

MINIMALISASI *OVERBREAK* DAN *UNDERBREAK* MELALUI PEMODELAN PREDIKTIF DAN OPTIMASI PELEDAKAN PT FREEPORT INDONESIA

Minimization of Overbreak and Underbreak through Predictive Modeling and Optimization Blasting at PT Freeport Indonesia

ROCHSYID ANGGARA*, BANTAR T. S. RUKMANA**, RAYHAN N.. PRATAMA** dan JEFFRYSON M. RUMBEWAS**

Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta,
Jl.Padjajaran (Lingkar Utara) No. 104, Condongcatur, Depok, Sleman, Yogyakarta 55283
Email korespondensi: rochsyid.anggara@upnyk.ac.id

* Kontributor Utama, ** Kontributor Anggota

ABSTRAK

Peledakan pada pengembangan bukaan tambang bawah tanah di Tambang Kucing Liar (KL) PT Freeport Indonesia (PTFI) berpotensi menimbulkan *overbreak* dan *underbreak*. Evaluasi peledakan di November 2024 menunjukkan bahwa pada beberapa *heading*, nilai deviasi geometri melebihi batas toleransi perusahaan sebesar 10%, sehingga diperlukan optimasi parameter peledakan. Penelitian ini bertujuan untuk mengendalikan *overbreak-underbreak* melalui pengembangan model prediktif berbasis parameter geoteknik dan peledakan. Analisis dilakukan menggunakan *Multiple Regression Analysis* (MRA) terhadap 53 data peledakan dengan variabel *Rock Mass Classification* (Q-Value), *Perimeter Powder Factor* (PPF), dan *Confinement Factor* (C). Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi model regresi multivariat berbasis data operasional dengan simulasi Monte Carlo untuk menghasilkan optimasi parameter peledakan secara probabilistik dan aplikatif. Model regresi selanjutnya digunakan dalam simulasi Monte Carlo sebanyak 5.000 iterasi. Hasil menunjukkan bahwa *overbreak* dipengaruhi secara signifikan oleh Q-Value, PPF dan C ($R^2 = 0,693$), sedangkan *underbreak* didominasi oleh Q-Value ($R^2 = 0,470$). Simulasi Monte Carlo menghasilkan nilai rata-rata *overbreak* sebesar 7,41% dan *underbreak* sebesar 5,37%, keduanya berada di bawah batas toleransi perusahaan.

Kata kunci: *overbreak*, *powder factor*, prediksi, *underbreak*.

ABSTRACT

Blasting activities in the development of underground openings at the Kucing Liar (KL) Mine, PT Freeport Indonesia, may cause geometric deviations in the form of overbreak and underbreak. Evaluation of blasting performance in November 2024 indicated that, in several headings, geometric deviations exceeded the company's tolerance limit of 10%, highlighting the need for blasting parameter optimization. This study aims to control overbreak-underbreak through the development of predictive models based on geotechnical and blasting parameters. Multiple Regression Analysis (MRA) was applied to 53 blasting records using Rock Mass Classification (Q-value), Perimeter Powder Factor (PPF), and Confinement Factor (C) as independent variables. The novelty of this study lies in the integration of multivariate regression models derived from operational data with Monte Carlo simulation to provide probabilistic and practical blasting parameter optimization. The regression models were subsequently used in a Monte Carlo simulation with 5,000 iterations. The results indicate that overbreak is significantly influenced by Q-value, PPF, and Confinement Factor ($R^2 = 0.693$), whereas underbreak is predominantly controlled by Q-value ($R^2 = 0.470$). Monte Carlo simulation reduced the average overbreak to 7.41% and resulted in an average underbreak of 5.37%, both of which are below the company's tolerance threshold.

Keywords: *overbreak*, *powder factor*, prediction, *underbreak*.

PENDAHULUAN

PT Freeport Indonesia (PTFI) merupakan pemegang Izin Usaha Pertambangan Khusus (IUPK) yang mengoperasikan tambang bawah tanah di lokasi Tambang Kucing Liar (KL), yang saat ini berada pada tahap pengembangan akses. Peledakan sebagai metode utama dalam *development* bukaan berpotensi menimbulkan deviasi geometri berupa penggalan berlebih (*overbreak*) dan kekurangan penggalan (*underbreak*). PTFI menetapkan batas toleransi maksimum sebesar 10% untuk kedua parameter tersebut. Namun, evaluasi kinerja peledakan pada November 2024 menunjukkan nilai rata-rata *overbreak* sebesar 11%, sementara beberapa *heading* mengalami *underbreak* hingga 11%, yang mengindikasikan bahwa pengendalian geometri bukaan melalui parameter peledakan eksisting belum optimal. Kondisi ini berimplikasi pada peningkatan biaya operasional akibat kebutuhan *ground support* tambahan, pekerjaan *scaling*, dan *secondary blasting*, serta berpotensi meningkatkan risiko keselamatan kerja. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan parameter peledakan guna menurunkan nilai *overbreak* dan *underbreak* agar memenuhi standar perusahaan.

Penelitian ini bertujuan untuk menurunkan nilai *overbreak* dan *underbreak* hingga berada di bawah ambang batas perusahaan melalui pengembangan model prediktif. Hasil penelitian Shi dkk. (2024) menunjukkan bahwa deviasi geometri bukaan tambang bawah tanah dipengaruhi oleh karakteristik massa batuan serta parameter teknis peledakan, sedangkan Mottahedi, Sereshki dan Ataei (2018) menekankan bahwa pengendalian *overbreak-underbreak* secara operasional terutama ditentukan oleh faktor-faktor yang bersifat *controllable*. Berdasarkan temuan tersebut dan keterbatasan data lapangan, penelitian ini memfokuskan analisis pada tiga variabel *controllable* yang paling berpengaruh terhadap kualitas perimeter bukaan tambang bawah tanah, yaitu *Rock Mass Classification* (Q-Value) sebagai representasi kondisi geoteknik, *Perimeter Powder Factor* (PPF) sebagai indikator energi peledakan pada perimeter dan *Confinement Factor* (C) sebagai representasi kondisi pengekanan massa batuan. Pendekatan serupa dengan mengombinasikan parameter

massa batuan dan desain peledakan telah diterapkan pada sejumlah studi tambang bawah tanah untuk memprediksi dan mengendalikan *overbreak-underbreak*.

Fenomena *overbreak* dan *underbreak* pada penggalan tambang bawah tanah telah banyak diteliti karena berdampak langsung terhadap stabilitas bukaan, kebutuhan *ground support*, serta biaya operasional. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa terjadinya *overbreak* dipengaruhi oleh interaksi antara karakteristik massa batuan, parameter peledakan, serta ketelitian pengeboran (Dey dan Murthy, 2012; Foderà dkk., 2020; Ganesan dan Mishra, 2021). Studi pada beberapa tambang bawah tanah di Indonesia juga menunjukkan adanya korelasi antara klasifikasi massa batuan dan tingkat *overbreak* yang terjadi (Sari dan Octaviane, 2016; Halimin, Hasan dan Winaswangusti, 2018). Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk memprediksi *overbreak* pada penggalan bawah tanah, mulai dari metode empiris, pendekatan statistik, hingga pemanfaatan kecerdasan buatan untuk meningkatkan akurasi prediksi (Akbar dkk., 2024). Upaya untuk meminimalkan *overbreak* dapat dilakukan melalui optimasi parameter peledakan dan pemodelan prediktif yang mempertimbangkan kondisi geologi serta karakteristik massa batuan (Liu dkk., 2023).

