

Kajian teknis biaya peledakan terhadap target fragmentasi pada proses pembongkaran batu kapur di PT Semen Padang

Technical study of blasting costs on fragmentation targets in the limestone blasting process at PT Semen Padang

Azka Noval¹, Alio Jasipto^{2*}, Naufal Permanda³

^{1,2}Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Indonesia

³PT Dahana, Indonesia

e-mail: *alio.jasipto@ta.itera.ac.id

ABSTRAK

PT Semen Padang merupakan perusahaan semen yang menjalankan kegiatan penambangan batu kapur dengan metode peledakan, di mana dalam praktik operasionalnya kerap ditemukan permasalahan berupa ketidaktercapaian target volume batuan terbongkar serta fragmentasi yang tidak memenuhi spesifikasi produksi. Penelitian ini bertujuan merancang ulang geometri peledakan yang lebih efektif untuk mencapai target pembongkaran sebesar 9.400 bcm per siklus serta menghasilkan fragmentasi dengan persentase lolos ukuran 80 cm lebih dari 80%. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif berdasarkan penerapan teori desain geometri peledakan R.L. Ash (1963), C.J. Konya (1990), *Air Decking Method* (2023), dan *Modified Available Energy* (2020), serta evaluasi fragmentasi menggunakan metode Kuznetsov-Ramler (Kuz-Ram). Tahapan penelitian meliputi studi literatur, pengumpulan data lapangan dan data pendukung, pengolahan geometri peledakan rencana, analisis volume hasil peledakan, perhitungan kebutuhan bahan peledak, dan estimasi biaya pengeboran serta peledakan. Hasil analisis menunjukkan bahwa masing-masing metode menghasilkan variasi geometri, *powder factor*, serta kualitas fragmentasi yang berbeda, sehingga memungkinkan identifikasi rancangan yang paling efisien dan sesuai dengan kondisi litologi setempat. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan pentingnya desain geometri peledakan yang tepat sebagai upaya meningkatkan efektivitas pembongkaran batu kapur, mengoptimalkan biaya operasional, dan mendukung pencapaian target produksi di PT Semen Padang.

Kata-kata kunci: Biaya; Fragmentasi; Peledakan; Volume

ABSTRACT

PT Semen Padang is a cement company that carries out limestone mining activities using the blasting method. However, its operational practices often encounter problems such as not meeting the target volume of blasted rock and fragmentation that doesn't meet production specifications. This research aims to redesign a more effective blasting geometry to achieve a mucking target of 9,400 bcm (bank cubic meters) per cycle and produce fragmentation with a percentage passing the 80 cm size of more than 80%. The research method uses a quantitative approach based on the application of blasting geometry design theories by R.L. Ash (1963), C.J. Konya (1990), the *Air Decking Method* (2023), and *Modified Available Energy* (2020), as well as fragmentation evaluation using the Kuznetsov-Ramler (Kuz-Ram) method. The research stages include a literature study, collection of fields and supporting data, processing of the planned blasting geometry, analysis of the resulting blast volume, calculation of explosive requirements, and estimation of drilling and blasting costs. The analysis results show that each method yields different variations in geometry, powder factor, and fragmentation quality, thus allowing for the identification of the most efficient design suitable for the local lithological conditions. Overall, this research underscores the importance of proper blasting geometry design as an effort to increase the effectiveness of limestone mucking, optimize operational costs, and support the achievement of production targets at PT Semen Padang.

Keywords: Blasting; Cost; Fragmentation; Volume

Submitted: 11-12-2025; Revised: 23-12-2025; Accepted: 04-02-2026; Available Online: 30-04-2026

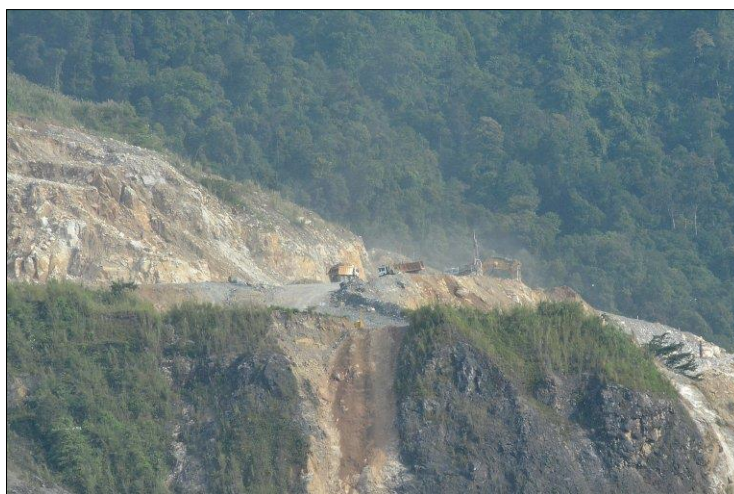
Published by: Geological Engineering, Faculty of Engineering, Lambung Mangkurat University

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

©2026, Geoparks

PENDAHULUAN

PT Semen Padang merupakan salah satu perusahaan semen tertua di Indonesia yang mengandalkan batu kapur dari wilayah Bukit Karang Putih sebagai bahan baku utama proses produksi (Novalia, Farid, & Megasukma, 2022). Pembongkaran batuan di area penambangan dilakukan melalui metode peledakan untuk mencapai efisiensi dalam penggalian dan pengangkutan material. Namun, praktik peledakan di lapangan masih menghadapi sejumlah tantangan teknis, terutama ketidaktercapaian target volume batuan terbongkar dan kualitas fragmentasi yang belum memenuhi standar operasional. Pengamatan menunjukkan bahwa fragmen batuan berukuran lebih dari 80 cm masih muncul di atas nilai toleransi yang ditetapkan perusahaan (Nilasari, Nurhakim, Riswan, & Gunawan, 2017), sehingga menghambat kinerja alat muat-angkut dan memperlambat proses pengolahan di *crusher*. Kondisi ini mengindikasikan bahwa desain geometri peledakan yang digunakan belum sepenuhnya mempertimbangkan karakteristik massa batuan dan variasi litologi yang ditemui di lapangan (Defriansyah & Yulhendra, 2018).



Sumber: Novalia et al. (2022)

Gambar 1. Batu Kapur (Limestone)

Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa geometri peledakan merupakan faktor kunci yang mengendalikan distribusi energi peledak dan hasil fragmentasi. Ash (1963) menekankan bahwa variabel *burden*, *spacing*, *stemming*, dan panjang kolom isian memiliki peranan penting dalam mengarahkan energi ledakan secara efektif (Purwanto, Syafrianto, & Herlambang, 2022). Konya dan Walter (1990, sebagai mana yang dijelaskan dalam Hidayat et al., 2022) kemudian mengembangkan pendekatan berbasis rasionalisasi energi dan proporsionalitas desain yang memungkinkan rancangan geometri lebih adaptif terhadap kondisi batuan. Dalam literatur yang lebih luas, penelitian oleh Persson et al. (1994, dalam Kahriman et al. 2017) dan Hustrulid (1999, dalam Karakus & Yilmaz, 2016) menunjukkan bahwa fragmentasi batuan tidak hanya dipengaruhi oleh geometri peledakan dan jenis bahan peledak, tetapi juga oleh kondisi geologi seperti kekompakan batuan, keberadaan diskontinuitas, dan struktur internal massa batuan.

