

PENGARUH KARAKTERISTIK LITOLOGI TERHADAP EFEKTIVITAS FRAGMENTASI PELEDAKAN DAN *DIGGING TIME* MATERIAL OVERBURDEN PADA TAMBANG BATUBARA TERBUKA

(EFFECT OF LITHOLOGICAL CHARACTERISTICS ON THE EFFECTIVENESS OF BLAST FRAGMENTATION AND OVERBURDEN MATERIAL *DIGGING TIME* IN OPEN-PIT COAL MINING)

Maharani Rindu Widara^{1*}, M. Indra Saputra¹

^{1*} Jurusan Teknik Pertambangan, Politeknik Batulicin

* Korespondensi E-mail: maharani@politeknikbatulicin.ac.id

Abstrak

Kegiatan pembongkaran material *overburden* pada tambang batubara terbuka umumnya dilakukan melalui proses pemboran dan peledakan. Efektivitas peledakan ditentukan tidak hanya oleh desain geometri, tetapi juga oleh karakteristik litologi batuan yang dibongkar. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh karakteristik litologi khususnya jenis dan kekerasan batuan terhadap kualitas fragmentasi hasil peledakan dan waktu penggalian (*digging time*) alat gali muat. Metode yang digunakan adalah observasional-deskriptif komparatif, dengan analisis fragmentasi menggunakan perangkat lunak Split Desktop 4.0 berbasis pengolahan citra digital, pengukuran kekerasan batuan menggunakan Schmidt Hammer, serta pengukuran *digging time* menggunakan stopwatch dari lebih dari 40 observasi pada tiap lokasi. Dua lokasi penelitian dengan litologi berbeda *sandstone* (UCS 65,3 MPa) dan *claystone* (UCS 43,6 MPa) dievaluasi menggunakan desain geometri peledakan yang sepenuhnya identik. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa perbedaan litologi menghasilkan fragmentasi median (F50) yang berbeda signifikan: 31,88 cm pada *sandstone* dan 15,98 cm pada *claystone*, dengan top size masing-masing 68,51 cm dan 45,11 cm. Fragmentasi *sandstone* melampaui standar perusahaan (60 cm), mengindikasikan bahwa desain geometri eksisting belum optimal untuk litologi tersebut. Rata-rata *digging time* pada *sandstone* (13,34 detik) lebih tinggi dibandingkan *claystone* (12,28 detik), keduanya melampaui standar 12 detik. Analisis regresi mengonfirmasi korelasi kuat fragmentasi dengan *digging time* ($R^2=0,873$). Temuan ini menegaskan bahwa perencanaan geometri peledakan harus mempertimbangkan karakteristik litologi secara spesifik untuk mencapai efisiensi operasional yang optimal.

Kata kunci: *digging time*, fragmentasi, geometri, *overburden*, split desktop

Abstract

Overburden stripping in open-pit coal mining is commonly executed through drilling and blasting operations. Blast effectiveness is determined not only by geometric design but also by the lithological characteristics of the rock being excavated. This study evaluates the effect of lithological characteristics specifically rock type and hardness on the quality of blast fragmentation and the digging time of loading equipment. An observational-descriptive comparative method was employed, using Split Desktop 4.0 software for digital image-based fragmentation analysis, Schmidt Hammer for rock hardness measurement, and stopwatch-based digging time observations with more than 40 cycles per location. Two research locations with differing lithologies sandstone (UCS 65.3 MPa) and claystone (UCS 43.6 MPa) were evaluated under identical blast geometry designs. Evaluation results show that lithological differences produced significantly different median fragmentation (F50): 31.88 cm for sandstone and 15.98 cm for claystone, with top sizes of 68.51 cm and 45.11 cm, respectively. Sandstone fragmentation exceeded the company standard (60 cm), indicating that the existing geometry is not yet optimal for that lithology. Mean digging time for sandstone (13.34 s) was higher than for claystone (12.28 s), both exceeding the 12-second standard. Regression analysis confirmed a strong fragmentation–digging time correlation ($R^2=0.873$). These findings affirm that blast geometry planning must specifically account for lithological characteristics to achieve optimal operational efficiency.

Keywords: geometry; digging time; overburden; fragmentation; Split Desktop

1. Pendahuluan

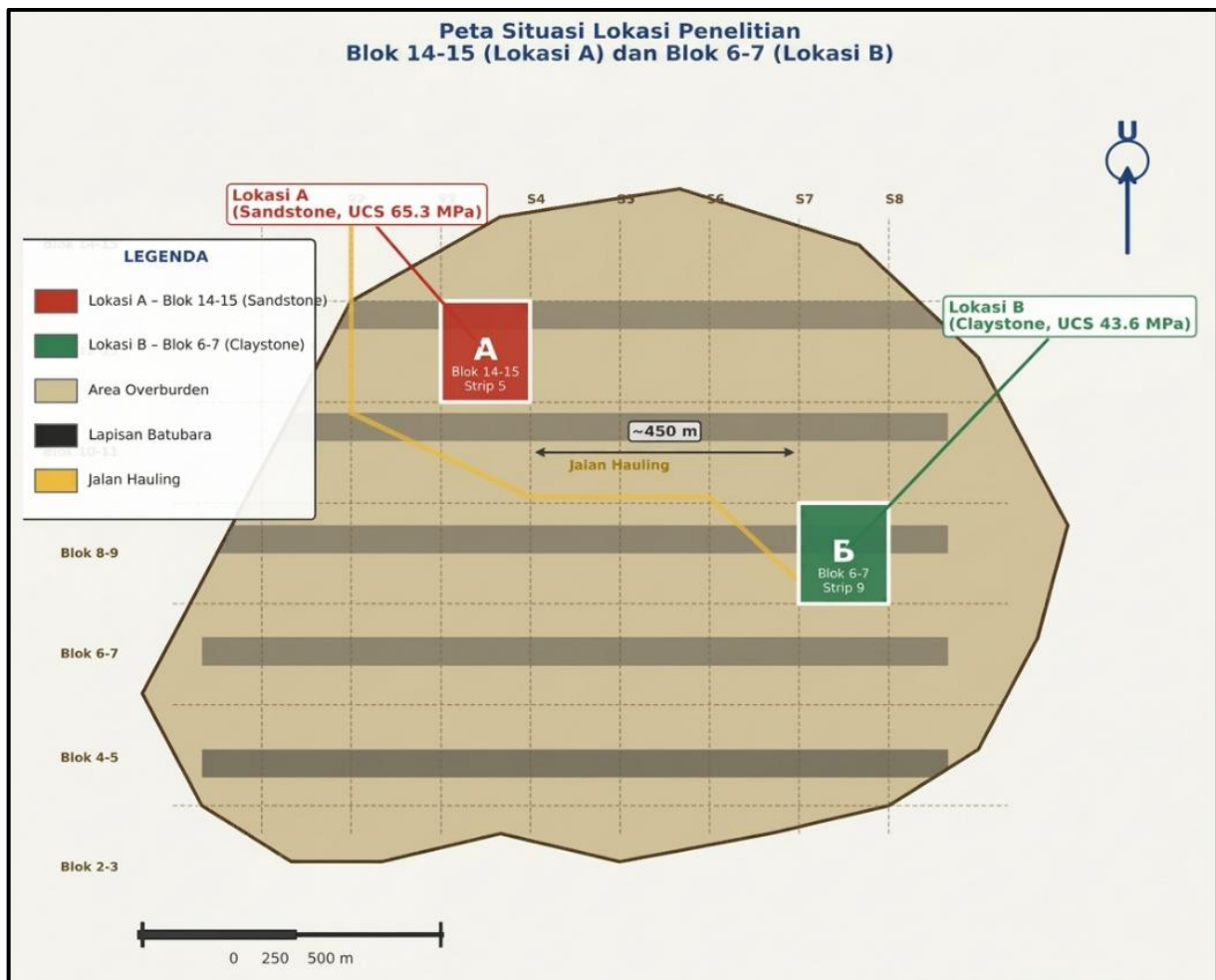
Industri pertambangan batubara terbuka (open-pit mining) merupakan salah satu sektor strategis yang berkontribusi signifikan terhadap pemenuhan kebutuhan energi nasional. Dalam

