

# Eksplorasi Prinsip Gelombang Kejut Energi Tinggi Berbasis Fisika Nuklir untuk Teknologi Penghancuran Batuan dalam Industri Pertambangan

Oldi Malfri Lambonan<sup>1</sup>, Marson James Budiman<sup>2</sup>, Antonius P.G. Manginsela<sup>3</sup>, Andreas Randy Wangarry<sup>4</sup>, Yuyun Wabula<sup>5</sup>

Teknik Listrik, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado, Manado <sup>1</sup>  
Teknik Komputer, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado, Manado <sup>2</sup>  
Teknik Komputer, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado <sup>3</sup>  
Akuntansi Keuangan, Akuntansi, Politeknik Negeri Manado, Manado <sup>4</sup>  
Badan Riset dan Inovasi Nasional <sup>5</sup>  
E-mail: oldilambonan@elektro.polimdo.ac.id

## Abstrak

*Industri pertambangan batuan keras menghadapi tantangan signifikan dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas proses penghancuran material geologi yang ekstrem. Teknologi konvensional seperti bor mekanik dan bahan peledak umum seringkali memiliki keterbatasan dalam penetrasi, distribusi energi, serta dampak lingkungan yang tidak terkontrol. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi prinsip dasar gelombang kejut energi tinggi yang terinspirasi dari konsep fisika nuklir, khususnya terkait mekanisme transfer energi cepat dan propagasi tekanan ekstrem dalam medium padat. Metode yang digunakan adalah kajian literatur ilmiah dan analisis teoritis terhadap parameter fisika utama seperti kecepatan gelombang, tekanan puncak, densitas batuan, serta model matematis gelombang kejut. Hasil kajian menunjukkan bahwa pendekatan ini memiliki potensi untuk dikembangkan menjadi sistem penghancuran batuan yang lebih presisi, hemat energi, dan berkelanjutan. Studi ini memberikan fondasi awal bagi riset lanjutan menuju teknologi ekskavasi energi tinggi yang aman, efisien, dan adaptif terhadap kebutuhan industri pertambangan masa depan.*

**Kata kunci** — energi tinggi, fisika nuklir, gelombang kejut, penghancuran batuan, teknologi pertambangan.

## 1. PENDAHULUAN

Kegiatan eksplorasi dan produksi pada industri pertambangan batuan keras menuntut efisiensi tinggi dalam proses ekskavasi dan penghancuran material geologi yang memiliki tingkat kekerasan ekstrem. Teknologi konvensional seperti bor mekanik, bahan peledak umum (ANFO), dan metode pengeboran-hidrolik memiliki keterbatasan dalam efektivitas penetrasi, distribusi energi yang tidak merata, serta dampak lingkungan yang tidak terkontrol (Vogt, 2016). Tantangan-tantangan ini mendorong perlunya pendekatan teknologi baru yang mampu menghasilkan daya hancur tinggi namun tetap terkontrol dan berkelanjutan. Prinsip dasar fisika nuklir (Lvovsky, 2018) dan fenomena gelombang kejut energi tinggi (Wibowo, 2024) memberikan inspirasi untuk mengkaji kemungkinan pengembangan sistem penghancuran batuan non-konvensional yang lebih efisien. Studi-studi dalam dekade terakhir menunjukkan bahwa teknologi berbasis gelombang kejut, seperti explosive fracturing dan plasma pulse fracturing (Liew, et al, 2020), memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi pemecahan batuan. Namun, masih sedikit riset yang menelaah prinsip-prinsip fisika fundamental dari sistem tersebut dalam