Pendekatan modern seperti *Air Decking Method* memberikan alternatif efisiensi dengan memanfaatkan kolom udara dalam rangka meningkatkan energi pemecahan batuan tanpa penambahan bahan peledak (Mubarok, Murad, & Mukhtar, 2023). Sementara itu, metode *Modified Available Energy* (MAE) menghadirkan inovasi melalui integrasi *Blastability Index* yang dikembangkan oleh Lily (1986), sehingga rancangan peledakan lebih mencerminkan respons aktual batuan terhadap energi (Mulenga & Kaunda, 2020). Dalam aspek evaluasi fragmentasi, model Kuznetsov–Ramler (Kuz-Ram) menjadi salah satu pendekatan paling banyak digunakan untuk memprediksi ukuran fragmen rata-rata dan distribusi fragmentasi berdasarkan massa batuan dan berat bahan peledak.

Meskipun tersedia berbagai metode dan model, sebagian besar penelitian sebelumnya hanya membandingkan dua atau tiga metode desain dalam konteks geologi tertentu tanpa menguji keempat metode secara bersamaan. Selain itu, literatur yang ada lebih banyak berfokus pada evaluasi fragmentasi atau efisiensi energi secara parsial, tanpa mengintegrasikan analisis volume batuan terbongkar dan total biaya peledakan. Kesenjangan ini menunjukkan perlunya penelitian yang mampu mengombinasikan aspek teknis dan ekonomis secara simultan untuk menghasilkan rekomendasi desain peledakan yang lebih komprehensif (Palimbu & Pangkung, 2021).

Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan PT Semen Padang untuk meningkatkan efektivitas operasi peledakan guna mendukung target produksi dan efisiensi biaya operasional (Novalia, Farid, & Megasukma, 2022). Dengan meningkatnya permintaan produksi dan kondisi massa batuan yang semakin bervariasi, perusahaan memerlukan rancangan geometri peledakan yang mampu menghasilkan volume pembongkaran setidaknya 9.400 bcm per siklus serta mencapai kualitas fragmentasi yang sesuai standar, yaitu persentase lolos ukuran 80 cm lebih dari 80% (Nilasari, Nurhakim, Riswan, & Gunawan, 2017). Pemilihan rancangan peledakan yang tepat diharapkan dapat menekan biaya pengeboran, mengurangi konsumsi bahan peledak, dan meningkatkan kinerja alat muat-angkut maupun *crusher* (Karakus & Yilmaz, 2016).

Berdasarkan tinjauan teori dan identifikasi celah penelitian, penelitian ini mengusulkan evaluasi komparatif terhadap empat metode desain geometri peledakan, yaitu metode R.L. Ash (1963), C.J. Konya (1990), *Air Decking Method* (2023), dan *Modified Available Energy* (2020), dengan evaluasi kualitas fragmentasi menggunakan model Kuznetsov–Ramler. Pendekatan ini menawarkan nilai tambah karena mengintegrasikan variabel geomekanik batuan, energi peledakan, konsumsi bahan peledak, serta total biaya peledakan, sehingga memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai efektivitas tiap metode. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi perbaikan desain peledakan dan sebagai dasar penyusunan standar operasional di PT Semen Padang.

Melalui pendekatan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membandingkan geometri peledakan dari empat metode desain, memprediksi fragmentasi menggunakan model Kuz-Ram, serta menganalisis kebutuhan bahan peledak dan biaya peledakan secara komprehensif, sehingga diperoleh rancangan peledakan yang paling optimal dan sesuai dengan kebutuhan operasional perusahaan (Gezerman, 2020).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode terapan melalui pendekatan kuantitatif yang berfokus pada perancangan dan evaluasi beberapa model geometri peledakan berdasarkan kondisi geologi dan operasional penambangan batu kapur di PT Semen Padang. Seluruh proses penelitian dirancang untuk memperoleh rancangan peledakan yang paling efektif melalui kombinasi antara perhitungan matematis, analisis empiris, dan evaluasi prediktif terhadap kualitas fragmentasi serta biaya operasional.

Penelitian dimulai dengan pengumpulan data lapangan yang meliputi dimensi lubang bor (*burden* aktual, *spacing* aktual, kedalaman lubang bor, *Subdrilling*, parameter peledakan yang digunakan perusahaan, sifat fisik dan mekanik batuan, serta data historis hasil peledakan).

Terdapat dua jenis data yang harus diperoleh yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui pengukuran langsung, inspeksi kondisi jenjang, dan dokumentasi kegiatan pengeboran dan peledakan. Data sekunder dikumpulkan dari laporan produksi, laporan harian peledakan, dan dokumen teknis perusahaan. Data geoteknik seperti densitas batuan, nilai kuat tekan (UCS), struktur fisik massa batuan, serta kondisi diskontinuitas digunakan sebagai acuan untuk menentukan besaran *burden* dan *spacing* yang sesuai.

Pada tahap berikutnya, penelitian menerapkan empat metode desain geometri peledakan R.L. Ash, C.J. Konya, *Air Decking Method*, dan *Modified Available Energy* (MAE) secara independen untuk menghasilkan rancangan geometri yang sesuai. Metode R.L. Ash digunakan untuk menghitung *burden* dan *spacing* berdasarkan rasio kedalaman lubang, densitas batuan, dan

karakteristik massa batuan. Metode C.J. Konya diterapkan dengan pendekatan energi spesifik yang mempertimbangkan kecepatan detonasi, tinggi kolom isian, dan nilai *powder factor* sehingga rancangan dapat menyesuaikan resistansi batuan. *Air Decking Method* diterapkan dengan menghitung proporsi kolom udara terhadap panjang kolom isian bahan peledak untuk meningkatkan efisiensi energi peledakan. Sementara itu, metode MAE digunakan sebagai pendekatan modern dengan memasukkan *Blastability Index* sebagai dasar dalam menentukan energi yang efektif digunakan untuk pemecahan batuan.

