

ANALISIS CRUSH ZONE PADA PELEDAKAN LAPISAN BATU KAPUR (LIMESTONE)

(Analysis of the Crush Zone in Limestone Layer Blasting)

Noveriady^{1*}, Lisa Virgiyanti¹, Novalisae¹, Willy Kusuma Nainggolan¹

¹Jurusan/Prodi Teknik Pertambangan, Universitas Palangka Raya

* Korespondensi E-mail: noveriady@mining.upr.ac.id

Abstrak

Peledakan merupakan tahapan penting dalam kegiatan penambangan terbuka yang bertujuan untuk memecah massa batuan menjadi ukuran yang sesuai untuk proses selanjutnya. Salah satu zona krusial dalam proses ini adalah zona remuk (*crush zone*), yaitu area di sekitar lubang ledak yang mengalami kerusakan total akibat tekanan tinggi bahan peledak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik zona remuk pada lapisan limestone berdasarkan data geometri aktual lubang ledak. Metode yang digunakan adalah pendekatan deskriptif kuantitatif dengan pengumpulan data lapangan berupa burden, spasi, kedalaman lubang, *stemming*, dan kolom bahan peledak, serta perhitungan muatan bahan peledak, radius zona remuk, dan volume zona remuk. Muatan bahan peledak per lubang diperoleh sebesar 43,28 kg berdasarkan powder factor desain sebesar 0,245 kg/m³ dan volume batuan sebesar 176,64 m³. Radius zona remuk dihitung menggunakan rumus empiris Konya & Walter sebesar 4 meter dengan volume sebesar 134 m³. Nilai *powder factor* aktual pada zona remuk sebesar 0,323 kg/m³, lebih tinggi dari nilai desain, menunjukkan adanya potensi *overblasting*. Hasil ini menjadi dasar penting untuk optimalisasi desain peledakan agar energi lebih efisien dan fragmentasi batuan lebih terkendali.

Kata kunci: Peledakan, Zona Remuk, Powder Factor, Limestone, Fragmentasi

Abstract

Blasting is a crucial phase in open-pit mining, intended to break rock masses into manageable sizes for subsequent handling and processing. One critical zone in blasting is the crush zone, where rocks experience complete disintegration due to intense explosive pressure. This study aims to analyze the characteristics of the crush zone in limestone layer based on actual blast hole geometry data. The research employs a quantitative descriptive approach, involving the collection of field data (burden, spacing, hole depth, stemming, and explosive column), followed by calculations of explosive charge, crush zone radius, and volume. The explosive charge per hole is determined using the design powder factor of 0.245 kg/m³ and a rock volume of 176.64 m³, resulting in 43.28 kg of explosives. The crush zone radius, estimated using Konya & Walter's empirical formula, is 4 meters, yielding a volume of 134 m³. The actual powder factor within the crush zone is 0.323 kg/m³, exceeding the design value and suggesting potential overblasting. These results highlight the need to optimize blast designs for better energy efficiency and rock fragmentation outcomes.

Keywords: Blasting, Crush Zone, Powder Factor, Limestone, Fragmentation

1. Pendahuluan

Peledakan batuan merupakan tahapan penting dalam kegiatan penambangan, khususnya pada metode tambang terbuka. Tujuan utama dari peledakan adalah menghasilkan fragmentasi batuan yang sesuai dengan kebutuhan proses selanjutnya seperti pemuatan dan pengangkutan (Jimeno et al., 1995). Salah satu zona penting dalam kajian peledakan adalah zona remuk atau *crush zone*, yaitu zona paling dekat dari lubang ledak di mana batuan mengalami kerusakan total akibat tekanan tinggi dari bahan peledak (Persson et al., 1994).