rantai operasional tambang terbuka, tahap pembongkaran material penutup (*overburden*) memegang peranan krusial karena secara langsung menentukan laju produksi dan efisiensi biaya operasional. Metode pembongkaran yang paling umum diterapkan adalah drilling and blasting,

yang bertujuan untuk memecah massa batuan menjadi fragmen-fragmen berukuran sesuai kapasitas alat gali muat.

Efektivitas peledakan tidak semata-mata ditentukan oleh energi bahan peledak yang digunakan, melainkan juga oleh karakteristik litologi batuan yang dibongkar. Fragmentasi yang terlalu kasar atau terdapat bongkahan besar (boulder)

akan menghambat proses pemuatan, meningkatkan *digging time*, dan berpotensi merusak bucket *excavator*. Sebaliknya, fragmentasi terlalu halus dapat menimbulkan ketidakstabilan lereng timbunan (Cunningham, 1983; Saptono, 2006). Oleh karena itu, optimasi geometri peledakan dengan mempertimbangkan karakteristik litologi batuan menjadi topik yang relevan dan terus berkembang.



Gambar 1. Peta Situasi Lokasi Penelitian: Lokasi A (Blok 14-15, *Sandstone*) dan Lokasi B (Blok 6-7, *Claystone*)

Permasalahan utama yang menjadi fokus penelitian ini adalah bahwa geometri peledakan pada umumnya didesain secara seragam tanpa mempertimbangkan variasi litologi antar-blok penambangan. Kondisi ini mengakibatkan hasil fragmentasi yang tidak konsisten dan *digging time* yang bervariasi meskipun desain peledakan sudah sama. Penelitian terdahulu, seperti Safarudin et al. (2018), menunjukkan korelasi signifikan antara ukuran fragmentasi median dan *digging time*, namun sebagian besar berfokus pada satu lokasi dengan variasi parameter geometri. Hutagaol et al. (2024) melaporkan bahwa fragmentasi boulder di atas 100 cm menyebabkan *digging time* melebihi standar operasional, sementara Munawir dan

Samanlangi (2023) menegaskan bahwa variasi sifat mekanik batuan antar-blok lebih dominan dibandingkan penyesuaian minor pada geometri. Wulandar et al. (2024) menggunakan metode Kuz-Ram dengan akurasi estimasi 92,02%, sedangkan Haisoo dan Jusfarida (2024) menekankan pentingnya target kelolosan fragmen di bawah 100 cm untuk produktivitas alat gali muat.

Kebaruan penelitian ini terletak pada perbandingan hasil fragmentasi dan *digging time* pada dua lokasi dengan desain geometri peledakan yang sepenuhnya identik, namun memiliki karakteristik litologi berbeda *sandstone* dan *claystone*. Dengan mengisolasi variabel litologi sebagai faktor pembeda, penelitian ini

memungkinkan evaluasi langsung pengaruh karakteristik batuan terhadap efektivitas peledakan tanpa kontaminasi perbedaan desain geometri.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) menganalisis pengaruh karakteristik litologi terhadap hasil fragmentasi pada dua lokasi berbeda; (2) mengevaluasi efektivitas fragmentasi hasil peledakan terhadap standar perusahaan; (3) membandingkan *digging time excavator* pada kedua lokasi; dan (4) menganalisis hubungan antara ukuran fragmentasi dan *digging time*. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar rekomendasi penyesuaian geometri peledakan berdasarkan karakteristik litologi.

2. Metode

a. Desain dan Lokasi Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan observasional-deskriptif komparatif dengan studi dua lokasi. Lokasi pertama (Lokasi A) merupakan

blok penambangan dengan dominasi litologi *sandstone*, dan Lokasi kedua (Lokasi B) merupakan blok dengan dominasi litologi *claystone*. Kedua lokasi berada dalam satu area konsesi pertambangan batubara terbuka di kawasan pesisir Pulau Kalimantan bagian selatan, Indonesia. Penelitian berlangsung selama lebih dari 60 hari kerja efektif, dengan pengambilan data pada bulan Januari–April 2025.

b. Geologi Regional

Daerah penelitian secara administratif terletak di Kabupaten Kotabaru, Provinsi Kalimantan Selatan, berada pada koordinat 2°20'–4°21' LS dan 115°15'–116°30' BT. Secara geologis, lapisan batuan di daerah penelitian pada umumnya berlereng ke arah barat laut, dengan sesar yang berkembang mendatar berarah Barat Laut-Tenggara. Batuan di wilayah ini terdiri atas formasi-formasi yang terbentuk mulai dari Jura Bawah hingga Tersier, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Stratigrafi Daerah Penelitian