Seluruh rancangan geometri yang dihasilkan dari keempat metode tersebut kemudian dianalisis menggunakan model prediksi fragmentasi Kuznetsov–Ramler (Kuz-Ram). Model ini digunakan untuk menghitung ukuran fragmen rata-rata, distribusi fragmentasi, serta proporsi fraksi yang lolos ukuran 80 cm. Evaluasi fragmentasi dilakukan untuk mencapai standar perusahaan, yaitu lebih dari 80% fragmen harus berada pada ukuran <80 cm. Model Kuz-Ram dipilih karena kemampuannya memberikan prediksi yang konsisten terhadap kondisi batu kapur dan karena telah digunakan secara luas dalam desain peledakan tambang terbuka.

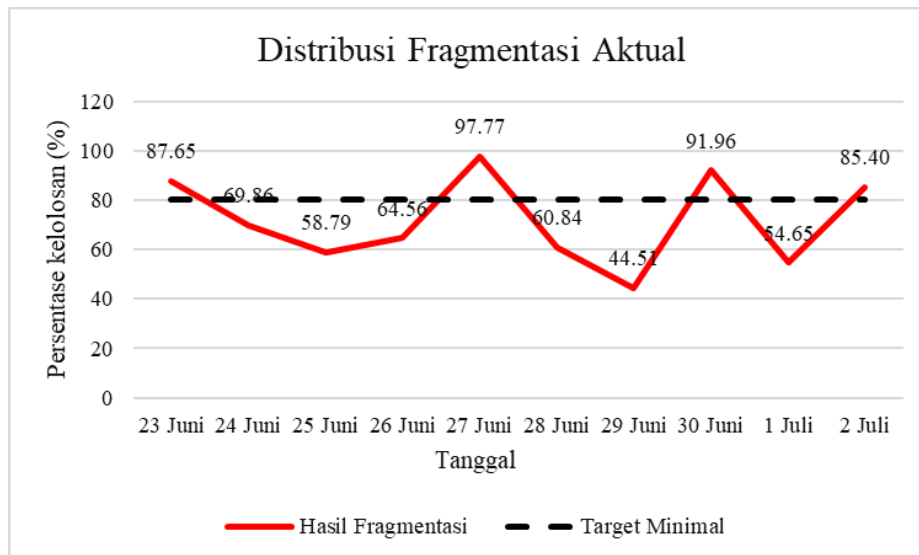
HASIL DAN PEMBAHASAN

PT Semen Padang terus berupaya meningkatkan produksi penambangan batu kapur yang digunakan sebagai bahan pembuatan semen. PT Semen Padang memiliki target produksi kurang lebih 9.400 bcm per peledakannya. Pada kegiatan peledakan untuk mencapai target produksi terdapat hal yang mempengaruhi hasil peledakan yaitu geometri peledakan yang di dalamnya terdapat *burden*, *spacing*, kedalaman lubang, panjang kolom isian, diameter lubang ledak, jumlah bahan peledak yang digunakan dan jumlah lubang ledak. Berikut geometri aktual yang digunakan oleh PT Semen Padang.

Tabel 1. Geometri Peledakan Aktual

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Burden</i>	4,3	m
<i>Spacing</i>	4,3	m
Kedalaman lubang	9,02	m
<i>Stemming</i>	4	m
Panjang Kolom Isian	7	m
<i>Subdrilling</i>	0,5	m
Tinggi Jenjang	10	m

Berdasarkan Tabel 1, didapatkan geometri peledakan aktual yang berbeda dipengaruhi oleh kondisi lokasi peledakan yang berbeda, kemudian kekerasan batuan dan kemampuan alat bor juga menjadi faktor penghambat dalam pengeboran. Setelah didapatkan geometri peledakan aktual, didapatkan distribusi fragmentasi aktual dapat dilihat pada grafik berikut.



Gambar 2. Distribusi Fragmentasi Aktual

Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa distribusi fragmentasi aktual terdapat di beberapa hari ada yang tidak mencapai target yang diinginkan. Hal ini disebabkan oleh lokasi peledakan yang berbeda-beda dan juga jumlah lubang yang diledakkan juga berbeda. Penggunaan bahan peledak dan perbedaan geometri juga menjadi faktor terjadinya fragmentasi yang tidak mencapai target.

Geometri Peledakan Rencana

Hasil penelitian yang diperoleh melalui penerapan empat pendekatan desain geometri peledakan pada kondisi geologi batu kapur di wilayah operasional PT Semen Padang. Analisis dilakukan secara sistematis untuk mengevaluasi performa teknis setiap metode berdasarkan parameter geometri, respons fragmentasi batuan, serta implikasi ekonomis terhadap biaya peledakan. Pengolahan data dilakukan dengan memadukan hasil perhitungan matematis, prediksi empiris, dan analisis komparatif sehingga diperoleh gambaran kuantitatif mengenai efektivitas masing-masing metode dalam memenuhi kebutuhan operasi penambangan. Pembahasan dalam bagian ini disusun secara kritis untuk menilai kesesuaian rancangan dengan kondisi lapangan, mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi kinerja peledakan, serta menegaskan kontribusi setiap metode terhadap pencapaian target produksi dan efisiensi operasional perusahaan. Berikut hasil perbandingan geometri peledakan berdasarkan keempat metode yang digunakan.

Tabel 2. Geometri Peledakan Rencana

Parameter	R.L. Ash	C.J. Konya	ADM	MAE
<i>Burden</i> (B)	4,83	3,70	4,00	5,21
<i>Spacing</i> (S)	5,80	4,48	4,00	5,21
Kedalaman Lubang (H)	12,27	11,11	11,00	11,83
<i>Stemming</i> (T)	3,38	2,59	2,85	4,21
Panjang Kolom Isian (PC)	8,89	8,52	7,00	7,62
<i>Subdrilling</i> (J)	1,45	1,11	0,00	1,26
Tinggi Jenjang (L)	10,82	10,00	10,00	10,00

Berdasarkan Tabel 2 diperoleh geometri peledakan yang dirancang melalui masing-masing metode menunjukkan variasi yang cukup signifikan pada parameter *burden*, *spacing*, kedalaman lubang bor, *stemming*, panjang kolom isian bahan peledak, *Subdrilling*, dan tinggi

jenjang. Variasi ini mencerminkan perbedaan pendekatan teoritis dari setiap metode dalam mengatur hubungan antara energi bahan peledak dan resistansi batuan.

Pada metode R.L. Ash, nilai *burden* sebesar 4,83 m dan *spacing* 5,80 m menunjukkan rancangan yang relatif agresif dengan area kerja yang lebih luas. Kedalaman lubang bor 12,27 m menjadi yang tertinggi, yang dikombinasikan dengan *stemming* 3,38 m dan kolom isian 8,89 m, mencerminkan karakter rancangan yang menekankan penetrasi energi yang lebih dalam. Nilai *Subdrilling* 1,45 m menunjukkan bahwa metode Ash mengarahkan energi hingga melewati toe untuk mengurangi risiko toe problem.

