari terjadinya batu terbang. Resiko secara matematis dapat didefinisikan sebagai hasil kali antara probabilitas dan dampak kejadian [18].

Tabel-5. Penjelasan Objek yang Berpotensi Menerima Dampak Batu Terbang [18]

Objek	Jenis Kekhawatiran	Level Pinalti
Pemukiman Sekitar Tambang	Cedera	Tinggi
Personil Pertambangan	Cedera atau Fatalitas	Tinggi
Struktur Bangunan Di Luar Tambang	Kerusakan	Tinggi
Struktur Bangunan Di Dalam Tambang	Kerusakan	Rendah
Peralatan Tambang	Kerusakan	Rendah
Peralatan Di Luar Tambang	Kerusakan	Tinggi
Ternak Di Luar Tambang	Cedera atau Fatalitas	Tinggi

Untuk meminimalisir terjadinya batu terbang, beberapa tindakan yang perlu dilakukan yaitu [18]:

1. Mengumpulkan data yang cukup untuk membuat model prediksi terjadinya batu terbang sehingga model prediksi tersebut memiliki kesalahan yang minim.
2. Memahami secara komprehensif karakteristik bahan peledakan dan pengaruhnya terhadap interaksi bahan peledak, karakteristik massa batuan.
3. Mengembangkan mekanisme prediksi yang berfokus pada fisik batu terbang berdasarkan poin 2 sehingga dapat diprediksi besar lemparan batuan.
4. Membuat kualifikasi dan definisi dari hasil analisis batu terbang serta solusi jika diperkirakan terjadi batu terbang.

Sebagai penutup, pada dasarnya terjadinya batu terbang hanya dapat diketahui dengan pasti besarnya ketika kegiatan peledakan telah selesai dilakukan. Penting untuk dilakukan proses pencocokan antara jarak lemparan batuan sesungguhnya dengan jarak lemparan batuan hasil prediksi model AI. Dikarenakan massa batuan memiliki karakteristik heterogen, diskontinu dan anisotrop [22], maka analisis pencocokan seperti ini penting untuk dilakukan di setiap lokasi kegiatan peledakan. Hal ini dikarenakan karakteristik massa batuan sangat beragam, setiap lokasi pasti berbeda sehingga antara satu lokasi dengan lokasi lainnya akan berbeda di dalam kecocokan metode prediksi jarak lemparan batuan akibat proses peledakan

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil prediksi jarak lemparan batuan pada lokasi penelitian diperoleh bahwa jarak lemparan batuan masih dalam batas aman (< 500 m) dengan prediksi tertinggi oleh persamaan Lu dkk (2020) dengan jarak lemparan batuan sebesar 388,575 m sedangkan hasil terendah menggunakan persamaan MLR Hudaverdi dan Akyildiz (2019) dengan jarak lemparan batuan sebesar 80,742 m. R^2 tertinggi terdapat pada persamaan Lu dkk (2020) sebesar 0,883 dan R^2 terendah terdapat pada persamaan Hudaverdi dan Akyildiz (2019) sebesar 0,843. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui jarak lemparan batuan aktual sehingga dapat dilakukan pencocokan model prediksi batu terbang pada lokasi penelitian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi Yogyakarta yang telah memberi dukungan dalam bentuk finansial, fasilitas, dan legalitas terhadap penelitian ini.

DAFTAR ACUAN

- [1] Nguyen H, Bui X-N, Nguyen-Thoi T, et al. Toward a State-of-the-Art of Fly-Rock Prediction Technology in Open-Pit Mines Using EANNs Model. *Applied Sciences* 2019; 9: 4554.
- [2] Finn O, Nyberg U, Mats O, et al. Where does the explosive energy in rock blasting rounds go? *Science and Technology of Energetic Material* 2004; 65: 54–63.
- [3] Khandelwal M, Singh TN. Prediction of Blast Induced Air Overpressure in Opencast Mine. *Noise & Vibration Worldwide* 2005; 36: 7–16.
- [4] Zhang Z-X. Safety in Rock Engineering. In: Zhang Z-X (ed) *Rock Fracture and Blasting*. Cambridge: Elsevier, 2016, pp. 437–458.
- [5] Murlidhar BR, Kumar D, Jahed Armaghani D, et al. A Novel Intelligent ELM-BBO Technique for Predicting Distance of Mine Blasting-Induced Flyrock. *Natural Resources Research* 2020; 29: 4103–4120.
- [6] Murlidhar BR, Nguyen H, Rostami J, et al. Prediction of flyrock distance induced by mine blasting using a novel Harris Hawks optimization-based multi-layer perceptron neural network. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 2021; 13: 1413–1427.
- [7] Hudaverdi T, Akyildiz O. A new classification approach for prediction of flyrock throw in surface mines. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 2019; 78: 177–187.
- [8] Lu X, Hasanipanah M, Brindhadevi K, et al. ORELM: A Novel Machine Learning Approach for Prediction of Flyrock in Mine Blasting. *Natural Resources Research* 2020; 29: 641–654.
- [9] Hasanipanah M, Jahed Armaghani D, Bakhshandeh Amnieh H, et al. Application of PSO to develop a powerful equation for prediction of flyrock due to blasting. *Neural Comput Appl* 2017; 28: 1043–1050.
- [10] Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. Keputusan Menteri Energi dan

- Sumber Daya Mineral Tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan Yang Baik. 1827 K/30/MEM/2018, Republik Indonesia: Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2018.
- [11] Pringgoprawiro H. *Biostratigrafi dan Paleogeografi Cekungan Jawa Timur Utara. Suatu Pendekatan Baru*. Disertasi Doktor, Institut Teknologi Bandung, 1983.
- [12] Situmorang RL, Smit R, van Vessem EJ. *Peta Geologi Lembar Jatirogo, Jawa*. Bandung, Indonesia: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, 1992.
- [13] Ash RL. *The Mechanics of Rock Breakage. Pit and Quarry*, 1967.
- [14] Tuğrul A, Gürpınar O. The Effect of Chemical Weathering on the Engineering Properties of Eocene Basalts in Northeastern Turkey. *Environmental & Engineering Geoscience* 1997; III: 225–234.
- [15] Tuğrul A. The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. *Eng Geol* 2004; 75: 215–227.
- [16] Borrelli L, Perri F, Critelli S, et al. Characterization of granitoid and gneissic weathering profiles of the Mucone River basin (Calabria, southern Italy). *Catena (Amst)* 2014; 113: 325–340.
- [17] Tugrul A, Ündül Ö. Engineering geological characteristics of stanbul greywackes, Turkey. In: *Proceedings of the 10th International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Congress*. Nottingham: International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), 2006, pp. 1–8.
- [18] Raina AK, Murthy VMSR, Soni AK. Flyrock in surface mine blasting: understanding the basics to develop a predictive regime. *Curr Sci* 2015; 108: 660–665.
- [19] Konya CJ, Walter EJ. *Surface blast design*. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1990.
- [20] Favreau RF. The prediction of blast-induced swell by means of computer simulations. *CIM Bulletin (Canadian Institute of Mining and Metallurgy)* 1993; 86: 67–72.
- [21] Raina AK, Murthy VMSR, Soni AK. Flyrock in bench blasting: a comprehensive review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 2014; 73: 1199–1209.
- [22] Rai MA, Kramadibrata S, Wattimena RK. *Mekanika Batuan*. Bandung: Penerbit ITB, 2014.