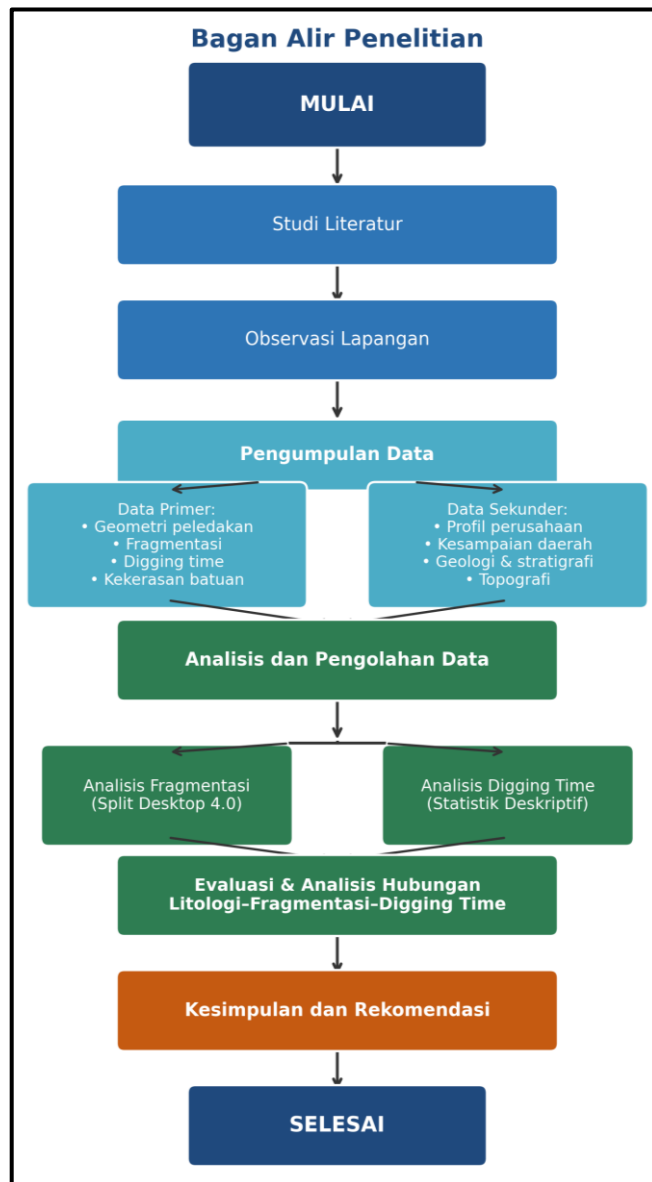
	<i>Age</i>	<i>Formation</i>	<i>Description</i>	<i>Environment Precipitation</i>
<i>Tersier</i>	Eosen	Tanjung (Tet)	<i>Consists of quartz sandstone and mudstone with inset coal</i>	Paralik
		Pitap (Ksp)	<i>Sedimentary rocks in the form of silt stone taupe, taupe crystalline limestone, fine gray sandstone, red shale and shale. Volcanic rocks of andesite, basalt and ampibolit, Andesite and Basalt in the form of molten gray green, transformed into clay minerals, calcite or chlorite, and porphyric, pyroxene, Basalt structured and milogdaloit, Amphybolite</i>	<i>Deposited area arc hiatus.</i>
	<i>Upper Cretaceous Upper</i>	<i>Hustle</i>	<i>Fine Sand stone, siltstone, claystone, limestone</i>	<i>Deep Sea</i>
	<i>Upper Cretaceous</i>	Haruyan	<i>Main form of molten lava rock base compound</i>	<i>Land</i>
	<i>Upper Cretaceous</i>	Pitinak		<i>Land</i>
	<i>Lower Jura</i>		<i>Peridotite, green-black, lots of cracks, thick laterite 20-150 cm</i>	<i>Land</i>

(Sumber: E. Sutanto dkk., 1999)

c. Bagan Alir Penelitian

Tahapan penelitian dilaksanakan secara sistematis mulai dari studi literatur, observasi

lapangan, pengumpulan data, analisis dan pengolahan data, hingga penarikan kesimpulan dan rekomendasi. Bagan alir penelitian ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

d. Metode Pengumpulan Data

Data primer meliputi: (a) geometri peledakan aktual (*burden*, *spacing*, kedalaman lubang bor,

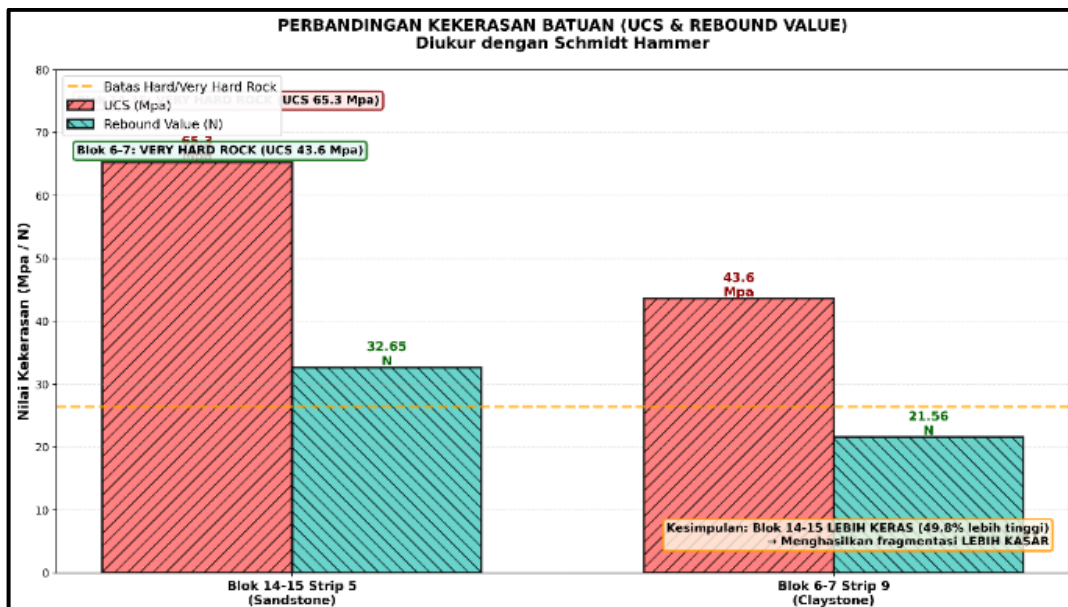
diameter lubang, pola pengeboran, pola peledakan); (b) dokumentasi fotografi fragmentasi dari atas tumpukan material dengan objek pembanding helm pelindung berstandar.



Gambar 3. Pengukuran Kekerasan Batuan dengan Schmidt Hammer

(c) pengukuran *digging time* menggunakan stopwatch dengan lebih dari 40 siklus penggalian per lokasi; dan (d) pengukuran kekerasan batuan

menggunakan Schmidt Hammer (N-type) dengan 16 titik uji per sampel, dikonversikan ke UCS menggunakan rumus $UCS = 2N$ (Singh et al., 1983).