Analisis regresi merupakan metode statistik yang umum digunakan untuk memodelkan hubungan antara variabel dependen dan beberapa variabel independen. Dalam penelitian ini digunakan *Multiple Regression Analysis* (MRA), yaitu bentuk regresi linier yang memungkinkan evaluasi pengaruh simultan sejumlah variabel independen terhadap variabel dependen (Kutner dkk., 2005; Montgomery, Peck dan Vining, 2012). Sebelum pemodelan dilakukan, seluruh variabel input diuji untuk memastikan kelayakan data serta pemenuhan asumsi regresi sehingga hasil analisis bersifat valid dan dapat diandalkan.

Proses pengujian data dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS versi 27, meliputi uji linearitas, uji normalitas, uji heteroskedastisitas, uji multikolinearitas, serta uji signifikansi. Setelah seluruh data dinyatakan memenuhi persyaratan uji tersebut, dilakukan analisis regresi linier berganda. Hasil model regresi selanjutnya digunakan sebagai input

dalam simulasi Monte Carlo sebanyak 5.000 kali, yang memungkinkan dilakukan prediksi dan optimasi kegiatan peledakan di masa mendatang agar nilai *overbreak* dan *underbreak* dapat dikendalikan di bawah 10%.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan pemodelan prediktif untuk mengevaluasi pengaruh parameter geoteknik dan peledakan terhadap *overbreak* dan *underbreak* pada pengembangan bukaan tambang bawah tanah. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *Q-Value*, PPF, dan *C*, sedangkan variabel terikat adalah persentase *overbreak* dan *underbreak*. Variabel yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi parameter geoteknik dan parameter peledakan yang diketahui memiliki pengaruh signifikan terhadap terjadinya *overbreak* pada penggalian bawah tanah (Mohammadi dan Azad, 2020).

Q-Value ditentukan menggunakan sistem klasifikasi massa batuan *Q-system* yang dikembangkan oleh Ziebarth dan Corkum (2024), dengan persamaan:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{1}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \dots\dots\dots(1)$$

Q bersifat tidak berdimensi dan merepresentasikan kualitas massa batuan di sekitar bukaan tambang. *Q-value* digunakan sebagai indikator kondisi geoteknik yang mempengaruhi stabilitas perimeter bukaan dan respons massa batuan terhadap energi peledakan.

PPF didefinisikan sebagai rasio jumlah bahan peledak perimeter terhadap volume batuan yang digali (kg/m^3) dan digunakan sebagai indikator intensitas energi peledakan pada perimeter bukaan (Armaghani dkk., 2025), sedangkan *C* merepresentasikan tingkat pengekanan massa batuan di sekitar bukaan yang mempengaruhi respons batuan terhadap energi peledakan (Brady dan Brown, 2006). Peningkatan energi peledakan dapat memperluas zona kerusakan batuan di sekitar bukaan sehingga berpotensi meningkatkan terjadinya *overbreak* pada dinding bukaan (Zulfahmi, 2013). Hubungan antara parameter tersebut dan respon *overbreak-underbreak*

dimodelkan menggunakan MRA untuk mengevaluasi pengaruh simultan variabel independen, dengan terlebih dahulu memastikan pemenuhan asumsi regresi linier (Montgomery, Peck dan Vining, 2012). Selanjutnya, simulasi Monte Carlo diterapkan untuk menganalisis pengaruh ketidakpastian parameter input terhadap hasil prediksi secara probabilistik (Yi dkk., 2025).

Analisis regresi linier berganda digunakan untuk mengevaluasi pengaruh simultan beberapa variabel bebas terhadap variabel terikat. Analisis hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat dalam penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan statistik untuk mengidentifikasi pengaruh parameter geoteknik dan parameter peledakan terhadap nilai *overbreak* (Samsul, 2024). Penggunaan metode statistik dalam penelitian ini mengacu pada prinsip-prinsip analisis data kuantitatif yang bertujuan menghasilkan model yang valid dan reliabel (Fitri, 2023). Selain itu, pendekatan regresi masih banyak digunakan dalam studi peledakan bawah tanah karena kemudahannya dalam interpretasi hubungan antarvariabel (Mohammadi dan Azad, 2020). Pemodelan prediktif digunakan untuk mengevaluasi pengaruh parameter peledakan dan karakteristik massa batuan terhadap deviasi geometri bukaan, sebagaimana pendekatan optimasi peledakan yang telah diterapkan dalam penelitian sebelumnya (Liu dkk., 2024). Parameter geometri peledakan seperti *burden*, *spacing*, kedalaman lubang, dan distribusi bahan peledak memiliki pengaruh terhadap kualitas hasil peledakan serta potensi terjadinya *overbreak* pada dinding bukaan (Mahardi, 2024).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Klasifikasi Massa Batuan

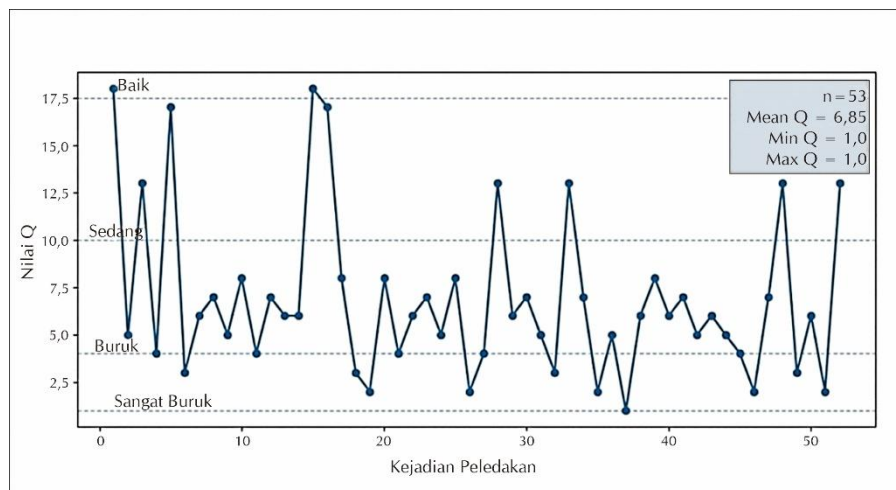
Klasifikasi massa batuan di lokasi penelitian menunjukkan variasi kualitas massa batuan dari kelas sedang hingga buruk (Gambar 1). Rentang *Q-Value* yang bervariasi ini mencerminkan heterogenitas kondisi geoteknik yang berpengaruh terhadap respons massa batuan terhadap energi peledakan, khususnya stabilitas perimeter bukaan dan potensi terjadinya *overbreak*.