Pada batuan limestone, karakteristik unik seperti struktur sedimen berlapis dan densitas fraktur alami menciptakan dinamika khusus dalam pembentukan *crush zone* area di sekitar lubang ledak yang mengalami deformasi plastis dan fragmentasi ekstrem akibat tekanan dinamik >10 GPa. Model prediktif *crush zone* masih menghadapi tantangan akurasi akibat variabilitas geologi. Persamaan teoritis seperti model CZI (Crushing Zone Index) oleh Esen dkk. cenderung menyederhanakan batuan sebagai medium homogen, sehingga gagal menangkap pengaruh joint set dan kekuatan kompresif tidak seragam (Zhang et al., 2020).

Pemahaman mendalam tentang mekanisme pembentukan *crush zone* pada batuan limestone menjadi fondasi untuk optimasi desain peledakan berkelanjutan.

Crush zone berperan penting dalam menentukan seberapa besar energi bahan peledak yang terserap untuk menghancurkan batuan secara efektif (Konya & Walter, 1990). Efisiensi energi peledakan sangat bergantung pada distribusi energi ke berbagai zona: *crush zone*, *fracture zone*, dan *heave zone* (Langefors & Kihlström, 1978). Jika terlalu banyak energi terserap dalam *crush zone*, maka fragmentasi bisa menjadi terlalu halus (*overblasting*) dan berdampak pada biaya operasi (Siskind, 2000; Adhikari, 2006).

Karakteristik geologi juga memengaruhi perkembangan *crush zone*. Pada batuan limestone (batu kapur), yang umumnya memiliki kekuatan tekan rendah hingga menengah (50–150 MPa), zona remuk cenderung lebih besar dibandingkan batuan keras seperti granit (Hustrulid & Bullock, 2001). Selain itu, sifat getas dari limestone menyebabkan retakan menyebar lebih luas saat terkena energi ledakan (Jimeno et al., 1995; McKenzie, 2009).

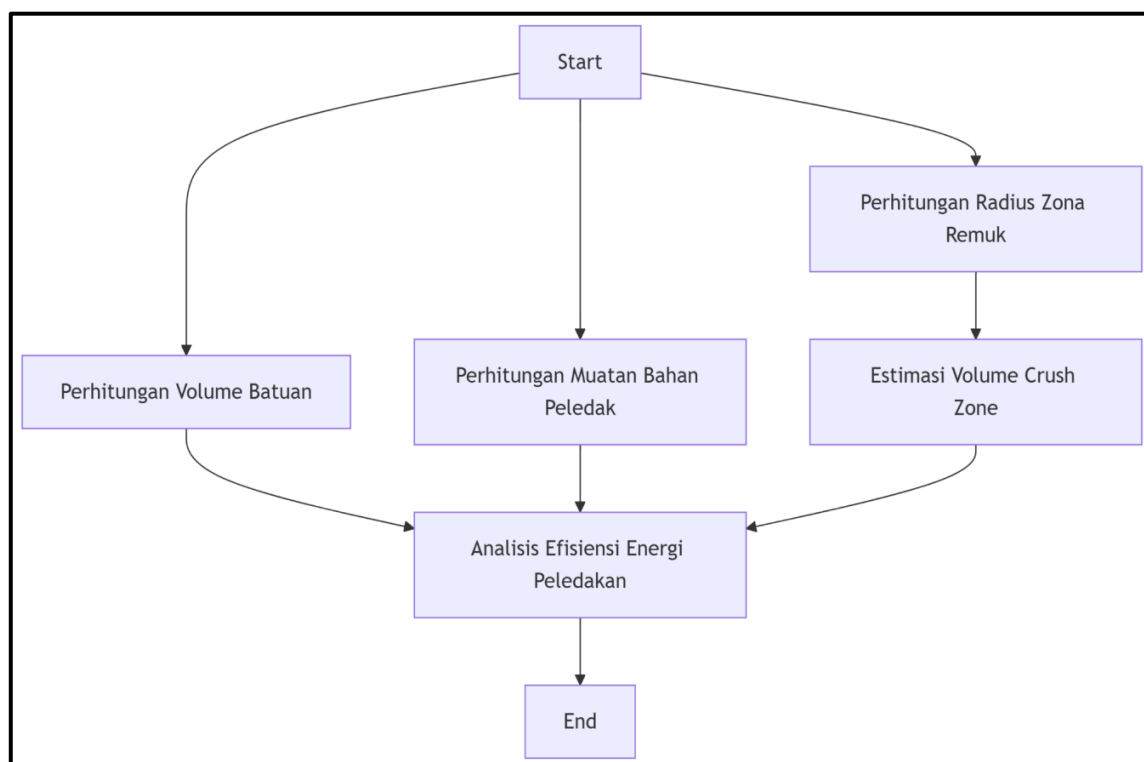
Konsekuensi praktis dari ketidakefisienan *crush zone* termanifestasi