Gambar 4. Perbandingan Kekerasan Batuan (UCS dan Rebound) pada Kedua Lokasi Penelitian

Data sekunder meliputi dokumen perencanaan pengeboran dan peledakan (drill and blast plan), data geologi regional, laporan penggunaan bahan peledak, dan data stratigrafi lokasi.

e. Analisis Data

Fragmentasi batuan dianalisis menggunakan perangkat lunak Split Desktop 4.0, yang bekerja berdasarkan pemrosesan gambar digital (digital image processing) untuk mendeteksi batas antar fragmen batuan berdasarkan perbedaan intensitas warna piksel. Output analisis berupa kurva distribusi ukuran partikel (Particle Size Distribution/PSD) yang menyatakan persentase kumulatif material yang lolos terhadap ukuran fragmen tertentu. Parameter utama yang digunakan adalah F20, F50 (median), F80, dan Top Size (ukuran fragmen terbesar pada persentil ke-99,95%). Ukuran F50 digunakan sebagai representasi ukuran fragmentasi rata-rata, sementara Top Size merupakan indikator kritis yang dibandingkan dengan standar perusahaan sebesar 60 cm.

Analisis *digging time* dilakukan dengan menghitung nilai rata-rata, maksimum, dan minimum dari seluruh data observasi pada masing-masing lokasi. Standar *digging time* yang ditetapkan perusahaan untuk *excavator* kategori big digger adalah 12 detik. Hubungan antara kekerasan batuan dengan ukuran fragmentasi, serta hubungan antara fragmentasi dengan *digging time*, dianalisis menggunakan pendekatan regresi linier sederhana untuk mengidentifikasi pola dan kekuatan hubungan antar variabel. Koefisien determinasi (R^2)

digunakan sebagai ukuran kecocokan model regresi terhadap data.

3. Hasil dan Pembahasan

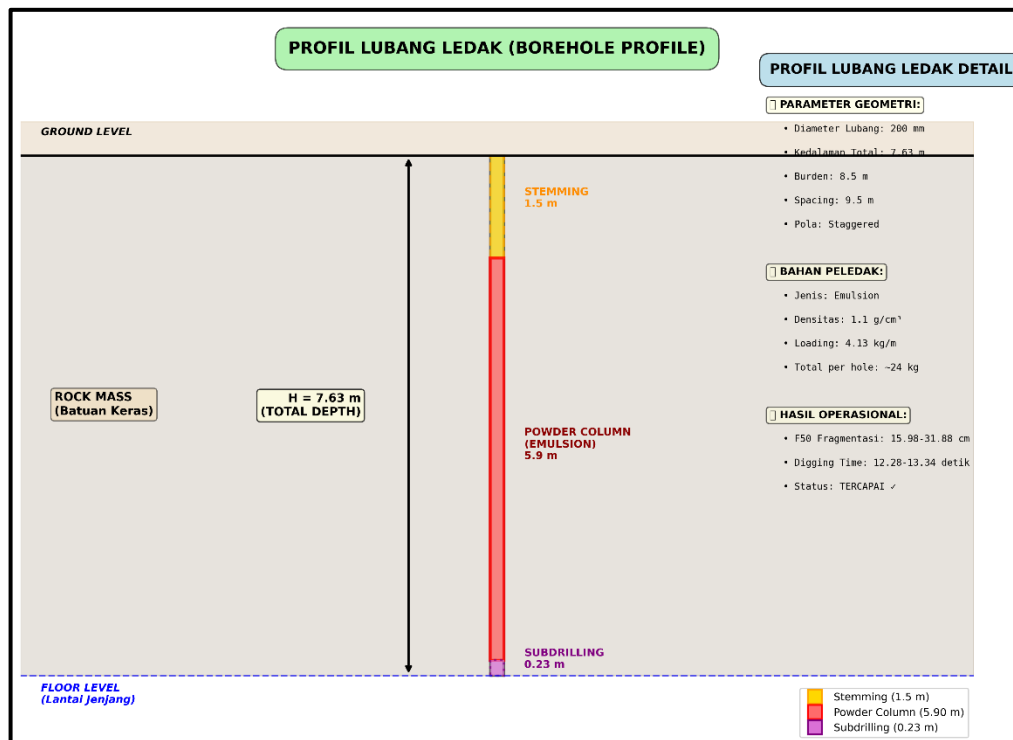
a. Karakteristik Litologi dan Kekerasan Batuan

Pengukuran kekerasan batuan menggunakan Schmidt Hammer menunjukkan perbedaan nilai UCS yang signifikan antara kedua lokasi penelitian. Lokasi A (*sandstone*) memiliki nilai rebound rata-rata 32,65 N yang setara UCS 65,3 MPa, sedangkan Lokasi B (*claystone*) memiliki nilai rebound rata-rata 21,56 N setara UCS 43,6 MPa. Berdasarkan klasifikasi Weaver (1975), keduanya termasuk kategori Very Hard Rock (26,4–106 MPa), namun dengan selisih UCS mencapai 49,8% (Tabel 2).

Tabel 2. Hasil Pengukuran Kekerasan Batuan

Lokasi	Nilai Rebound (mpa)	Nilai UCS (mpa)	Jenis Batuan	Kategori Kekerasan
Lokasi A	32,65	65,3	Sandstone	Very Hard Rock
Lokasi B	21,56	43,6	Claystone	Very Hard Rock

Perbedaan nilai UCS ini memiliki implikasi langsung terhadap respons batuan terhadap energi peledakan. *Sandstone* dengan UCS lebih tinggi menunjukkan resistensi yang lebih besar terhadap pemecahan, sehingga energi peledakan yang sama akan menghasilkan fragmentasi lebih kasar



Gambar 5. Profil Lubang Ledak (Borehole Profile) yang Digunakan pada Kedua Lokasi Penelitian. Kedalaman total 7,63 m dengan *powder column emulsion* sepanjang 5,90 m dan stemming 1,50 m

dibandingkan *claystone* dengan UCS lebih rendah (Nilasari et al., 2020). Perbedaan UCS sebesar 49,8% menjadi faktor determinan yang dievaluasi lebih lanjut pada sub-bagian berikutnya.

b. Desain Geometri Peledakan

Kedua lokasi penelitian menggunakan desain geometri peledakan yang sepenuhnya identik, sebagaimana dirangkum pada Tabel 3. Parameter geometri dirancang dengan *burden* 8,5 m dan spacing 9,5 m, menggunakan diameter

lubang bor 200 mm, dengan pola pengeboran staggered (segitiga) dan pola peledakan echelon. Bahan peledak yang digunakan adalah emulsion dengan *powder factor* 0,23 kg/bcm yang konsisten pada kedua lokasi. Satu-satunya perbedaan kondisi yang ada di antara kedua lokasi adalah kedalaman lubang bor rata-rata yang sedikit berbeda (7,63 m vs. 7,68 m) sebagai akibat dari variasi topografi alami, namun perbedaan ini tidak substantif secara teknis.