Pada metode C.J. Konya, *burden* 3,70 m dan *spacing* 4,48 m menunjukkan rancangan yang lebih rapat dibandingkan Ash, sesuai dengan pendekatan Konya yang mengoptimalkan transfer energi melalui kontrol terhadap rasio geometri. Kedalaman lubang bor 11,11 m, *stemming* 2,59 m, dan kolom isian 8,52 m memperlihatkan keseimbangan antara kedalaman penetrasi energi dan panjang kolom bahan peledak. *Subdrilling* 1,11 m lebih kecil dari metode Ash, sehingga Konya lebih menekankan efektivitas energi pada zona utama pembongkaran tanpa meningkatkan risiko overbreak.

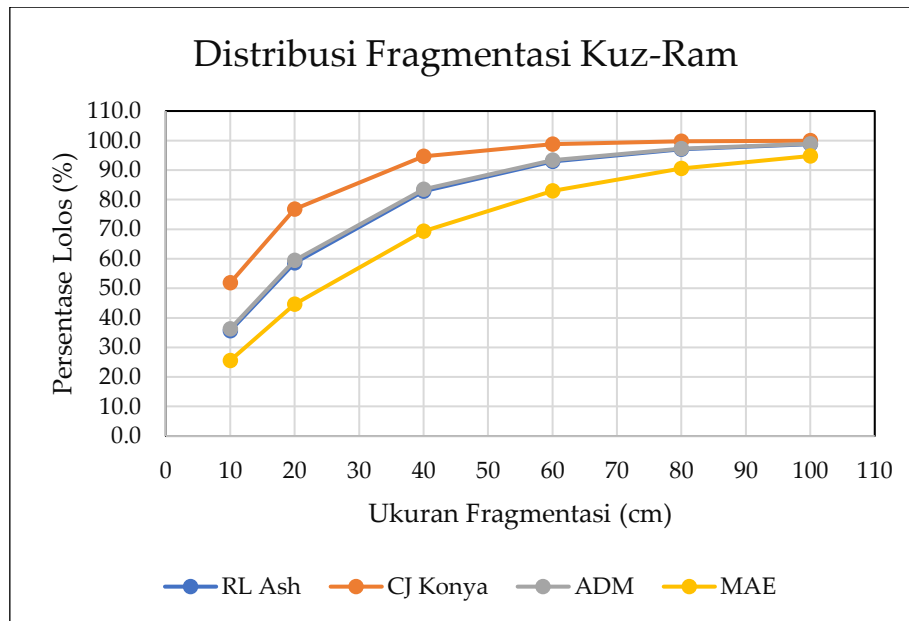
Pada *Air Decking Method* (ADM), *burden* dan *spacing* masing-masing adalah 4,00 m, menghasilkan pola geometri yang lebih simetris dan stabil. Kedalaman lubang bor 11,00 m dipadukan dengan *stemming* 2,85 m, sementara kolom isian 7,00 m menjadi yang terendah dibandingkan metode lain. Hal ini sesuai dengan prinsip Air Decking yang mengurangi panjang kolom bahan peledak dan menggantinya dengan kolom udara untuk meningkatkan refleksi gelombang kejut. Tidak adanya *Subdrilling* (0,00 m) menunjukkan bahwa metode ini mengandalkan peningkatan efisiensi energi dari kolom udara, sehingga tidak membutuhkan penetrasi energi ke bawah kaki jenjang. Tinggi jenjang tetap pada 10,00 m, mencerminkan keseragaman operasi peledakan.

Metode *Modified Available Energy* (MAE) menunjukkan *burden* terbesar yaitu 5,21 m dan *spacing* 5,21 m, yang mencerminkan rancangan paling agresif terhadap massa batuan. Kedalaman lubang bor 11,83 m dengan *stemming* 4,21 m menunjukkan upaya untuk menahan energi ledak agar tidak hilang melalui permukaan. Panjang kolom isian 7,62 m menyeimbangkan rasio energi efektif yang diturunkan dari nilai *Blastability Index*. *Subdrilling* 1,26 m lebih tinggi daripada ADM tetapi lebih rendah dari Ash, mencerminkan pendekatan MAE yang mengoptimalkan energi berdasarkan tingkat kemudahan pembongkaran batuan.

Secara keseluruhan, perbedaan parameter geometri dari keempat metode tersebut mencerminkan variasi dalam strategi desain untuk mengontrol energi bahan peledak dan respons batuan. Metode Ash dan MAE cenderung menghasilkan *burden* dan *spacing* lebih besar, cocok untuk batuan yang lebih kompeten, sementara Konya dan ADM memberikan pola yang lebih moderat dan efisien. Nilai *stemming*, kedalaman lubang, serta panjang kolom isian pada tiap metode menunjukkan tingkat penahanan energi dan efisiensi pembongkaran yang berbeda sesuai teori yang digunakan.

Perkiraan Distribusi Fragmentasi

Pada perkiraan distribusi fragmentasi didapatkan grafik distribusi fragmentasi Kuz-Ram menunjukkan perbandingan persentase fragmen yang lolos pada berbagai ukuran antara empat metode perancangan peledakan: R.L. Ash, C.J. Konya, *Air Decking Method* (ADM), dan *Modified Available Energy* (MAE). Berikut grafik perkiraan distribusi fragmentasi.



Gambar 3. Distribusi Fragmentasi Kuz-Ram

Secara umum, pada Gambar 3 memperlihatkan pola peningkatan persentase kelolosan fragmen seiring bertambahnya ukuran fragmentasi, yang merupakan karakteristik khas model Kuz-Ram. Namun, setiap metode menunjukkan kecenderungan yang berbeda dalam menghasilkan fragmentasi halus maupun kasar. Pada ukuran fragmen kecil (10–20 cm), metode C.J. Konya menunjukkan performa paling unggul dengan persentase kelolosan mencapai sekitar 55–75%, jauh lebih tinggi dibandingkan metode lain. Hal ini mengindikasikan bahwa metode Konya memiliki kemampuan paling baik dalam memecah batuan menjadi ukuran kecil sejak tahap awal. Metode Ash berada pada posisi menengah dengan persentase kelolosan sekitar 40–60%, sementara ADM berada sedikit di bawahnya.