dalam biaya operasional dan dampak lingkungan. Data dari tambang limestone di Spanyol menunjukkan bahwa 30% energi ledak terdisipasi dalam pembentukan *crush zone* berlebihan, meningkatkan biaya bahan peledak dan emisi CO₂ (Hu, Y., et al., 2024). Selain itu, perluasan *crush zone* yang tidak terkontrol memicu backbreak hingga 15% di luar batas desain, mengancam stabilitas lereng dan keselamatan kerja (Bhandari, S., 1997).

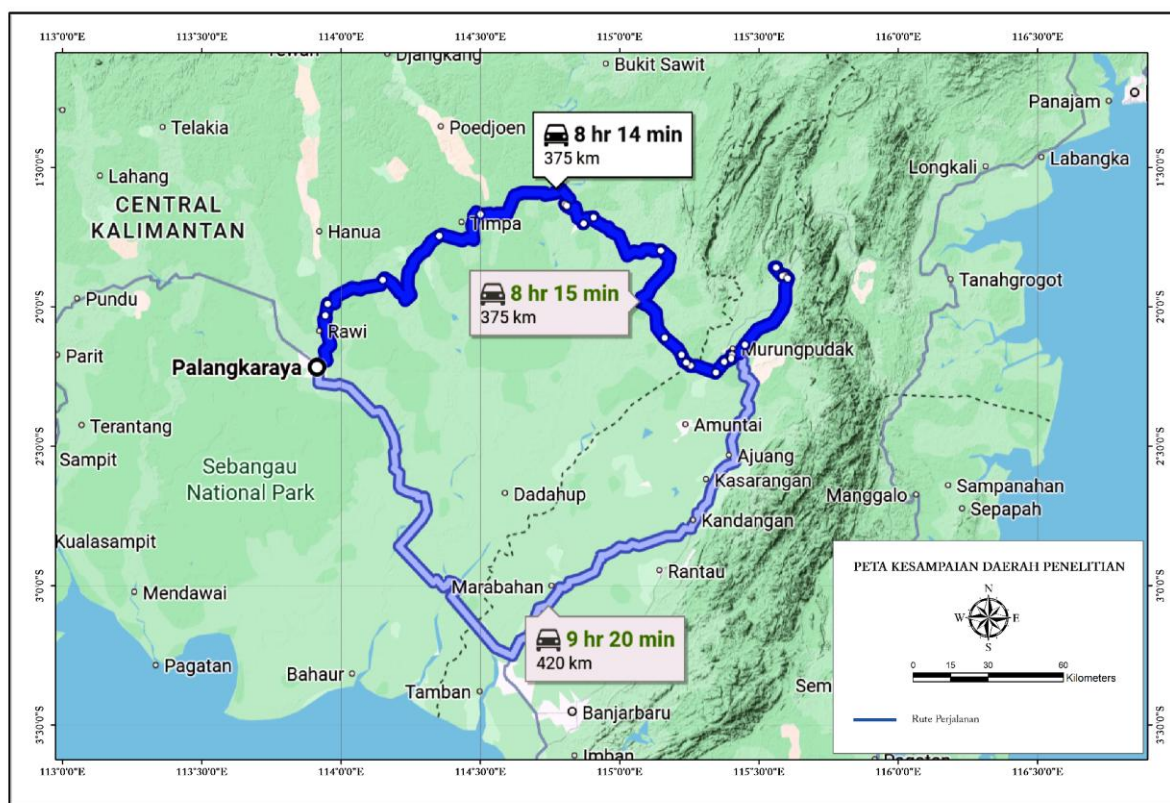
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik *crush zone* berdasarkan data geometri aktual lubang ledak pada lapisan limestone. Dengan pendekatan kuantitatif melalui perhitungan volume dan radius zona remuk, diharapkan hasil penelitian dapat menjadi acuan untuk optimasi rancangan peledakan yang lebih efisien.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi kasus berdasarkan data aktual kegiatan peledakan pada lapisan limestone di lokasi penambangan terbuka yang berada di Kecamatan Paringin, Kabupaten Tabalong, Kalimantan Selatan. Adapun diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian



Gambar 2. Peta Kesampaian Daerah Penelitian

Adapun langkah-langkah penelitian dijabarkan sebagai berikut:

- a. Pengumpulan Data Primer dan Sekunder
 1. Data primer: Data geometri lubang ledak yang diperoleh dari hasil pengukuran lapangan, yaitu burden, spasi, kedalaman lubang, *stemming*, kolom isian, dan *powder factor*. Adapun alat dan bahan yang digunakan untuk mendapatkan data yaitu: meteran, penanda, kamera digital, *blasting ohmmeter* dan *blasting machine*, data rencana peledakan harian.
 2. Data sekunder: Literatur dan referensi ilmiah mengenai teori peledakan, zona peledakan, serta karakteristik fisik batuan limestone dari hasil penelitian sebelumnya.
- b. Perhitungan Volume Batuan
- c. Perhitungan Muatan Bahan Peledak
- d. Perhitungan Radius Zona Remuk (*Crush Zone*)
- e. Estimasi Volume *Crush Zone*
- f. Analisis Efisiensi Energi Peledakan

3. Hasil dan Pembahasan

Lapisan batu kapur (limestone) yang terdapat di Kecamatan Paringin, Kabupaten Balangan, Kalimantan Selatan umumnya muncul sebagai sisipan tipis dalam formasi batuan sedimen seperti batupasir dan batulempung dari Formasi Warukin. Secara fisik, batu kapur ini memiliki warna bervariasi mulai dari putih, abu-abu hingga kekuningan, tergantung kandungan pengotor seperti lempung, silika, dan oksida besi. Teksturnya kompak dengan butiran halus hingga sedang, kekerasan sekitar skala *Mohs* 3, dan berat jenis berkisar antara 2,7 hingga 2,8 g/cm³. Porositasnya rendah, begitu pula dengan daya serap airnya, menjadikan batu kapur ini relatif padat dan tahan terhadap pelapukan.

a. Geometri Peledakan

Hasil peledakan yang dilakukan di lapangan maka diperoleh geometri peledakan diperoleh sebagai berikut:

Tabel 1. Geometri Peledakan Lapisan Limestone

Parameter	Nilai (m)	Keterangan
Burden (B)	6.0	Jarak antar lubang ledak ke bidang bebas.
Spasi (S)	6.4	Jarak antar lubang ledak dalam satu baris.
Kedalaman Lubang (L)	5.1	Total panjang lubang (Tinggi jenjang + <i>Subdrill</i> = 4.6 + 0.5).
Tinggi Jenjang (H)	4.6	Tinggi undakan batuan.
<i>Subdrill</i> (J)	0.5	Pemboran melebihi dasar jenjang untuk hindari " <i>toe problem</i> ".
<i>Stemming</i> (T)	2.94	Material penutup lubang (biasanya pasir/kerikil) untuk cegah <i>flyrock</i> .
Kolom Isian (C)	1.64	Panjang kolom berisi bahan peledak.
Volume Batuan per Lubang	176.64 m ³	$V = B \times S \times H = 6.0 \times 6.4 \times 4.6$
<i>Powder Factor</i> (PF)	0.245 kg/m ³	Rasio berat bahan peledak per volume batuan.