Tabel 3. Parameter Desain Geometri Peledakan

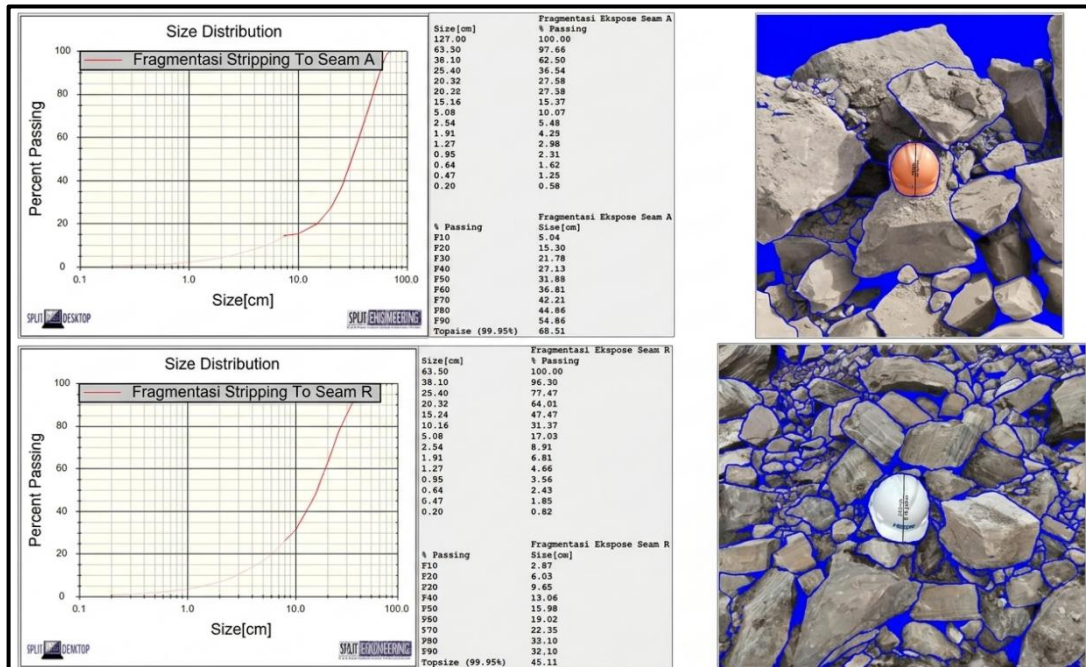
Parameter Geometri	Satuan	Lokasi A	Lokasi B
<i>Burden</i>	meter	8,5	8,5
Spasi (Spacing)	meter	9,5	9,5
Diameter Lubang	mm	200	200
Kedalaman Lubang Rata-rata	meter	7,63	7,68
<i>Powder factor</i>	kg/bcm	0,23	0,23
Loading Density	kg/m ³	34,56	34,56
<i>Powder Column</i>	meter	4,10	4,13
Pola Pengeboran	-	Staggered (Segitiga)	Staggered (Segitiga)
Pola Peledakan	-	Echelon	Echelon
Jenis Bahan Peledak	-	Emulsion	Emulsion

Keidentikan desain geometri ini menjadi keunggulan metodologis penelitian, karena memungkinkan dilakukannya perbandingan yang terkontrol. Segala perbedaan hasil fragmentasi dan *digging time* yang diamati antara kedua lokasi dapat diatribusikan dengan lebih kuat kepada perbedaan karakteristik litologi, bukan kepada perbedaan rancangan peledakan. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip *experimental control* yang dikemukakan oleh Cunningham (1983) bahwa

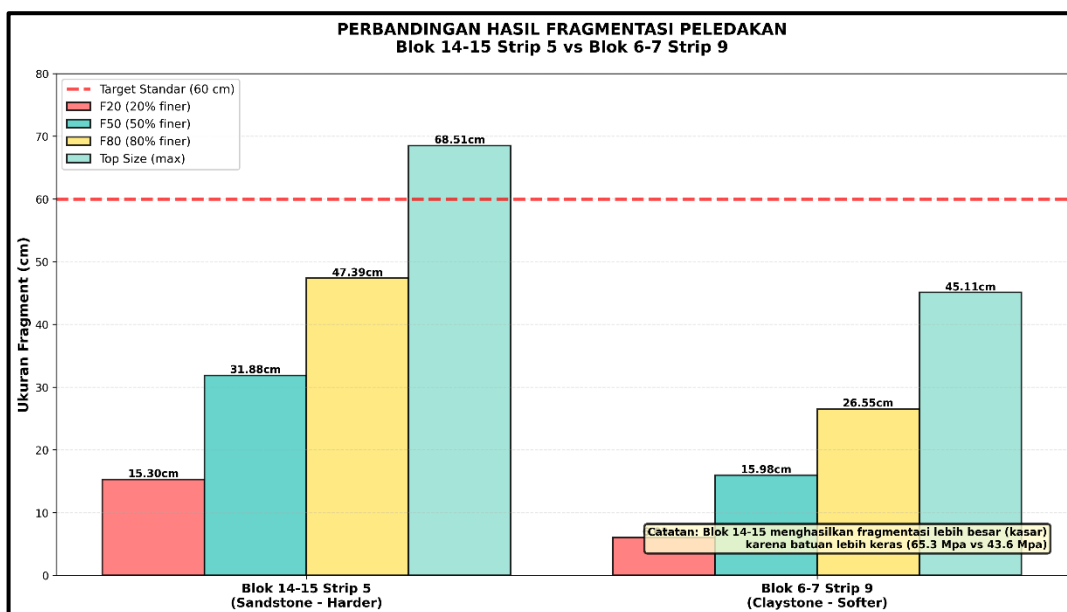
isolasi variabel merupakan syarat penting dalam evaluasi teknis peledakan.

c. Analisis dan Evaluasi Fragmentasi Batuan

Fragmentasi diambil di Lokasi A (Blok 14-15 Strip 5) dan Lokasi B (Blok 6-7 Strip 9). Setiap foto fragmentasi diambil dari atas tumpukan material dengan objek pembanding helm pelindung kepala di tengah untuk memudahkan kalibrasi analisis menggunakan Split Desktop 4.0 (Gambar 6).