eksplorasi awal berbasis teori nuklir dan dinamika gelombang tekanan ekstrem. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi prinsip dasar gelombang kejut energi tinggi yang terinspirasi dari konsep dalam fisika nuklir sebagai pendekatan awal terhadap desain sistem penghancur batuan masa depan. Studi ini bersifat teoritis dan eksploratif dengan merujuk pada hukum-hukum fisika klasik dan modern, seperti hukum kekekalan momentum, persamaan Rankine–Hugoniot, serta konsep tekanan implosif yang relevan dalam fenomena ledakan energi tinggi. Originalitas penelitian ini terletak pada pendekatannya yang mengkaji keterkaitan antara prinsip fisika nuklir dan kebutuhan teknologi eksplorasi tambang, terutama dalam menghasilkan desain sistem energi tinggi yang presisi dan adaptif. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi pijakan awal bagi pengembangan teknologi ekskavasi energi tinggi berbasis keilmuan fisika terapan dalam bidang vokasi, khususnya untuk program studi teknik fisika, teknik pertambangan, dan teknik energi. Manfaat utama dari penelitian ini adalah memberikan kerangka teoritis yang kuat untuk tahapan riset lanjutan, seperti simulasi numerik, perancangan prototipe skala laboratorium, dan validasi sistem berbasis teknologi energi tinggi dalam proses eksplorasi tambang. Dengan demikian, kajian ini berkontribusi dalam memperkaya basis ilmu pengetahuan vokasi yang aplikatif dan mendukung kemajuan teknologi industri sumber daya alam secara berkelanjutan.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi eksploratif dan teoretis (Morissan, 2017) (Mudjiyanto, 2018) yang bertujuan untuk mengkaji prinsip dasar gelombang kejut energi tinggi dalam penghancuran batuan keras, dengan pendekatan berbasis konsep fisika nuklir dan mekanika gelombang. Metode yang digunakan adalah pendekatan kualitatif-deskriptif (Sugiyono, 2019) melalui kajian literatur ilmiah dan analisis teoretis terhadap fenomena fisis yang relevan. Langkah-langkah penelitian ini diuraikan pada tabel berikut.

**Tabel 1.** Tahapan Penelitian

| Tahapan                            | Kegiatan                                                                       | Fokus Kajian/Isi                                                                                                                                              | Tujuan/Output                                                                                           |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Studi Literatur</b>             | Pengumpulan dan telaah pustaka dari jurnal dan buku ilmiah (10 tahun terakhir) | Gelombang kejut dalam medium padat, Transfer energi dalam peledakan, Fisika nuklir dalam tekanan ekstrem, Teknologi fracturing (explosive & non-konvensional) | Menyusun landasan teoritis dan memahami perkembangan teknologi terkini dalam penghancuran batuan        |
| <b>Analisis Teoretis</b>           | Kajian model matematis dan fisika dasar gelombang kejut                        | Persamaan Rankine–Hugoniot, Hukum kekekalan energi & momentum, Simulasi idealisasi perambatan gelombang                                                       | Menganalisis respons batuan terhadap tekanan tinggi menggunakan pendekatan teori gelombang dan mekanika |
| <b>Evaluasi &amp; Interpretasi</b> | Sintesis literatur dan teori untuk penilaian efektivitas teknologi             | Evaluasi efektivitas energi tinggi dalam fragmentasi, Identifikasi karakteristik sistem optimal                                                               | Menentukan parameter ideal dan tantangan sistem energi tinggi untuk aplikasi ekskavasi batuan           |
| <b>Perumusan Rekomendasi Awal</b>  | Penyusunan model awal dan arahan pengembangan lanjutan                         | Model konseptual sistem energi tinggi, Rekomendasi pengujian numerik & laboratorium                                                                           | Menjadi dasar perancangan dan simulasi sistem pada tahap berikutnya (riset lanjutan berbasis TKT)       |