PF merupakan parameter penting yang merepresentasikan distribusi energi bahan peledak terhadap volume batuan yang digali sehingga sangat mempengaruhi hasil fragmentasi dan kualitas hasil peledakan (Agyei dan Nkrumah, 2021). Nilai PF pada *development* tambang bawah tanah berada di bawah batas maksimum 2 kg/ton sebagaimana direkomendasikan untuk bukaan bawah tanah (Kahfi, Santoso dan Arief, 2024), namun distribusinya menunjukkan variasi antar *heading* (Gambar 2). Variasi ini mengindikasikan perbedaan distribusi energi peledakan yang berpotensi memengaruhi kualitas hasil penggalian ketika dikombinasikan dengan kondisi massa batuan yang tidak seragam. PF merupakan parameter penting yang

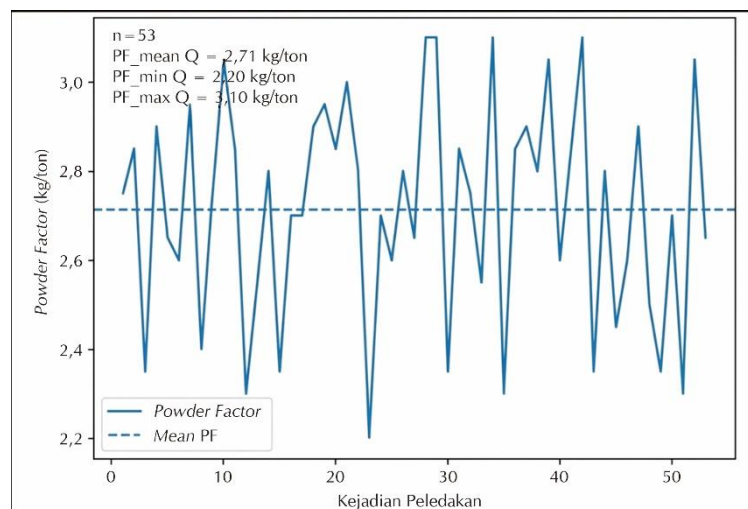
merepresentasikan distribusi energi peledakan terhadap volume batuan yang digali. Nilai PF yang tidak terkontrol dapat meningkatkan risiko *overbreak*, terutama pada kondisi massa batuan dengan kualitas rendah (Lawal, 2021).

Perimeter Powder Factor

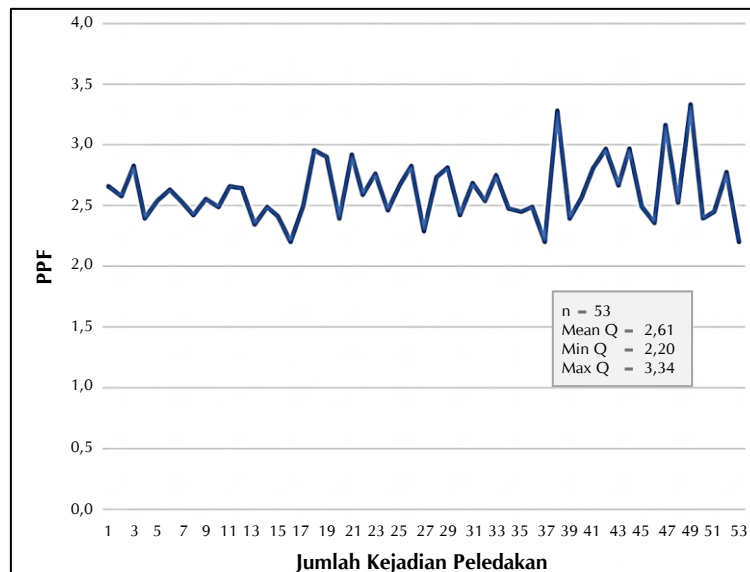
Distribusi PPF pada area penelitian memperlihatkan variasi intensitas energi peledakan di zona perimeter (Gambar 3). Nilai PPF yang relatif tinggi pada beberapa *heading* mengindikasikan peningkatan risiko kerusakan dinding bukaan, terutama pada kondisi massa batuan dengan kualitas rendah, sehingga PPF menjadi parameter kunci dalam pengendalian *overbreak* (Taheri dkk., 2025).



Gambar 1. Distribusi Q-Value dengan nilai klasifikasi massa batuan



Gambar 2. Distribusi PF



Gambar 3. Distribusi PPF

Powder Factor (PF)

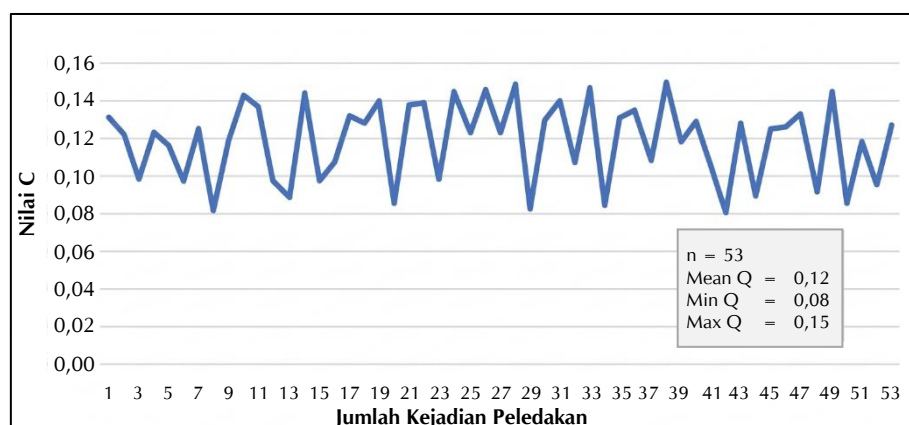
Confinement factor

Nilai C menunjukkan variasi tingkat pengekanan massa batuan akibat perbedaan geometri bukaan dan panjang lubang ledak (Gambar 4). Kondisi C yang lebih tinggi cenderung meningkatkan kebutuhan energi peledakan, namun apabila tidak dikontrol dengan tepat dapat meningkatkan potensi *overbreak* (Foderà *dkk.*, 2020).

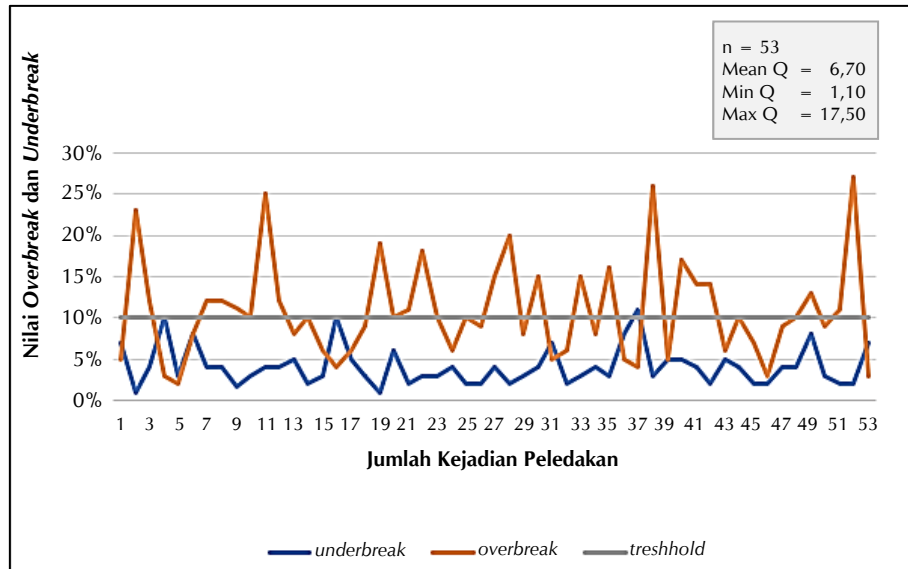
Overbreak dan underbreak

Dari 53 kegiatan peledakan yang dianalisis, nilai rata-rata *overbreak* tercatat sebesar 11%,

dengan 57% kejadian melebihi ambang batas perusahaan sebesar 10% (Gambar 5). Sebaliknya, nilai rata-rata *underbreak* relatif rendah, yaitu 4%, dengan hanya 5,6% kejadian yang melampaui batas tersebut. Hasil ini menunjukkan bahwa permasalahan utama pada tahap pengembangan akses lebih didominasi oleh kelebihan energi peledakan dan/atau kondisi massa batuan tertentu dibandingkan kekurangan energi peledakan. Hal ini juga sesuai dengan yang disampaikan Chen *dkk.*, (2021) bahwa *overbreak* pada penggalian bawah tanah dipengaruhi oleh interaksi antara parameter peledakan dan karakteristik massa batuan di sekitar bukaan.