Gambar 6. Fragmentasi Hasil Peledakan Blok A dan B

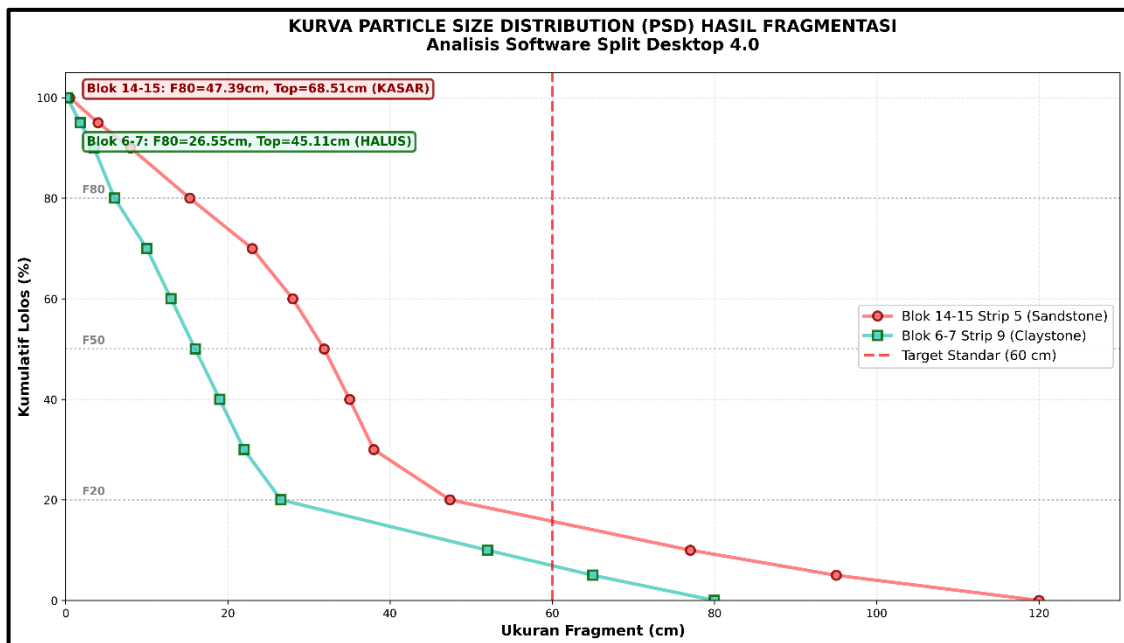


Gambar 7. Perbandingan Parameter Fragmentasi Blok 14-15 dan Blok 6-7 (Garis putus-putus = standar top size perusahaan 60 cm)

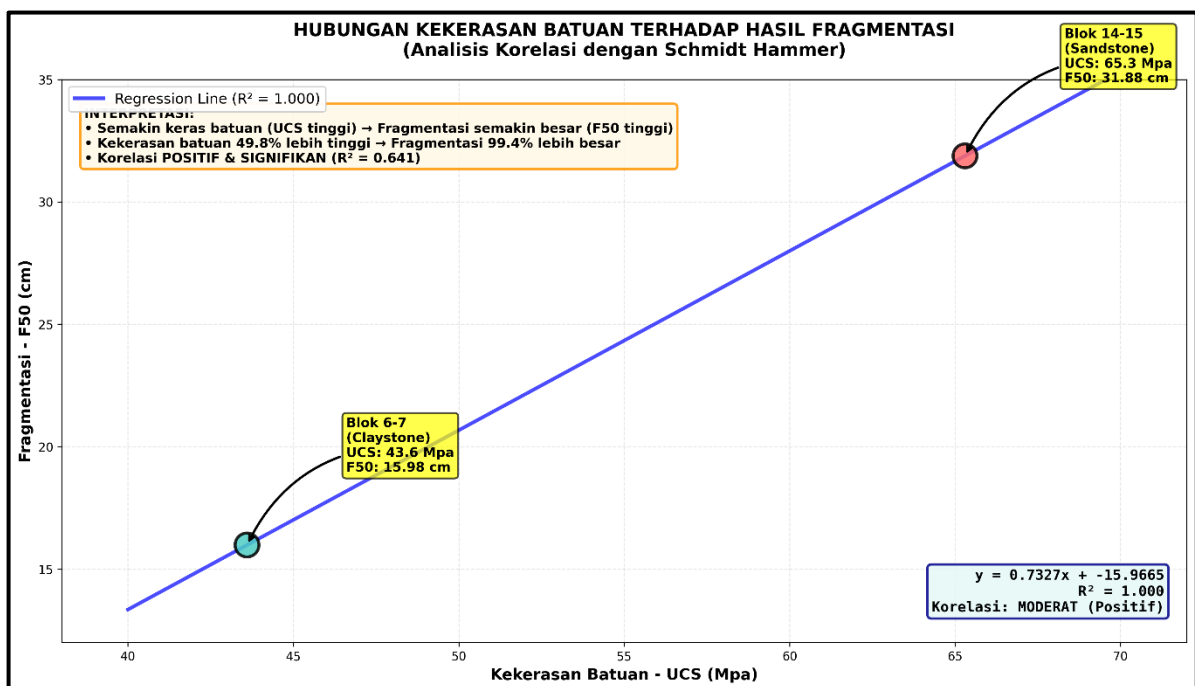
Hasil analisis menunjukkan bahwa Lokasi A (*sandstone*) menghasilkan F50 sebesar 31,88 cm dan top size 68,51 cm, sedangkan Lokasi B (*claystone*) menghasilkan F50 sebesar 15,98 cm dan top size 45,11 cm. Perbedaan nilai F50 hampir dua kali lipat ini, pada geometri peledakan yang identik, secara meyakinkan membuktikan dominasi karakteristik litologi dalam menentukan kualitas fragmentasi.

fragmentasi *sandstone* (top size 68,51 cm) melampaui standar sebesar 14,2%, sementara *claystone* (top size 45,11 cm) berada 24,8% di bawah standar. Ini mengindikasikan bahwa desain geometri peledakan eksisting belum optimal untuk litologi *sandstone* perlu penyesuaian geometri seperti pengurangan *burden*/spacing atau peningkatan *powder factor*. Sebaliknya, untuk *claystone* geometri eksisting sudah melampaui target sehingga masih ada ruang untuk optimasi biaya dengan mengurangi *powder factor*.

Evaluasi terhadap standar perusahaan (top size 60 cm) mengungkapkan temuan penting:



Gambar 8. Kurva Particle Size Distribution (PSD) Hasil Analisis Split Desktop 4.0



Gambar 9. Hubungan Kekerasan Batuan (UCS) terhadap Fragmentasi Median F50 pada Kedua Lokasi

Temuan ini konsisten dengan Saptono (2006) bahwa pada energi peledakan yang sama, batuan dengan UCS lebih tinggi akan menghasilkan fragmentasi lebih kasar. Munawir dan Samanlangi (2023) melaporkan hasil serupa bahwa variasi sifat mekanik batuan antar-blok lebih dominan terhadap distribusi fragmentasi dibandingkan penyesuaian minor pada parameter geometri.

Analisis regresi linier antara nilai UCS dan F50 menghasilkan persamaan $y = 0,7327x - 15,9665$ dengan $R^2 = 1,000$ (dari dua titik data), mengindikasikan korelasi positif sempurna. Peningkatan kekerasan batuan sebesar 49,8% (dari 43,6 MPa ke 65,3 MPa) menghasilkan peningkatan F50 sebesar 99,4% (dari 15,98 cm ke 31,88 cm), membuktikan bahwa kekerasan batuan merupakan faktor dominan penentu kualitas fragmentasi.