Metode MAE, meskipun unggul pada ukuran menengah, justru berada pada posisi terendah pada kelas ukuran kecil (sekitar 25–50%), menunjukkan bahwa model energi MAE lebih menekankan pemecahan pada ukuran menengah ke atas. Pada ukuran menengah (30–40 cm), metode Konya kembali menunjukkan keunggulan dengan persentase kelolosan mendekati 90–95%, menandakan fragmentasi yang sangat halus dan seragam. Metode ADM dan Ash berada pada kisaran 70–85%, sedangkan MAE menunjukkan peningkatan signifikan mencapai sekitar 70% pada ukuran 40 cm. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa distribusi energi pada metode Konya lebih efektif dalam menghasilkan fragmentasi menengah yang diinginkan. Pada ukuran besar (50–70 cm), seluruh metode menunjukkan tren kelolosan yang semakin merata. Metode Konya dan MAE mencapai kelolosan hampir 100% pada ukuran 50–60 cm, sedangkan Ash dan ADM berada pada kisaran 90–95%. Dominasi Konya dan MAE dalam ukuran ini menunjukkan bahwa kedua metode memiliki rasio energi yang mampu memecah batuan secara menyeluruh dan konsisten pada berbagai kelas ukuran. Pada ukuran sangat besar (80–100 cm), seluruh metode menunjukkan konvergensi dengan kelolosan mendekati 100%, yang menunjukkan bahwa tidak ada fragmen berukuran besar yang tersisa secara signifikan. Hal ini mengonfirmasi bahwa semua metode mampu menghasilkan fragmentasi yang memenuhi batas maksimal ukuran fragmen untuk kebutuhan crusher.

Secara keseluruhan, grafik menunjukkan bahwa metode C.J. Konya menghasilkan distribusi fragmentasi paling halus dan seragam, terutama pada kelas ukuran kecil hingga menengah. MAE menunjukkan performa terbaik pada ukuran menengah hingga besar, sedangkan *Air Decking Method* memberikan fragmentasi yang stabil tetapi sedikit lebih kasar pada kelas ukuran kecil karena fokus metode ini pada efisiensi energi.

Perkiraan Biaya Peledakan Rencana Biaya Pengeboran

Perkiraan biaya peledakan terdapat dua jenis biaya yaitu biaya pengeboran dan biaya peledakan. Biaya pengeboran mencakup depresiasi peralatan pengeboran, biaya operasional dan gaji pekerja. Dapat dilihat pada Tabel 3 perbandingan biaya pengeboran berdasarkan keempat metode yang digunakan.

Tabel 3. Perkiraan Biaya Pengeboran

Parameter	R.L Ash	C.J Konya	ADM	MAE
Depresiasi Peralatan	Rp 12.153	Rp 12.153	Rp 12.153	Rp 12.153
Biaya Operasional	Rp 13.091.501	Rp 19.352.506	Rp 20.047.170	Rp 12.066.001
Gaji Pekerja	Rp 1.800.000	Rp 1.800.000	Rp 1.800.000	Rp 1.800.000
Total per hari	Rp 15.276.802	Rp 21.537.807	Rp 22.232.470	Rp 14.251.302
Biaya per meter	Rp 39.675	Rp 37.839	Rp 37.706	Rp 40.158

Biaya pengeboran menunjukkan adanya variasi signifikan antara keempat metode desain geometri peledakan. Perbedaan biaya ini terutama dipengaruhi oleh variasi kedalaman lubang bor, jumlah lubang yang dibor, serta panjang rencana pengeboran dari masing-masing metode. Meskipun nilai depresiasi peralatan sama pada seluruh metode yaitu Rp 12.153, perbedaan biaya operasional dan total biaya harian memberikan gambaran yang jelas mengenai tingkat efisiensi masing-masing pendekatan.

Pada metode R.L. Ash, biaya operasional mencapai Rp 13.091.501, dengan tambahan biaya gaji pekerja sebesar Rp 1.800.000, sehingga total biaya pengeboran per hari adalah Rp 15.276.802. Biaya per meter bor yang dihasilkan adalah Rp 39.675, yang menunjukkan bahwa metode Ash membutuhkan biaya yang relatif tinggi dibandingkan metode lain untuk setiap meter kedalaman pengeboran. Hal ini terjadi karena metode Ash menggunakan kedalaman lubang yang lebih besar, sehingga total konsumsi waktu dan energi pengeboran menjadi lebih tinggi. Metode C.J. Konya memiliki biaya operasional tertinggi yaitu Rp 19.352.506, mengakibatkan total biaya harian mencapai Rp 21.537.807. Biaya per meter pengeboran mencapai Rp 37.839, sedikit lebih rendah dibandingkan metode Ash. Meskipun demikian, tingginya total biaya operasional pada metode Konya mencerminkan kebutuhan pengeboran yang intensif akibat konfigurasi geometri yang memerlukan jumlah lubang lebih banyak dan distribusi energi yang lebih terfokus.

Pada *Air Decking Method* (ADM), biaya operasional sebesar Rp 20.047.170 dan total biaya harian Rp 22.232.470, menjadikannya metode dengan biaya pengeboran tertinggi secara total. Meskipun biaya per meternya Rp 37.706 lebih rendah dibandingkan Ash dan lebih efisien dibanding Konya, tingginya total biaya harian disebabkan oleh jumlah lubang dan panjang pengeboran yang masih cukup besar akibat penerapan *burden* dan *spacing* simetris pada metode Air Decking. Namun, secara umum metode ini tetap menunjukkan efisiensi biaya per meter yang cukup kompetitif. Metode *Modified Available Energy* (MAE) menghasilkan biaya operasional paling rendah yaitu Rp 12.066.001, dengan total biaya pengeboran per hari sebesar Rp 14.251.302. Meskipun biaya total paling rendah, biaya per meter pengeboran sebesar Rp 40.158 merupakan yang tertinggi dari semua metode. Hal ini menunjukkan bahwa MAE menggunakan pola pengeboran yang lebih dalam atau lebih intensif per lubang, sehingga meskipun total lubang lebih sedikit, biaya pengeboran per meter menjadi lebih tinggi. Namun rendahnya total biaya harian menunjukkan bahwa metode MAE tetap efisien untuk keseluruhan siklus pengeboran.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa metode MAE memiliki total biaya pengeboran paling rendah, tetapi dengan biaya per meter tertinggi. *Air Decking Method* memiliki biaya per meter lebih rendah namun total harian tertinggi. Metode Ash dan Konya berada pada kategori biaya sedang, namun Konya menunjukkan biaya operasional yang tinggi akibat jumlah lubang dan konfigurasi geometri yang lebih rapat. Perbedaan ini menegaskan bahwa setiap metode memiliki orientasi yang berbeda terhadap efisiensi energi, jumlah lubang, dan kedalaman pengeboran, sehingga pemilihannya sangat bergantung pada prioritas biaya dan kebutuhan produksi perusahaan.

Biaya Peledakan

Biaya peledakan mencakup depresiasi peralatan peledakan, biaya bahan peledak, biaya aksesoris peledakan dan gaji pekerja. Dapat dilihat pada Tabel 4 perbandingan biaya peledakan berdasarkan keempat metode yang digunakan.