b. Perhitungan Muatan Bahan Peledak

Muatan bahan peledak (ANFO) per lubang merupakan salah satu parameter penting dalam perencanaan peledakan karena menentukan besarnya energi yang akan dialirkan ke batuan. Dalam praktiknya, muatan bahan peledak (Q) dapat dihitung menggunakan rumus dasar yaitu hasil perkalian antara *powder factor* (PF) dengan volume batuan yang akan diledakkan (V). *Powder factor* adalah besaran yang menunjukkan jumlah bahan peledak yang digunakan per satuan volume batuan, biasanya dalam satuan kilogram per meter kubik (kg/m³). Dalam studi ini, diketahui nilai PF sebesar 0,245 kg/m³, dan volume batuan per lubang ledak dihitung sebesar 176,64 m³ berdasarkan parameter burden, spasi, dan tinggi jenjang. Dengan menggunakan rumus tersebut, diperoleh nilai muatan bahan peledak per lubang sebesar:

$$Q = 0,245 \times 176,64 = 43,28 \text{ kg}$$

Artinya, setiap lubang ledak memerlukan sekitar 43,28 kilogram bahan peledak untuk menghancurkan volume batuan tersebut secara optimal. Nilai ini menjadi dasar dalam pengisian kolom bahan peledak dan sangat memengaruhi distribusi energi selama peledakan. Jika jumlah bahan peledak terlalu besar, maka energi yang dihasilkan dapat menyebabkan *overblasting* atau kerusakan berlebihan pada batuan dan lingkungan sekitar. Sebaliknya, jika terlalu sedikit, batuan tidak akan terfragmentasi dengan baik, sehingga menurunkan efisiensi proses selanjutnya seperti pemuatan dan pengangkutan.

c. Prediksi Radius Crush Zone

Berdasarkan perhitungan dengan jumlah muatan bahan peledak sebesar 43,28 kg, maka radius zona remuk dihitung sebagai berikut:

$$R_c = 1.1 \times \sqrt[3]{43.28} \approx 4.0 \text{ meter}$$

Nilai ini menunjukkan bahwa sekitar 4 meter dari pusat lubang ledak mengalami kerusakan total akibat tekanan tinggi dari ledakan.

Zona ini penting untuk dipahami karena konsentrasi energi tertinggi terjadi di area ini, dan pengelolaan radius ini dapat memengaruhi kualitas fragmentasi serta kestabilan jenjang. Jika radius terlalu besar akibat muatan berlebihan, maka fragmentasi batuan bisa terlalu halus dan menyebabkan peningkatan biaya pengolahan serta potensi kerusakan lingkungan yang lebih luas.

d. Estimasi Volume Crush Zone

Volume zona remuk (V_{crush}) dihitung dengan mengasumsikan bahwa ledakan di dalam lubang menghasilkan sebaran energi ke satu arah, yaitu ke atas dan menyamping dari dasar lubang, sehingga bentuk zona remuk mendekati setengah bola. Asumsi ini umum digunakan dalam analisis peledakan karena bahan peledak biasanya ditempatkan di dasar lubang dan tidak meledak secara simetris ke segala arah seperti di ruang terbuka. Dengan radius zona remuk sebesar 4 meter, volume zona tersebut dapat dihitung menggunakan rumus volume setengah bola:

$$V_{crush} = (2/3)\pi R_c^3 = (2/3)\pi(4.0)^3 = 134.0 \text{ m}^3$$

Nilai ini menggambarkan volume batuan yang mengalami kerusakan total akibat tekanan langsung dari bahan peledak, dan merupakan bagian penting dalam menilai efisiensi energi peledakan serta menentukan apakah terjadi *overblasting* pada kegiatan tersebut.