Gambar 4. Distribusi Nilai C



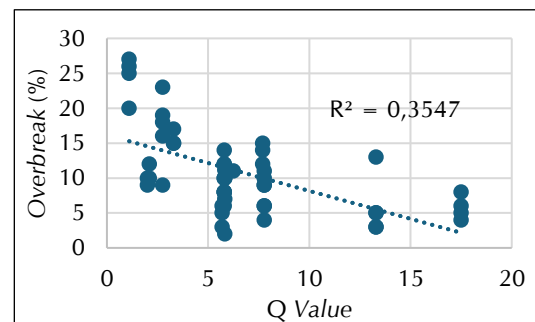
Gambar 5. Distribusi overbreak dan underbreak

Pengaruh Variabel Bebas terhadap Variabel Terikat

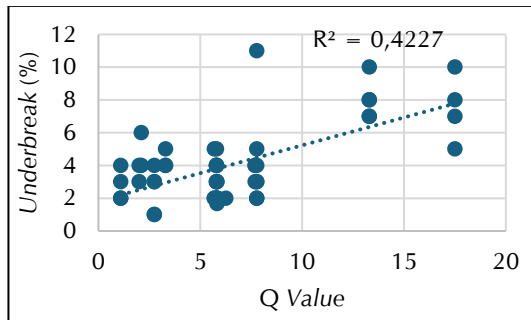
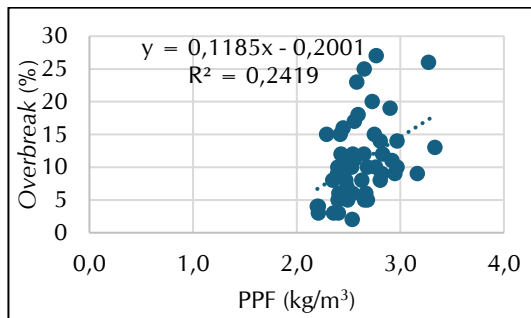
Pengaruh antara variabel bebas dan variabel terikat dianalisis menggunakan analisis regresi sederhana, dengan tujuan untuk mengetahui besarnya pengaruh masing-masing variabel bebas terhadap variabel terikat. Berdasarkan hasil analisis, hubungan antara *Q-Value* dan *overbreak* ditunjukkan pada Gambar 6, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,3825. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa sekitar 38% variasi *overbreak* dapat dijelaskan oleh variasi *Q-Value* secara individual. Berdasarkan kriteria interpretasi kekuatan korelasi, nilai koefisien korelasi absolut ($|r|$) pada rentang 0,30–0,50 dikategorikan sebagai korelasi sedang (Fitri, 2023). Secara teknis, hubungan ini menunjukkan bahwa *Q-Value* yang rendah (massa batuan berkualitas buruk) cenderung menghasilkan *overbreak* yang lebih tinggi dan konsisten dengan teori kekuatan massa batuan. Batuan dengan tingkat rekahan dan diskontinuitas tinggi lebih rentan terhadap pelepasan energi peledakan yang berlebihan.

Pada Gambar 7, *Q-value* memiliki pengaruh sebesar 42% terhadap *underbreak* dengan nilai R^2 sebesar 0,4228, yang juga menunjukkan korelasi sedang. Hasil ini mengindikasikan bahwa kondisi massa batuan berperan penting tidak hanya terhadap penggalan berlebih

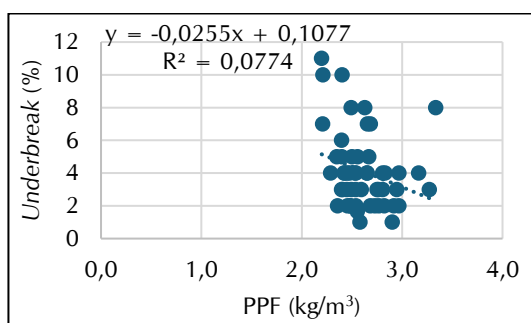
(*overbreak*), tetapi juga terhadap kekurangan penggalan (*underbreak*). Massa batuan dengan kualitas rendah cenderung mengalami respons peledakan yang tidak seragam, sehingga memengaruhi efektivitas pelepasan batuan pada perimeter bukaan.

Gambar 6. Perbandingan overbreak dan *Q-value*

Pada Gambar 8, PPF memiliki pengaruh sebesar 24% terhadap *overbreak* dengan nilai R^2 sebesar 0,2419, yang menunjukkan korelasi lemah ($|r| < 0,30$). Meskipun demikian, secara teknis peningkatan PPF merepresentasikan peningkatan intensitas energi peledakan pada perimeter, yang berpotensi meningkatkan tingkat kerusakan dinding bukaan apabila tidak diimbangi dengan kondisi massa batuan yang memadai.

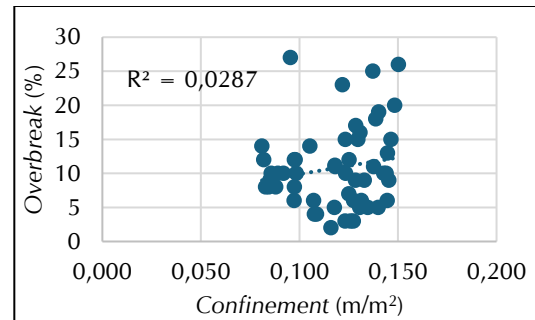
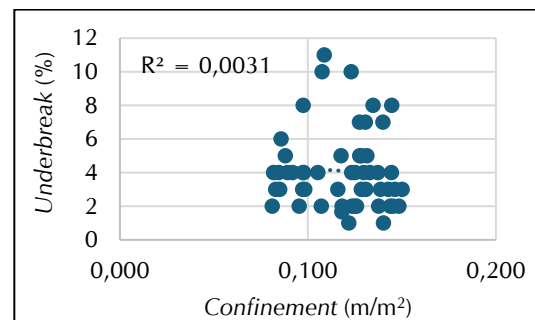
Gambar 7. Perbandingan *underbreak* dan *Q-value*Gambar 8. Perbandingan PPF vs *overbreak*

Sebaliknya, hubungan antara PPF dan *underbreak* (Gambar 9) menunjukkan nilai R^2 sebesar 0,0774, yang mengindikasikan hubungan sangat lemah dan kontribusi yang relatif kecil terhadap variasi *underbreak* secara individual.

Gambar 9. Perbandingan PPF dan *underbreak*

Berdasarkan Gambar 10, *C* memiliki pengaruh sebesar 18% terhadap *overbreak* dengan nilai R^2 sebesar 0,1896, yang menunjukkan korelasi lemah. Pada Gambar 11, *C* memiliki pengaruh sebesar 2% terhadap *underbreak* dengan nilai R^2 sebesar 0,0231, yang menunjukkan korelasi

sangat lemah. Hal ini mengindikasikan bahwa tingkat pengekanan massa batuan secara individual tidak menjadi faktor dominan dalam mengontrol *underbreak*, namun tetap memiliki kontribusi terhadap peningkatan *overbreak* apabila energi peledakan tidak terdistribusi secara optimal.