Tabel 4. Perkiraan Biaya Peledakan

Parameter	R.L Ash	C.J Konya	ADM	MAE
Depresiasi Peralatan	Rp 12.153	Rp 12.153	Rp 12.153	Rp 12.153
Biaya Bahan Peledak	Rp 60.793.592	Rp 63.813.814	Rp 81.935.627	Rp 48.700.782
Biaya Aksesoris	Rp 10.430.259	Rp 16.596.219	Rp 17.330.259	Rp 9.800.027
Gaji Pekerja	Rp 5.366.667	Rp 5.366.667	Rp 5.366.667	Rp 5.366.667
Total per hari	Rp 76.602.671	Rp 85.788.852	Rp 104.664.705	Rp 63.879.628

Biaya peledakan yang disajikan dalam tabel menunjukkan variasi yang cukup signifikan antar metode desain geometri peledakan. Meskipun biaya depresiasi peralatan bernilai sama pada seluruh metode yaitu Rp 12.153, perbedaan terbesar muncul pada biaya bahan peledak dan biaya aksesoris yang mencerminkan jumlah bahan peledak dan jenis komponen peledakan yang digunakan. Variasi ini menunjukkan bahwa karakteristik masing-masing metode memengaruhi kebutuhan energi dan aksesoris peledakan yang akhirnya berdampak pada total pengeluaran harian.

Pada metode R.L. Ash, biaya bahan peledak mencapai Rp 60.793.592, ditambah dengan biaya aksesoris sebesar Rp 10.430.259 dan gaji pekerja Rp 5.366.667, menghasilkan total biaya peledakan harian sebesar Rp 76.602.671. Angka ini menunjukkan bahwa metode Ash memerlukan jumlah bahan peledak yang cukup besar karena panjang kolom isian lebih tinggi dibandingkan beberapa metode lain. Meskipun biaya totalnya masih berada pada kisaran menengah, karakteristik metode Ash yang konservatif menyebabkan konsumsi energi lebih besar untuk mengimbangi *burden* dan *spacing* yang relatif luas. Metode C.J. Konya menunjukkan peningkatan biaya dibandingkan metode Ash, dengan total biaya peledakan mencapai Rp 85.788.852. Biaya bahan peledaknya adalah Rp 63.813.814, dan biaya aksesoris mencapai Rp 16.596.219, yang merupakan salah satu yang tertinggi dalam tabel. Tingginya biaya ini disebabkan oleh kebutuhan energi yang lebih besar untuk menghasilkan fragmentasi halus yang menjadi karakteristik metode Konya. Selain itu, jumlah aksesoris yang digunakan lebih banyak karena konfigurasi geometri yang lebih rapat, sehingga memerlukan detonator dan konektor dalam jumlah lebih besar.

Pada *Air Decking Method* (ADM), biaya peledakan tercatat sebagai yang tertinggi, yaitu Rp 104.664.705 per hari. Biaya bahan peledak mencapai Rp 81.935.627, dan biaya aksesoris sebesar Rp 17.330.259, keduanya merupakan nilai tertinggi dari keempat metode. Hal ini berkaitan dengan desain Air Decking yang mengandalkan distribusi energi melalui kolom udara,

sehingga meskipun total energi efektif meningkat, kebutuhan booster, detonator, dan elemen rangkaian peledakan lainnya tetap tinggi. Biaya total yang besar ini menunjukkan bahwa metode ADM lebih mahal dalam implementasi meskipun efisien dari segi penggunaan bahan peledak pada beberapa kasus. Sebaliknya, metode *Modified Available Energy* (MAE) menunjukkan biaya peledakan paling rendah, dengan total pengeluaran harian sebesar Rp 63.879.628. Biaya bahan peledak hanya Rp 48.700.782, menjadikannya metode dengan konsumsi bahan peledak paling efisien. Biaya aksesoris sebesar Rp 9.800.027, yang juga paling rendah. Efisiensi biaya pada metode MAE berkaitan dengan penggunaan energi efektif berdasarkan nilai *Blastability Index*, sehingga kebutuhan bahan peledak lebih terkontrol dan sesuai dengan karakteristik massa batuan.

Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa metode MAE merupakan metode paling ekonomis untuk peledakan, baik dari segi bahan peledak maupun aksesoris. *Air Decking Method* menghasilkan biaya tertinggi karena kebutuhan komponen peledakan yang kompleks, sementara metode Konya dan Ash berada di kategori menengah dengan variasi tergantung pada strategi penggunaan energi. Perbedaan biaya ini memberikan gambaran yang jelas bahwa pemilihan metode peledakan harus mempertimbangkan tidak hanya kualitas fragmentasi, tetapi juga implikasi ekonomis terhadap biaya operasional harian.

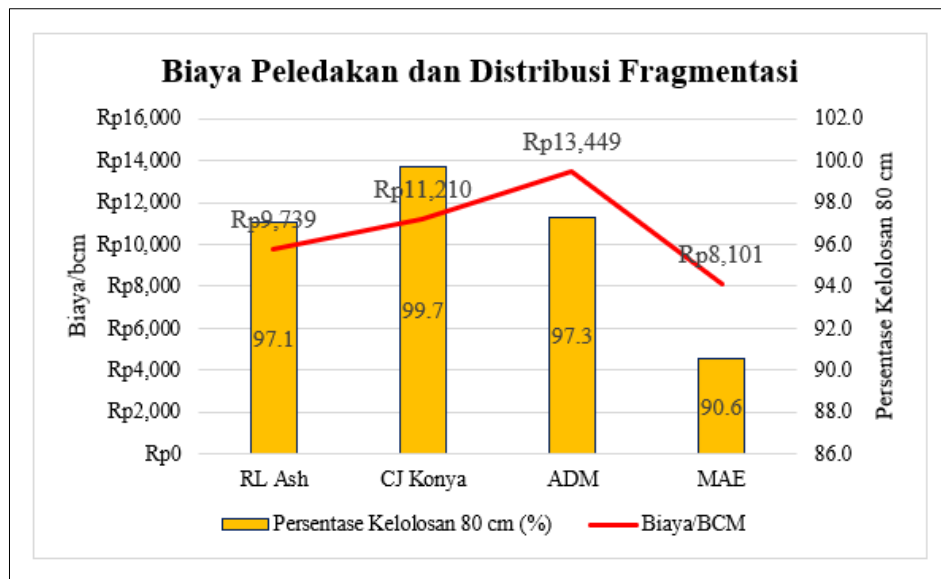
Perbandingan Biaya Peledakan Rencana dan Perkiraan Distribusi Fragmentasi

Setelah dihitung biaya pengeboran dan biaya peledakan dapat dihitung total biaya peledakan rencana dan juga biaya peledakan per bcm. Berikut Total biaya peledakan dan biaya yang dibutuhkan untuk membongkar satu bcm batu kapur.