e. Analisis Efisiensi Energi Peledakan

Untuk mengevaluasi efisiensi penggunaan bahan peledak, perlu dilakukan perbandingan antara nilai *powder factor* desain dengan nilai aktual pada zona remuk. *Powder factor* aktual pada zona remuk (PF_{crush}) dihitung dengan membagi jumlah muatan bahan peledak dalam satu lubang (Q) dengan volume zona remuk (V_{crush}), menggunakan rumus: $PF_{crush} = Q / V_{crush}$. Dengan muatan sebesar 43,28 kg dan volume zona remuk sebesar 134 m³, diperoleh nilai $PF_{crush} = 43,28 / 134 \approx 0,323 \text{ kg/m}^3$. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan *powder factor* desain yaitu 0,245

kg/m³, yang mengindikasikan bahwa energi peledakan terlalu terkonsentrasi di zona remuk.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa zona remuk mencakup 75,8% dari total volume batuan yang dipengaruhi ledakan. Konsentrasi energi yang tinggi pada zona ini mengindikasikan potensi *overblasting*, menghasilkan fragmentasi batuan yang terlalu halus, dan meningkatkan biaya operasional seperti pengangkutan dan pengolahan. Oleh karena itu, hasil perbandingan ini penting sebagai dasar untuk mengoptimalkan desain peledakan agar distribusi energi lebih merata dan efisien.

4. Simpulan

Hasil analisis geometri peledakan dan karakteristik lapisan limestone, dapat disimpulkan bahwa zona remuk memegang peranan penting dalam efisiensi penggunaan energi bahan peledak. Dengan muatan peledak sebesar 43,28 kg dan radius zona remuk sekitar 4 meter, diperoleh volume zona remuk sebesar 134 m³ atau sekitar 75,8% dari total volume batuan yang diledakkan. Nilai *powder factor* aktual pada zona remuk sebesar 0,323 kg/m³ menunjukkan adanya konsentrasi energi yang tinggi di area tersebut, melebihi nilai desain sebesar 0,245 kg/m³. Hal ini mengindikasikan potensi terjadinya *overblasting* yang dapat berdampak pada fragmentasi batuan yang terlalu halus serta meningkatnya biaya operasional. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi dan optimasi desain peledakan agar distribusi energi lebih merata dan proses peledakan menjadi lebih efisien serta ramah terhadap kondisi geologi batuan setempat.

Daftar Pustaka

- Adhikari, G. R. (2006). *Blasting in Mining—New Trends*. Taylor & Francis.
- Bhandari, S. (1997). *Engineering Rock Blasting Operations*. Rotterdam: Balkema.
- Hu, Y., et al. (2024). Assessing the Impact of Surface Blast Design Parameters on the Performance of a Comminution Circuit Processing a Copper-Bearing Ore. *Minerals*, 14(12), 1226.
- Hustrulid, W., & Bullock, R. (2001). *Underground Mining Methods*. SME.
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (1995). *Drilling and Blasting of Rocks*. Balkema.
- Konya, C. J., & Walter, E. J. (1990). *Rock Blasting and Overbreak Control*. US DOT.
- Langefors, U., & Kihlström, B. (1978). *The Modern Technique of Rock Blasting*. Wiley.
- McKenzie, C. (2009). *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*. Wiley.
- Persson, P. A., Holmberg, R., & Lee, J. (1994). *Rock Blasting and Explosives Engineering*. CRC Press.
- Siskind, D. E. (2000). *Blast Vibration and Seismograph Handbook*. ISEE.
- Zhang, Z., Gao, W., Li, K., & Li, B. (2020). Numerical simulation of rock mass blasting using particle flow code and particle expansion loading algorithm. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 104, 102119.