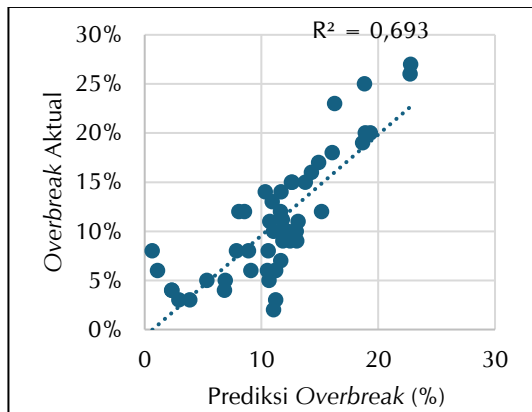
Gambar 10. Perbandingan *confinement* dan *overbreak*Gambar 11. Perbandingan *confinement* dan *underbreak*

Hasil Analisis Regresi Multivariat

Analisis regresi dilakukan setelah data memenuhi asumsi *Best Linear Unbiased Estimator* (BLUE) berdasarkan teorema Gauss–Markov. Uji asumsi klasik meliputi normalitas residual, multikolinearitas, homoskedastisitas, dan autokorelasi. Hasil pengujian menunjukkan residual terdistribusi normal, tidak terdapat multikolinearitas ($VIF < \text{batas kritis}$), varians residual homogen, serta tidak terjadi autokorelasi. Dengan demikian, model regresi dinyatakan layak untuk analisis lebih lanjut.

Model prediksi *overbreak* disusun menggunakan SPSS 27 (Gambar 12) dengan

nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,693, yang menunjukkan bahwa 69,3% variasi *overbreak* dapat dijelaskan oleh *Q-Value*, PPF, dan C, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model.



Gambar 12. Perbandingan prediksi *overbreak* dan *overbreak* aktual

Hasil uji F menunjukkan bahwa model regresi signifikan secara simultan pada tingkat kepercayaan 95% ($p < 0,05$). Uji t menunjukkan bahwa variabel dengan nilai $p < 0,05$ berpengaruh signifikan secara parsial terhadap *overbreak*. Koefisien *Q-Value* bernilai negatif, mengindikasikan bahwa peningkatan kualitas massa batuan menurunkan *overbreak*, sedangkan koefisien PPF dan C bernilai positif, yang menunjukkan bahwa peningkatan energi peledakan perimeter dan tingkat keterungkungan cenderung meningkatkan *overbreak*.

Secara keseluruhan, model regresi tidak hanya signifikan secara statistik, tetapi juga konsisten

dengan mekanisme geoteknik dan peledakan pada tambang bawah tanah. Berdasarkan hasil uji asumsi klasik sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1, seluruh asumsi regresi linear terpenuhi sehingga model memenuhi kriteria *Best Linear Unbiased Estimator* (BLUE).

Variabel independen dinyatakan berpengaruh signifikan apabila nilai signifikansi lebih kecil dari 0,05. Hal yang sama berlaku pada hasil uji t, yaitu setiap variabel dinyatakan berpengaruh jika nilai signifikansinya di bawah 0,05. Uji t dinyatakan diterima apabila setidaknya satu variabel input memiliki pengaruh signifikan terhadap variabel dependen yaitu *overbreak*. Persamaan regresi yang diperoleh dari hasil analisis ditunjukkan pada persamaan (2) berikut:

$$OB\% = -6.920 + (6.137 \cdot PPF) - (0.939 \cdot Q) + (69.527 \cdot C) \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan:

OB = *Overbreak*

Q = *-Q-Value*

PPF = *Perimeter powder factor*

C = *Confinement factor*

Nilai R^2 (Gambar 13) untuk variabel terikat *underbreak* adalah sebesar 0,470 (korelasi sedang), yang menunjukkan bahwa sebesar 47% variasi *underbreak* dipengaruhi oleh variabel bebas, sedangkan sisanya sebesar 53% dipengaruhi oleh faktor lain di luar parameter input yang digunakan. Dalam penelitian ini, tiga variabel yang digunakan dalam model prediksi *underbreak* adalah *Q-Value*, PPF, dan C. Persamaan regresi hasil analisis untuk variabel *underbreak* disajikan pada persamaan (3).

Tabel 1. Ringkasan uji asumsi klasik model regresi *overbreak*

Uji asumsi klasik	Metode pengujian	Kriteria penerimaan	Hasil pengujian	Keterangan
Normalitas	Uji Kolmogorov–Smirnov terhadap residual	Sig. > 0,05	Sig. > 0,05	Residual terdistribusi normal
Multikolinearitas	<i>Variance Inflation Factor</i> (VIF)	VIF < 10	Seluruh VIF < 10	Tidak terjadi multikolinearitas
Heteroskedastisitas	Uji Glejser	Sig. > 0,05	Sig. > 0,05	Tidak terjadi heteroskedastisitas
Autokorelasi	Uji Durbin–Watson	$-2 < DW < +2$	DW berada dalam rentang	Tidak terjadi autokorelasi
Linearitas	<i>Scatter plot residual</i>	Pola acak	Pola acak	Hubungan linier terpenuhi

$$UB\% = 7.193 + (0.326*Q) - (1.668*PPF) - (7.448*C.) \dots\dots\dots(3)$$

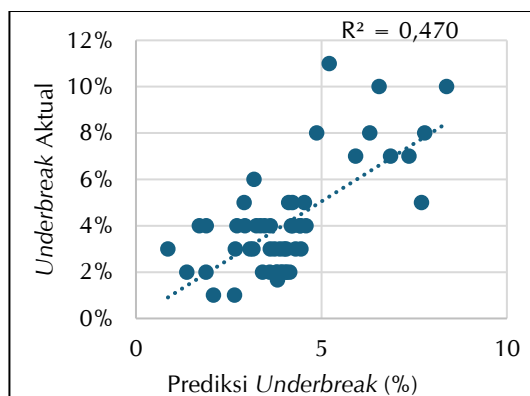
Keterangan:

UB = *Underbreak*

Q = *Q-Value*

PPF = *Perimeter powder factor*

C = *Confinement factor*



Gambar 13. Perbandingan prediksi *underbreak* dan *underbreak* aktual

Persamaan regresi (3) memiliki nilai R^2 sebesar 0,470, yang menunjukkan bahwa sebesar 47% variasi *underbreak* dipengaruhi oleh variabel *input* yang digunakan dalam model. Berdasarkan persamaan tersebut, hanya variabel *Q-Value* yang menunjukkan pengaruh signifikan terhadap variabel dependen, yang ditunjukkan oleh nilai signifikansi kurang dari 0,05 pada tabel koefisien. Sementara itu, variabel lainnya seperti PPF dan C tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap model prediksi *underbreak*.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan sebelumnya yang menyatakan bahwa kualitas massa batuan dan intensitas energi peledakan perimeter merupakan faktor dominan dalam pembentukan *overbreak*. Chen dkk. (2021) menunjukkan bahwa pengendalian *overbreak* pada terowongan sangat dipengaruhi oleh kondisi geoteknik dan desain peledakan, sementara Jang, Kawamura, dan Shinji (2019) menekankan pentingnya faktor resistansi *overbreak* dalam desain *blasting* bawah tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan intensitas energi peledakan pada perimeter berpotensi meningkatkan *overbreak*, yang juga dilaporkan pada penelitian sebelumnya menggunakan pendekatan

machine learning dalam analisis *overbreak* pada terowongan (He, Armaghani dan Lai, 2023).