Tabel 5. Perbandingan Total Biaya Peledakan Rencana

Total Biaya	R.L Ash	C.J Konya	ADM	MAE
Peledakan	Rp 91.879.472	Rp 107.326.659	Rp 126.877.175	Rp 78.130.930
Biaya per bcm	Rp 9.739	Rp 11.210	Rp 13.449	Rp 8.101

Berdasarkan Tabel 5, perbandingan total biaya peledakan menggunakan empat metode perhitungan menunjukkan adanya variasi biaya yang signifikan antar pendekatan. Metode MAE menghasilkan biaya paling ekonomis dengan total biaya sebesar Rp 78.130.930 dan biaya per bcm sebesar Rp 8.101, menjadikannya metode dengan efisiensi biaya tertinggi. Metode R.L. Ash menghasilkan total biaya Rp 91.879.472 dengan biaya per bcm Rp 9.739, berada pada kisaran biaya menengah. Sementara itu, metode C.J. Konya menunjukkan total biaya lebih tinggi, yaitu Rp 107.326.659 dengan biaya per bcm Rp 11.210, sehingga berada pada posisi biaya tertinggi kedua. Adapun metode ADM menghasilkan biaya terbesar dengan total biaya Rp 126.877.175 dan biaya per bcm Rp 13.449, menjadikannya metode dengan kebutuhan biaya paling tinggi. Secara keseluruhan, urutan efisiensi biaya dari yang paling rendah hingga tertinggi adalah MAE, R.L. Ash, C.J. Konya, dan ADM, yang mencerminkan perbedaan asumsi dan parameter teknis pada masing-masing teori dalam proses perencanaan peledakan. Kemudian dapat dibandingkan hasil fragmentasi dan biaya per bcm dari masing-masing metode yang digunakan. Berikut perbandingan biaya peledakan rencana dan perkiraan distribusi fragmentasi dapat dilihat pada grafik berikut.



Gambar 4. Perbandingan Biaya Peledakan dan Distribusi Fragmentasi

Berdasarkan Gambar 4 biaya peledakan dan distribusi fragmentasi, metode geometri peledakan MAE dipilih sebagai metode yang diterapkan meskipun menghasilkan kualitas fragmentasi yang lebih rendah dibandingkan metode lainnya. Metode MAE memiliki biaya peledakan terendah, yaitu sebesar Rp8.101/BCM, sehingga memberikan keuntungan yang signifikan dari sisi efisiensi biaya operasional. Hasil fragmentasi yang dihasilkan oleh metode MAE menunjukkan persentase kelolosan ukuran 80 cm sebesar 90,6%. Nilai ini memang lebih rendah jika dibandingkan dengan metode R.L. Ash (97,1%), C.J. Konya (99,7%), dan ADM (97,3%). Namun demikian, nilai kelolosan sebesar 90,6% masih berada pada batas yang dapat diterima untuk mendukung proses pemuatan dan pengangkutan material, khususnya apabila alat muat yang digunakan masih mampu menangani ukuran fragmen yang dihasilkan.

Metode MAE adalah metode yang paling efisien dan paling efektif pada biaya peledakan. Jika dibandingkan dengan metode C.J. Konya yang memiliki biaya Rp11.210/BCM, penerapan metode MAE mampu menghemat biaya sebesar Rp3.109/BCM. Penghematan ini menjadi lebih signifikan apabila diterapkan pada volume produksi yang besar, sehingga secara kumulatif dapat menurunkan total biaya penambangan secara substansial. Selain itu, meskipun metode ADM menghasilkan fragmentasi yang relatif baik (97,3%), biaya peledakan yang mencapai Rp13.449/BCM dinilai tidak sebanding dengan peningkatan kualitas fragmentasi yang diperoleh. Oleh karena itu, dari sudut pandang keekonomian, metode MAE lebih menguntungkan karena mampu menekan biaya langsung peledakan tanpa peningkatan biaya yang signifikan pada tahap berikutnya.

Secara keseluruhan, pemilihan metode geometri peledakan MAE didasarkan pada pertimbangan optimasi biaya terhadap hasil fragmentasi. Walaupun kualitas fragmentasi yang dihasilkan tidak sebaik metode lainnya, metode MAE dinilai telah memenuhi kebutuhan operasional dengan biaya paling rendah. Dengan demikian, metode MAE dianggap sebagai pilihan yang paling ekonomis dan efisien untuk diterapkan pada kondisi operasi yang dianalisis dalam penelitian ini.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini merangkum seluruh hasil analisis dan pembahasan mengenai perbandingan empat metode desain geometri peledakan, yaitu R.L. Ash, C.J. Konya, *Air Decking Method*, dan *Modified Available Energy* (MAE), yang diterapkan pada kegiatan peledakan batu kapur di PT Semen Padang. Berdasarkan hasil perhitungan ketercapaian volume batuan terbongkar, diketahui bahwa seluruh metode mampu memenuhi target produksi, namun metode MAE menunjukkan kinerja paling optimal dengan volume terbongkar paling tinggi serta

nilai *Powder Factor* yang lebih rendah dibandingkan metode lainnya. Hal ini menandakan bahwa energi peledakan pada metode MAE digunakan secara lebih efisien dalam memecah massa batuan. Dari sisi perkiraan distribusi fragmentasi, metode C.J. Konya memberikan hasil paling baik karena menghasilkan fragmentasi yang paling mendekati target ukuran yang telah ditetapkan perusahaan, disusul oleh *Air Decking Method*, R.L. Ash, dan MAE. Meskipun MAE berada pada peringkat terakhir dalam hal kualitas fragmentasi, hasil yang dihasilkan tetap memenuhi batas kelolosan yang diterima dalam operasi penambangan dan masih sesuai untuk proses selanjutnya. Sementara itu, analisis biaya menunjukkan adanya perbedaan signifikan antar metode, yang terutama dipengaruhi oleh variasi *burden*, *spacing*, kedalaman lubang, serta panjang kolom isian yang menentukan kebutuhan bahan peledak dan aksesoris. Dari seluruh perhitungan tersebut, MAE muncul sebagai metode yang paling ekonomis karena memberikan biaya peledakan terendah per bcm sambil tetap mempertahankan efektivitas teknis dalam pembongkaran batuan.

Secara keseluruhan, penelitian ini mengarah pada kesimpulan bahwa metode *Modified Available Energy* merupakan metode yang paling efektif dan layak diterapkan dalam kegiatan peledakan di lokasi penelitian karena mampu menggabungkan aspek efisiensi biaya, ketercapaian volume, serta performa fragmentasi yang tetap berada dalam standar operasional. Hasil penelitian ini tidak hanya memberikan rekomendasi bagi perusahaan terkait pemilihan metode peledakan yang lebih baik, namun juga membuka peluang untuk pengembangan penelitian lebih lanjut. Ke depan, analisis dapat diperluas dengan mempertimbangkan variabel tambahan seperti karakteristik mekanik batuan yang lebih detail, jenis bahan peledak yang berbeda, pola delay yang lebih bervariasi, serta integrasi penggunaan perangkat lunak simulasi peledakan untuk memprediksi dampak geometri secara lebih komprehensif. Penelitian lanjutan juga dapat diarahkan pada studi aplikatif untuk menguji performa metode MAE dalam kondisi geologi yang berbeda atau pada skala produksi yang lebih besar sehingga hasil penelitian ini dapat diaplikasikan secara lebih luas dan memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan efisiensi operasional penambangan.