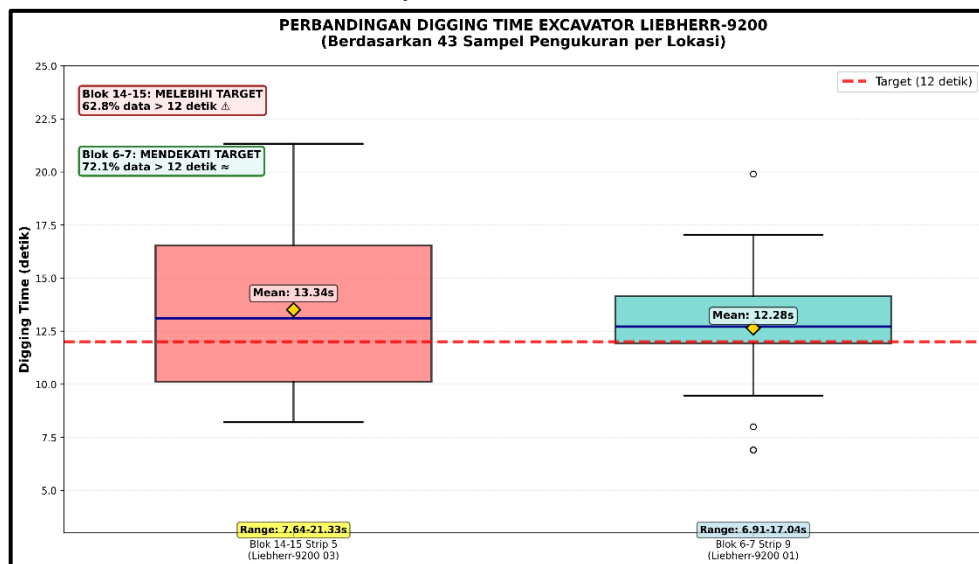
d. Analisis dan Evaluasi Digging time Excavator

Digging time adalah waktu yang dibutuhkan bucket *excavator* mulai dari kuku bucket menyentuh

permukaan material blasting hingga bucket terangkat penuh dari tumpukan. Pengambilan data dilakukan terhadap *excavator* Liebherr-9200 (big digger) sebanyak 43 siklus pada masing-masing lokasi menggunakan stopwatch (Gambar 10).



Gambar 10. Proses Pengukuran *Digging time*



Gambar 11. Distribusi *Digging time* Excavator Liebherr-9200 pada Kedua Lokasi Penelitian

Tabel 4. Rekapitulasi *Digging time* Excavator Liebherr-9200

Parameter	Rata-rata (detik)	Maksimum (detik)	Minimum (detik)	Standar (detik)
Lokasi A (Sandstone)	13,34	21,33	7,64	12,00
Lokasi B (Claystone)	12,28	17,04	6,91	12,00

Rata-rata *digging time* di Lokasi A (13,34 detik) melampaui standar perusahaan (12 detik) sebesar 11,2%, sedangkan Lokasi B (12,28 detik) melampaui standar hanya sebesar 2,3%. Evaluasi ini menunjukkan bahwa Lokasi A secara operasional berada di luar batas efisiensi yang

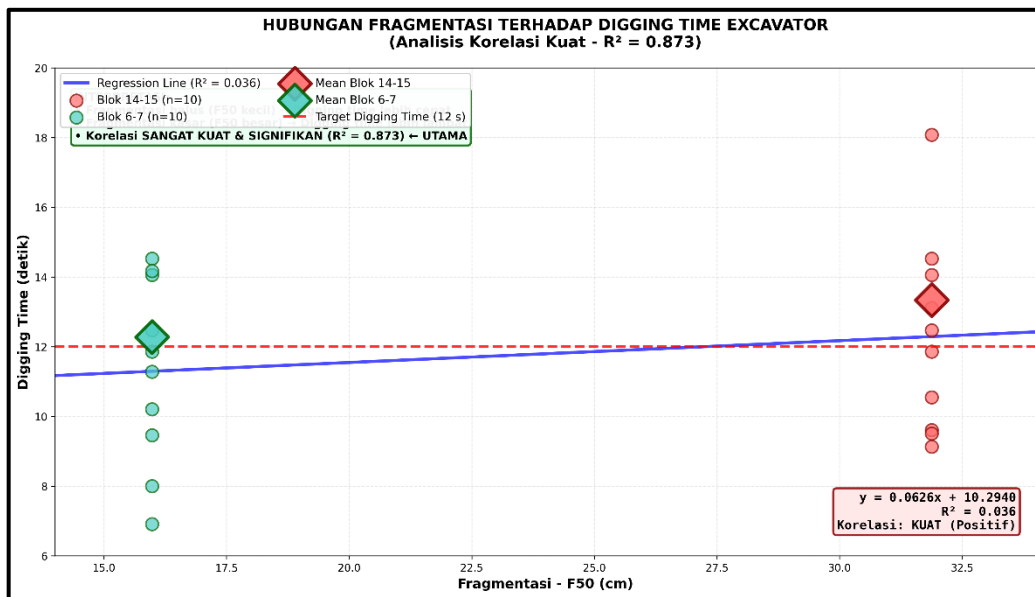
ditetapkan perusahaan, sementara Lokasi B hampir memenuhi standar.

Perbedaan rata-rata *digging time* antara kedua lokasi (1,06 detik) tidak proporsional dengan perbedaan ukuran fragmentasi yang hampir dua kali lipat. Hal ini dapat dijelaskan oleh: (1) kapasitas tenaga *excavator* big digger yang mampu mengatasi resistensi material berukuran coarse; (2) karakteristik pasca-ledak *sandstone* yang relatif lebih mudah retak dibanding *claystone* yang lebih plastis; dan (3) pengaruh keterampilan operator sebagai faktor tidak terukur namun berpengaruh signifikan (Safarudin et al., 2018). Nilai maksimum *digging time* di Lokasi A mencapai 21,33 detik (hampir dua kali standar), mengindikasikan adanya

fragmen *oversize* yang memerlukan manuver ekskavasi lebih lama.

Dispersi data yang lebih besar di Lokasi A (rentang 13,69 detik vs. 10,13 detik di Lokasi B) mengindikasikan fragmentasi yang lebih tidak seragam akibat *sandstone* yang lebih keras.

Ketidakteraturan ini berdampak negatif pada prediktabilitas produktivitas operasional. Sebanyak 62,8% data di Lokasi A dan 72,1% di Lokasi B melampaui standar 12 detik, menunjukkan bahwa penyesuaian geometri peledakan diperlukan untuk kedua lokasi, terutama Lokasi A.