Simulasi Monte Carlo

Monte Carlo didefinisikan sebagai teknik pengambilan sampel statistik yang digunakan untuk mengestimasi solusi dari permasalahan kuantitatif. Metode ini merupakan pendekatan analisis numerik yang melibatkan pengambilan sampel acak secara eksperimental (Putra, Apridiansyah dan Sahputra, 2022). Dalam penelitian ini, metode Monte Carlo diterapkan menggunakan perangkat lunak SPSS 27. Hasil simulasi Monte Carlo terhadap *overbreak* dengan 5.000 variabel acak, menghasilkan nilai rata-rata *overbreak* sebesar 7,41%. Namun demikian, masih terdapat cukup banyak kejadian *overbreak* yang melebihi batas 10%, dengan distribusi hasil sebesar 51,2% berada dalam ambang batas yang ditetapkan, 35,8% melebihi ambang batas, serta 13% lainnya menunjukkan kejadian *underbreak*.

Underbreak yang terjadi pada simulasi Monte Carlo dengan 5.000 variabel acak, memiliki nilai rata-rata sebesar 5,37% dan tidak terdapat kejadian *underbreak* yang melebihi 10%. Peningkatan nilai rata-rata *underbreak* dari 4% menjadi 5,7% disebabkan oleh rentang variabel pada simulasi Monte Carlo yang lebih luas dibandingkan dengan variabel input aktual; sebagai contoh, *Q-Value* pada simulasi berkisar antara 1 hingga 20, sedangkan pada data input hanya berkisar antara 1 hingga 17,5. Demikian pula, variabel PPF pada simulasi berada pada rentang 1,8 hingga 3,5 kg/m³, sementara pada data input hanya berkisar antara 2,2 hingga 3,3 kg/m³.

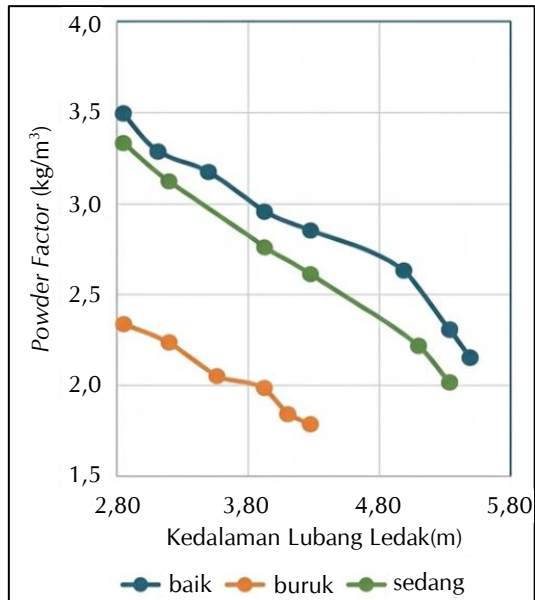
Penerapan simulasi Monte Carlo dalam penelitian ini bertujuan untuk mengakomodasi ketidakpastian variabel input dan menghasilkan prediksi yang bersifat probabilistik. Pendekatan ini telah banyak digunakan dalam analisis sistem yang kompleks dan mengandung variabilitas tinggi (Putra, Apridiansyah dan Sahputra, 2022).

Hasil Distribusi Data

Hasil variabel acak dari simulasi Monte Carlo juga akan disajikan dalam bentuk tabel sehingga parameter peledakan dapat di analisis dan

digunakan sebagai acuan dalam perencanaan peledakan pada kegiatan selanjutnya.

Heading Berukuran 6 x 6



Gambar 14. Rekomendasi jumlah bahan peledak (*charge*) dan kedalaman lubang ledak pada pola peledakan 6x6.

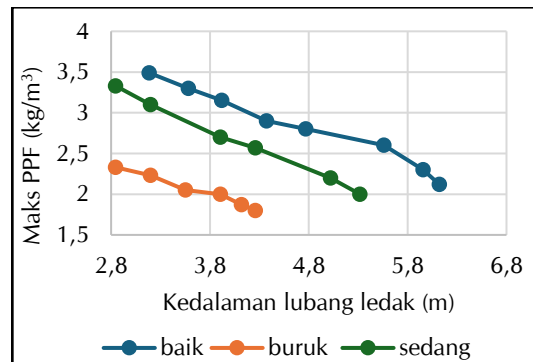
Dari hasil simulasi, diperoleh rekomendasi PPF terhadap kedalaman lubang ledak. Untuk *heading* berukuran 6x6, rekomendasi nilai PPF ditunjukkan pada Gambar 14, dengan contoh penerapannya disajikan pada Tabel 2. Rekomendasi diberikan untuk kondisi batuan *fair-good* (sedang), yaitu dengan kedalaman lubang ledak 4,3 m, PPF maksimum 2,6 kg/m³, densitas bahan peledak 0,65 gr/cc, berat muatan bahan peledak 5,1 kg, jarak antar lubang (*spacing*) 0,8 m, serta jarak ke baris berikutnya (*spacing to next row*) 0,6 m.

Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh rekomendasi nilai PPF terhadap kedalaman lubang ledak. Untuk *heading* berukuran 5,5 x 6, rekomendasi PPF ditunjukkan pada Gambar 15, dengan contoh penerapan pada Tabel 3. Rekomendasi tersebut ditetapkan untuk kondisi massa batuan buruk (*poor ground condition*), yaitu kedalaman lubang ledak 3,9 m, nilai maksimum PPF 1,8 kg/m³, densitas bahan peledak 0,65 gr/cc, berat bahan peledak per lubang 4,7 kg, dengan spasi perimeter 0,8 m dan jarak spasi antara perimeter ke baris berikutnya sebesar 0,8 m.

Tabel 2. Rekomendasi geometri perimeter 6x6

Parameter	Ukuran
Kedalaman lubang ledak	4,3 m
PPF maksimum	2,6 kg/m ³
Densitas bahan peledak	0,65 gr/cc
Berat bahan peledak per lubang	5,1 kg
Spasi lubang perimeter	0,8 m
Spasi antara lubang perimeter dan baris berikutnya	0,6 m

Heading Berukuran 5,5 x 6



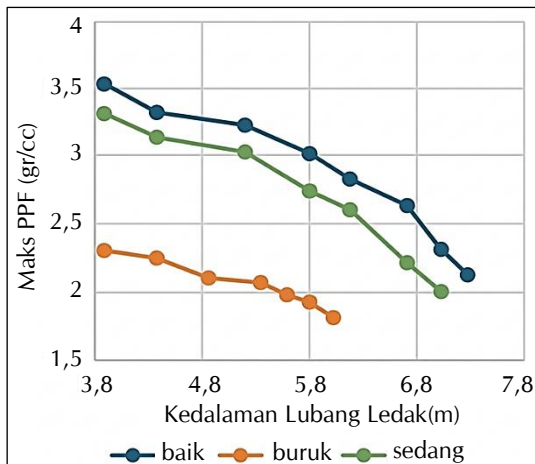
Gambar 15. Rekomendasi jumlah bahan peledak (*charge*) dan kedalaman lubang ledak pada pola peledakan 5,5x6