PERNYATAAN PENULIS

Penulis menyatakan bahwa penelitian yang disajikan dalam laporan ini merupakan karya orisinal yang disusun berdasarkan proses penelitian yang dilakukan secara mandiri dan berlandaskan kaidah serta etika akademik yang berlaku. Seluruh tahapan, mulai dari pengumpulan data, pengolahan, analisis, hingga penarikan kesimpulan, dilakukan secara jujur tanpa adanya bentuk plagiarisme, pemalsuan, atau manipulasi data dalam bentuk apa pun. Setiap sumber informasi, teori, maupun referensi yang digunakan dalam penyusunan laporan ini telah dicantumkan secara tepat dan sesuai aturan yang berlaku. Penulis juga menegaskan bahwa seluruh bagian dari karya ini telah disetujui sepenuhnya oleh penulis sendiri dan tidak terdapat konflik kepentingan dengan pihak mana pun, baik individu maupun institusi terkait. Dengan demikian, penulis bertanggung jawab sepenuhnya atas keaslian isi laporan ini dan menyatakan bahwa karya ini layak untuk diajukan sebagai bagian dari pemenuhan persyaratan akademik.

KONTRIBUSI PENULIS

Penulis bertanggung jawab penuh atas perancangan studi, termasuk penyusunan tujuan penelitian, penentuan metodologi, serta pemilihan pendekatan analisis yang digunakan. Penulis juga secara langsung melakukan pengumpulan data di lapangan, mulai dari pencatatan geometri peledakan aktual, dokumentasi visual, hingga pengumpulan data sekunder yang relevan. Proses pengolahan dan analisis data dilakukan sepenuhnya oleh penulis, mencakup perhitungan geometri peledakan rencana, evaluasi fragmentasi, analisis biaya, serta interpretasi hasil berdasarkan teori dan literatur yang mendukung. Selain itu, penulis menyusun keseluruhan naskah penelitian, mulai dari penulisan draft awal, pengembangan argumentasi ilmiah, penyusunan grafik dan tabel pendukung, hingga perumusan kesimpulan dan saran penelitian.

Penulis juga melakukan proses revisi dan penyuntingan secara mandiri untuk memastikan bahwa laporan ini memenuhi standar akademik, memiliki kejelasan alur pembahasan, serta mencerminkan validitas ilmiah yang dapat dipertanggungjawabkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung sepenuhnya maupun sebagian oleh Institut Teknologi Sumatera yang telah memberikan dukungan penting dalam kelancaran proses penelitian. Penulis juga menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada rekan-rekan dari PT Semen Padang dan PT Dahana atas wawasan dan keahlian yang mereka berikan. Ucapan terima kasih yang mendalam juga penulis sampaikan kepada para dosen pembimbing dan pengajar yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta motivasi selama penyusunan penelitian ini. Tidak lupa, penulis mengucapkan terima kasih kepada keluarga tercinta atas doa, dukungan moral, dan semangat yang senantiasa menguatkan penulis sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardiansyah, F. (2020). Analisis Uji Kuat Tekan Untuk Menentukan Kualitas Batuan Pada Area Tambang PT Semen Padang Indarung, Kecamatan Lubuk Kilangan, Provinsi Sumatera Barat. *Geoda*, 129-136.
- Armaghani, D. J. (2025). A review on the prediction and assesment of powder factor in blast fragmentation. *Research Gate/ International Journal*.
- Biessikirski. (2024). Evaluation of Ammonium Nitrate(V) morphology and porosity obtained by SEM and tomography imaging. *PubMed Central*.
- Defriansyah, A., & Yulhendra. (2018). Rancangan Geometri Peledakan Batuan Granodiorit PT. Gilgal Batu Alam Lestari Mempawah Kalimantan Barat. *Jurnal Sains dan Teknologi Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknologi Industri*, 388.
- Fabin, M. (2021). Improving ANFO: Effect of additives and ammonium nitrate modifications on blasting properties. *Applied Sciences*.
- Gezerman, A. O. (2020). A novel industrial-scale strategy to prevent degradation of emulsion matrices (stability improvements). *Journal of Energetic Materials*.
- Hidayat, W., Hasyim, I., & Kurniawan, E. (2022). PELAKSANAAN KEGIATAN PELEDAKAN DALAM UPAYA PEMBERAIAN OVER BURDEN (OB). *Jurnal Geologi Pertambangan*, 1.
- Jackson, S. I. (2017). The dependence of Ammonium-Nitrate Fuel-Oil (ANFO) detonation on confinement and diameter. *International Journal of Energetic Materials*.
- Kahrman, A., Kose, H., & Onur, A. H. (2017). Assessment of blastability in mining operations. *Mining Science and Technology*, 479-486.
- Karakus, D., & Yilmaz, A. O. (2016). Evaluation of drilling performance in open pit mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 161-166.
- Kramarczyk. (2022). Emulsion explosives: A tutorial review and highlight of recent progress. *Materials*, 15.
- Nilasari, G. A., Nurhakim, Riswan, & Gunawan, H. (2017). Evaluasi Geometri Berdasarkan Fragmentasi Hasil Peledakan pada Penambangan Batu Gamping di PT Semen Tonasa. *Jurnal Himasapta*, 27-30.
- Novalia, H., Farid, F., & Megasukma, Y. (2022). Kajian Biaya Peledakan Pada Proses Pembongkaran Batu Kapur di PT Semen Padang. *Jurnal Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*, 683-699.
- Palimbu, S., & Pangkung. (2021). Geometri dan Fragmentasi batuan Menggunakan Metode KUZ-RAM di PT Semen Bosowa Maros Provinsi Sulawesi Utara. *INTAN Jurnal Penelitian Tambang*.
- Rusdi, & Rifandy, A. (2020). Optimasi Alat Bor Dalam Kegiatan Penyediaan Lubang Ledak Pada Kegiatan Pemberaian Batuan di PT Surya Pratama Makmur Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur. *Jurnal Geologi Pertambangan*.

Suhardin, A., Ulum, M. S., & Darwis, D. (2018). Penentuan Komposisi Serta Suhu Kalsinasi Optimum CaO Dari Batu Kapur Kecamatan Banawa. *Natural Science: Journal of Science and Technology*, 30–35.