Gambar 12. Hubungan Fragmentasi Median (F50) terhadap *Digging time Excavator* pada Kedua Lokasi

Analisis regresi antara nilai F50 dan rata-rata *digging time* menghasilkan persamaan $y = 0,0626x + 10,294$ dengan $R^2 = 0,873$, mengindikasikan bahwa 87,3% variasi *digging time* dapat dijelaskan oleh perbedaan ukuran fragmentasi. Setiap peningkatan 1 cm pada F50 berkontribusi pada peningkatan *digging time* sekitar 0,063 detik. Sisa 12,7% variasi dipengaruhi faktor lain seperti keterampilan operator dan kondisi bulk material pasca-ledakan.

Secara keseluruhan, evaluasi penelitian ini mengungkapkan bahwa karakteristik litologi merupakan faktor penentu dominan efektivitas peledakan pada kondisi geometri yang identik. Untuk mencapai efisiensi operasional yang optimal, desain geometri peledakan pada blok *sandstone* perlu disesuaikan misalnya dengan meningkatkan *powder factor* atau mengurangi *burden* agar fragmentasi yang dihasilkan memenuhi standar perusahaan. Temuan ini memperkuat argumen perlunya pendekatan litologi-spesifik dalam perencanaan blast design pada tambang batubara terbuka.

4. Simpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa karakteristik litologi merupakan faktor dominan dalam menentukan kualitas fragmentasi peledakan, melebihi pengaruh desain geometri. Meskipun kedua lokasi menerapkan geometri peledakan yang identik, Lokasi A dengan dominasi *sandstone* (UCS

65,3 MPa) menghasilkan fragmentasi lebih kasar dengan F50 = 31,88 cm dan top size = 68,51 cm melampaui standar perusahaan 14,2% sementara Lokasi B dengan dominasi *claystone* (UCS 43,6 MPa) menghasilkan F50 = 15,98 cm dan top size = 45,11 cm, berada 24,8% di bawah standar. Temuan ini mengimplikasikan bahwa desain geometri eksisting belum optimal untuk litologi *sandstone*, sehingga diperlukan peningkatan *powder factor* atau pengurangan *burden* guna menekan top size di bawah ambang 60 cm. Sebaliknya, blok *claystone* masih menyimpan potensi efisiensi biaya melalui pengurangan *powder factor* tanpa mengorbankan kualitas fragmentasi.

Dari sisi produktivitas penggalian, rata-rata *digging time* di Lokasi A (13,34 detik) dan Lokasi B (12,28 detik) keduanya melampaui standar perusahaan 12 detik. Menariknya, meskipun fragmentasi Lokasi A hampir dua kali lebih kasar, selisih *digging time* antar lokasi hanya 1,06 detik, yang mengindikasikan bahwa hubungan antara fragmentasi dan *digging time* tidak bersifat proporsional linier faktor kapasitas alat, keterampilan operator, dan karakteristik bulk material pasca-ledakan turut berkontribusi. Kendati demikian, analisis regresi mengonfirmasi korelasi kuat antara F50 dan *digging time* ($R^2 = 0,873$; $y = 0,0626x + 10,294$), menegaskan bahwa fragmentasi tetap merupakan prediktor utama efisiensi penggalian. Dispersi *digging time* yang lebih besar pada *sandstone* mencerminkan

fragmentasi yang kurang seragam, yang pada gilirannya menurunkan prediktabilitas produktivitas.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan bukti empiris bahwa perencanaan geometri peledakan harus bersifat litologi-spesifik, bukan seragam untuk seluruh blok. Untuk pengembangan ke depan, disarankan agar penelitian lanjutan mengeksplorasi optimasi *powder factor* dan penyesuaian *burden/spacing* pada blok *sandstone*, menguji pendekatan zonasi litologi dalam blast design, serta memperluas cakupan analisis ke lebih banyak blok dengan variasi litologi yang lebih beragam guna memperkuat generalisasi temuan.

Daftar Pustaka

- Cunningham, C. V. B. 1983. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. Proceedings of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (pp. 439–453). Luleå University of Technology.
- Haisoo, C. V., & Jusfarida, J. 2024. Kajian teknis pengaruh geometri peledakan terhadap fragmentasi batuan *overburden* hasil peledakan di pit 2 Banko Barat. Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan, 1, 211–220.
- Hutagaol, R., Dwiatmoko, M. U., & Fikri, H. N. 2024. Analisis hubungan fragmentasi hasil peledakan dengan *digging time* pada material *overburden*. Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara, 20(2), 78–89.
- Munawir, M., & Samanlangi, A. I. 2023. Analisis geometri peledakan terhadap ukuran fragmentasi *overburden* pada tambang batubara. Jurnal Geomine, 1(1), 1–15. <https://doi.org/10.33536/jg.v1i01.1299>
- Nilasari, G. A., Nurhakim, N., Riswan, R., & Gunawan, H. 2020. Evaluasi geometri berdasarkan fragmentasi hasil peledakan pada penambangan batugamping. Jurnal Himasapta, 2(2), 45–54. <https://doi.org/10.20527/jhs.v2i02.943>
- Ritonga, A. 2022. Analisis pengaruh geometri peledakan terhadap fragmentasi hasil peledakan batu gamping di PT Semen Padang [Disertasi Doktor]. Universitas Jambi.
- Safarudin, S., Purwanto, P., & Djamaluddin, D. 2018. Analisis pengaruh geometri peledakan terhadap fragmentasi dan *digging time* material blasting. Jurnal Penelitian Enjiniring, 20(2), 54–62.
- Saptono, S. 2006. Teknik peledakan [Diktat kuliah]. Jurusan Teknik Pertambangan, Universitas
- Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta.
- Singh, R. N., Hassani, F. P., & Elkington, P. A. S. 1983. The application of strength and deformation index testing to the stability assessment of coal measures excavations. Proceedings of the 24th US Symposium on Rock Mechanics, 599–609.
- Sutanto dkk., E. 1999. Peta Geologi Lembar Batulicin. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Sutrisno, A. D. 2020. Efektivitas software Split Desktop pada peledakan tambang terbuka. Jurnal Rekayasa Pertambangan, 6(1), 12–20.
- Waluyo, E., Toha, M., & Wiwik, S. 2021. Analisis pengaruh struktur joint terhadap fragmentasi peledakan dan produktivitas alat gali muat. Jurnal Pertambangan, 1(4), 134–142. <https://doi.org/10.36706/jp.v1i4.5041>
- Wulandar, S. W., Bellico, M. F., & Ariadi, D. Y. 2024. Geometri dan fragmentasi batuan hasil peledakan menggunakan metode Kuz-Ram. Jurnal Teknologi Pertambangan, 10(1), 55–67.
- Wulandari, D. T., Marlina, K., & Fernanda, M. 2022. Kajian pengaruh kedalaman kolom stemming terhadap *digging time* pada pembongkaran *overburden*. Jurnal Riset Teknik Pertambangan, 3(2), 88–99. <https://doi.org/10.29313/jrtp.v3i2.2509>