Tabel 3. Rekomendasi geometri perimeter 5,5x6

Parameter	Ukuran
Kedalaman lubang ledak	3,9 m
PPF maksimum	1,8 kg/m ³
Densitas bahan peledak	0,65 gr/cc
Berat bahan peledak per lubang	4,7 kg
Spasi lubang perimeter	0,8 m
Spasi antara lubang perimeter dan baris berikutnya	0,8 m

Dari hasil simulasi, diperoleh rekomendasi nilai PPF terhadap kedalaman lubang ledak. Untuk *heading* berukuran 7x7, rekomendasi PPF ditunjukkan pada Gambar 16, dengan contoh penerapan pada Tabel 4. Rekomendasi diberikan untuk kondisi massa batuan yang baik (*good ground condition*), yaitu kedalaman lubang ledak 4,4 m, nilai maksimum PPF sebesar 3,3 kg/m³, densitas bahan peledak 0,65 gr/cc, berat bahan peledak per lubang 5,3 kg, dengan jarak antar lubang perimeter (*perimeter spacing*) 0,6 m dan jarak antara lubang perimeter ke baris berikutnya sebesar 0,6 m.

Heading Berukuran 7x7

Gambar 16. Rekomendasi jumlah bahan peledak (*charge*) dan kedalaman lubang ledak pada pola peledakan 7 x 7

Tabel 4. Rekomendasi geometri perimeter 7 x 7

Parameter	Ukuran
Kedalaman lubang ledak	4,4 m
PPF maksimum	3,3 kg/m ³
Densitas bahan peledak	0,65 gr/cc
Berat bahan peledak per lubang	5,3 kg
Spasi lubang perimeter	0,6 m
Spasi antara lubang perimeter dan baris berikutnya	0,6 m

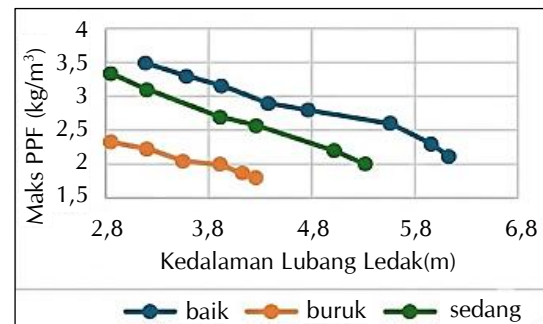
Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh rekomendasi PPF terhadap kedalaman lubang ledak. Untuk *heading* berukuran 5,5 x 6,5, rekomendasi PPF ditunjukkan pada Gambar 17, dengan contoh penerapan pada Tabel 5. Rekomendasi yang dihasilkan untuk kondisi massa batuan buruk (*poor ground condition*) adalah kedalaman lubang ledak 3,9 m, PPF maksimum 2 kg/m³, densitas bahan peledak 0,65 gr/cc, berat muatan bahan peledak per lubang 4,7 kg, dengan jarak antar lubang perimeter 0,6 m dan jarak dari lubang perimeter ke baris berikutnya 1 m.

Pengaruh Penyimpangan Lubang Ledak

Salah satu faktor yang tidak dapat diabaikan dalam terjadinya *overbreak* dan *underbreak* adalah kesalahan manusia (*human error*). Dalam hal ini, kesalahan dapat muncul akibat penyimpangan (*deviation*) pada saat pengeboran lubang ledak, khususnya pada lubang perimeter. PTFI memiliki standar

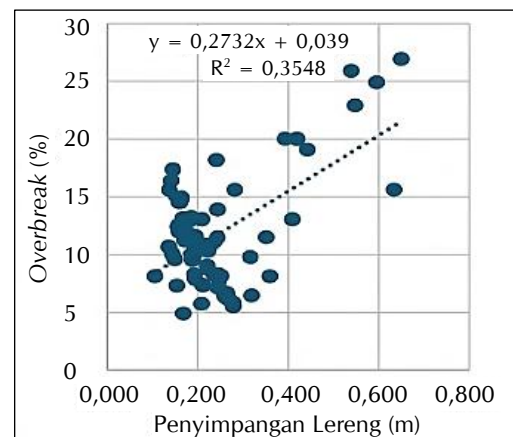
tersendiri terkait penyimpangan lubang ledak, yaitu sebesar 10%, yang berarti untuk kedalaman pengeboran rata-rata 4 m, penyimpangan maksimum yang diperbolehkan adalah 0,4 m. Penyimpangan yang terjadi selama kegiatan pengeboran memiliki pengaruh sebesar 35% terhadap *overbreak*, yang ditunjukkan oleh nilai R^2 sebesar 0,3548 (korelasi sedang) ditunjukkan pada Gambar 18.

Heading Berukuran 5,5x6,5

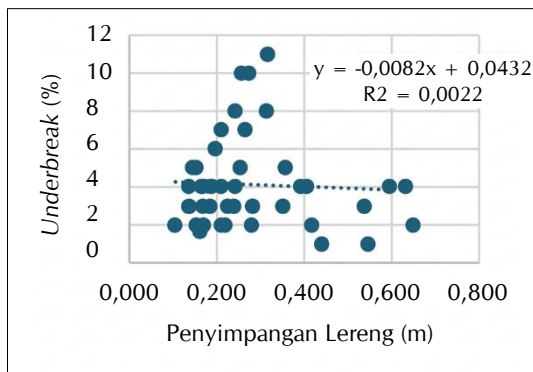
Gambar 17. Rekomendasi jumlah bahan peledak (*charge*) dan kedalaman lubang ledak pada pola peledakan 5,5 x 6,5

Tabel 5. Rekomendasi geometri perimeter 5,5x6,5

Parameter	Ukuran
Kedalaman lubang ledak	3,9 m
PPF maksimum	2 kg/m ³
Densitas bahan peledak	0,65 gr/cc
Berat bahan peledak per lubang	4,7 kg
Spasi lubang perimeter	0,6 m
Spasi antara lubang perimeter dan baris berikutnya	1 m

Gambar 18. Perbandingan penyimpangan lereng dan *overbreak*

Sementara itu, pengaruh penyimpangan lubang ledak terhadap *underbreak* hanya sebesar 0,2%, dengan nilai R^2 sebesar 0,0022 (korelasi sangat lemah) ditunjukkan pada Gambar 19.



Gambar 19. Perbandingan penyimpangan lereng dan *underbreak*

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini mengkaji upaya minimalisasi *overbreak* dan *underbreak* pada tambang bawah tanah Kucing Liar PTFI melalui pemodelan prediktif dan optimasi parameter peledakan. Berdasarkan analisis regresi linear terhadap data peledakan bulan November 2024, diperoleh model yang menggambarkan hubungan antara parameter peledakan dan tingkat *overbreak* serta *underbreak*.

Hasil analisis menunjukkan bahwa *overbreak* dipengaruhi secara signifikan oleh PPF, *Q-Value*, dan *C*. Urutan pengaruh faktor ditentukan berdasarkan nilai koefisien regresi terstandarisasi, yang mengindikasikan bahwa PPF dan kondisi massa batuan merupakan faktor dominan terhadap terjadinya *overbreak*. Sementara itu, *underbreak* dipengaruhi oleh *Q-Value*, PPF, dan *C*.

Model regresi yang diperoleh adalah:

$$OB\% = -6,920 + (6,137 \times PPF) - (0,939 \times Q) + (69,527 \times C)$$

$$UB\% = 7,193 + (0,326 \times Q) - (1,668 \times PPF) - (7,448 \times C)$$

Nilai koefisien determinasi menunjukkan bahwa kedua model memiliki kemampuan

prediksi yang memadai dan layak digunakan sebagai dasar optimasi parameter peledakan.

Optimasi menggunakan simulasi Monte Carlo sebanyak 5.000 iterasi menghasilkan penurunan nilai rata-rata *overbreak* menjadi 7,41%, berada di bawah ambang batas perusahaan. Nilai *underbreak* meningkat menjadi 5,37%, namun masih berada dalam batas toleransi operasional (<10%). Kondisi ini menunjukkan adanya *trade-off* optimasi, di mana pengurangan *overbreak* dicapai dengan kompromi berupa peningkatan *underbreak* yang masih dapat diterima secara teknis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih dan penghargaan diberikan kepada pihak perusahaan yang telah memberikan pengalaman lapangan sehingga penelitian ini dapat terlaksana. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat dan berkontribusi bagi dunia pendidikan dan industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Agyei, G. dan Nkrumah, M.O. (2021) "A review on the prediction and assessment of powder factor in blast fragmentation," *Nigerian Journal of Technology*, 40(2), hal. 275–283. Tersedia pada: <https://doi.org/https://doi.org/10.4314/njt.v40i2.13>.
- Akbar, S. dkk. (2024) "Prediksi *overbreak* pada peledakan tambang bawah tanah menggunakan metode empirik, statistik dan artificial intelligence," *Jurnal Pertambangan*, 8(2), hal. 107–114. Tersedia pada: <https://doi.org/10.36706/jp.v8i2.2332>.
- Brady, B.H.G. dan Brown, E.T. (2006) *Rock mechanics for underground mining*. 3 ed. Dordrecht: Springer.
- Chen, J. dkk. (2021) "Experimental and numerical investigation on *overbreak* control considering the influence of initial support in tunnels," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 115, hal. 104017. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104017>.
- Dey, K. dan Murthy, V.M.S.R. (2012) "Prediction of blast-induced *overbreak* from uncontrolled burn-cut blasting in tunnels driven through medium rock class," *Tunnelling and*

- Underground Space Technology*, 28, hal. 49–56. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.09.004>.
- Fitri, A. (2023) *Dasar-dasar statistika untuk penelitian*. Medan: Yayasan Kita Menulis.
- Foderà, G.M. dkk. (2020) "Factors influencing overbreak volumes in drill-and-blast tunnel excavation. A statistical analysis applied to the case study of the Brenner Base Tunnel – BBT," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 105, hal. 103475. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103475>.
- Ganesan, G. dan Mishra, A.K. (2021) "Assessment of drilling inaccuracy and delineation of constructional and geological overbreak," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 108, hal. 103730. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103730>.
- Halimin, M.Y., Hasan, H. dan Winaswangusti, A.U. (2018) "Studi korelasi rock mass rating (RMR) dan overbreak tambang emas Toguraci PT Nusa Halmahera Minerals di Halmahera Utara," *Jurnal Teknologi Mineral FT UNMUL*, 6(1), hal. 21–26.
- He, B., Armaghani, D.J. dan Lai, S.H. (2023) "Assessment of tunnel blasting-induced overbreak: a novel metaheuristic-based random forest approach," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 133, hal. 104979. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104979>.
- Armaghani, D. J. dkk. (2025) "Estimation of powder factor in mine blasting: feasibility of tree-based predictive models," *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 8(2), hal. 138. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.1007/s41939-024-00725-8>.
- Jang, H., Kawamura, Y. dan Shinji, U. (2019) "An empirical approach of overbreak resistance factor for tunnel blasting," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 92, hal. 103060. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103060>.
- Kahfi, M., Santoso, E. dan Arief, M.Z. (2024) "Analisis nilai powder factor untuk optimalisasi kegiatan peledakan di area pitutupan PT Saptaindra Sejati," *Jurnal Himasapta*, 9(1), hal. 37. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.20527/jhs.v9i1.12181>.
- Kutner, M.H. dkk. (2005) *Applied linear statistical models*. 5 ed. New York: McGraw-Hill/Irwin.
- Lawal, A.I. (2021) "A new modification to the Kuz-Ram model using the fragment size predicted by image analysis," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 138, hal. 104595. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.1016/j.ijmms.2020.104595>.
- Liu, Y. dkk. (2023) "Minimization of overbreak in different tunnel sections through predictive modeling and optimization of blasting parameters," *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1255384>.
- Liu, Yaosheng dkk. (2024) "An AI-powered approach to improving tunnel blast performance considering geological conditions," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 144, hal. 105508. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105508>.
- Mahardi, Z.K. (2024) *Evaluasi geometri pengeboran dan peledakan untuk mengurangi overbreak di tambang bawah tanah Grassberg Block Cave PT Freeport Indonesia*. UPN "Veteran" Yogyakarta.
- Mohammadi, H. dan Azad, A. (2020) "Applying rock engineering systems approach for prediction of overbreak produced in tunnels driven in hard rock," *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(3), hal. 2447–2463. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.1007/s10706-019-01161-z>.
- Montgomery, D.C., Peck, E.A. dan Vining, G.G. (2012) *Introduction to linear regression analysis*. 5 ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Mottahedi, A., Sereshki, F. dan Ataei, M. (2018) "Overbreak prediction in underground excavations using hybrid ANFIS-PSO model," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 80, hal. 1–9. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.05.023>.
- Putra, R.D., Apridiansyah, Y. dan Sahputra, E. (2022) "Penerapan Metode Monte Carlo pada Simulasi Prediksi Jumlah Calon Mahasiswa Baru Universitas Muhammadiyah Bengkulu," *Jurnal PROCESSOR*, 17(2), hal. 74–81. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.33998/processor.2022.17.2.1224>.
- Samsul, A. (2024) *Prediksi overbreak pada peledakan tambang bawah tanah menggunakan metode multiple regression analysis dan ANFIS*. Institut Teknologi Bandung.

- Sari, L.R. dan Octavianie (2016) "Analisa overbreak di Common Infrastructure Project AB Tunnel PT Freeport Indonesia," *Prosiding Seminar Nasional XI "Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi 2016 Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta*. [Preprint].
- Shi, J. dkk. (2024) "Comprehensive review of tunnel blasting evaluation techniques and innovative half porosity assessment using 3D image reconstruction," *Applied Sciences*, 14(21), hal. 9791. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/app14219791>.
- Taheri, S. dkk. (2025) "Predicting overbreak and underbreak in underground longhole stoping using meta-soft computing models," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 164, hal. 106852. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106852>.
- Yi, X. dkk. (2025) "Uncertainty quantification of rock mass discontinuity information and mechanical parameter derived from photogrammetry and Monte Carlo simulation: a case study," *Results in Earth Sciences*, 3, hal. 100060. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.rines.2025.100060>.
- Ziebarth, R.A. dan Corkum, A.G. (2024) "Probabilistic approach for Q-based ground support design," *Computers and Geotechnics*, 176, hal. 106779. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106779>.
- Zulfahmi, Z. (2013) "Prediction of rock damage zone after blasting process at several Indonesia coal mines using seismic refraction and blasting vibration data," *Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara Jalan Jenderal Sudirman*, 9(2).