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari kajian literatur dan analisis teoretis menunjukkan bahwa prinsip gelombang kejut energi tinggi memiliki potensi signifikan untuk diterapkan dalam penghancuran batuan keras di industri pertambangan. Gelombang kejut merupakan diskontinuitas dalam tekanan, densitas, dan energi yang merambat lebih cepat dari kecepatan suara dalam medium. Material padat seperti batuan, gelombang kejut dapat menyebabkan retakan mikro dan makro secara simultan, memungkinkan fragmentasi material secara cepat dan efisien. Berdasarkan studi Shi et al. (2018) dan Babaeian et al. (2020), metode penghancuran batuan dengan teknologi energi tinggi, seperti high-energy pulse fracturing dan plasma-assisted fragmentation, menunjukkan bahwa distribusi energi yang terarah dapat meningkatkan efisiensi fragmentasi dan mengurangi konsumsi energi dibanding metode peledakan konvensional. Analisis teoritis menggunakan persamaan Rankine–Hugoniot memberikan gambaran bahwa besar tekanan puncak  $P$  yang ditransfer ke batuan dipengaruhi oleh densitas awal  $\rho_0$ , kecepatan gelombang kejut  $u_s$ , dan kecepatan partikel  $u_p$  sebagai berikut:

$$P = \rho_0 \cdot u_s \cdot u_p \quad (1)$$

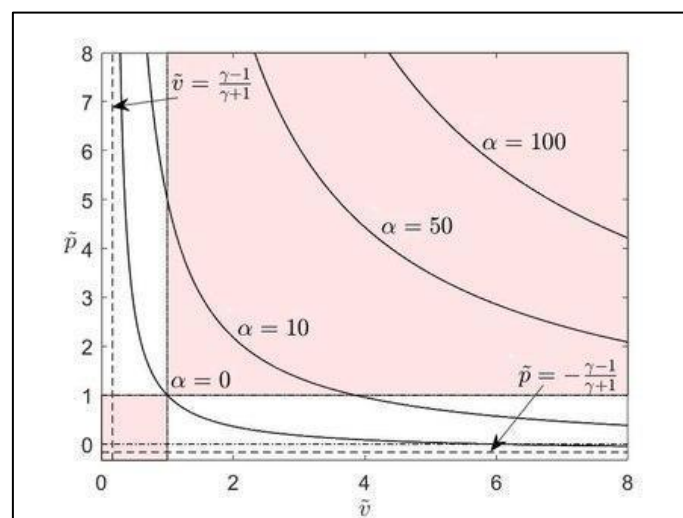
$P$  = tekanan (shock pressure) setelah gelombang kejut lewat (Pa)

$\rho_0$  = densitas awal medium sebelum kejut (kg/m<sup>3</sup>)

$u_s$  = kecepatan gelombang kejut (shock wave velocity) (m/s)

$u_p$  = kecepatan partikel di belakang front gelombang (particle velocity) (m/s)

Dalam menganalisis interaksi gelombang kejut dengan medium padat, pendekatan teoritis melalui persamaan Rankine–Hugoniot digunakan untuk memperkirakan tekanan puncak  $P$  yang ditransfer ke material. Namun, untuk memperoleh pemahaman yang lebih menyeluruh terhadap karakteristik termodinamika sistem akibat gelombang kejut, analisis dilanjutkan dengan pendekatan non-dimensi. Gambar berikut menyajikan representasi kurva Hugoniot dalam bentuk non-dimensi, yang mengilustrasikan hubungan antara tekanan tereduksi dan volume spesifik tereduksi untuk berbagai nilai parameter  $\alpha$ , yang merepresentasikan kontribusi relatif dari energi internal dalam sistem.



**Gambar 1.** Diagram Non-Dimensi Kurva Hugoniot

Simulasi ideal menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan partikel akibat sumber energi impulsif dapat meningkatkan tekanan yang diterima batuan secara eksponensial. Kondisi ini memungkinkan terjadinya fragmentasi bahkan pada batuan dengan tingkat kekerasan tinggi, sekaligus meningkatkan efisiensi proses ekskavasi. Pendekatan ini, meskipun diinspirasi oleh konsep dalam fisika nuklir, tidak memanfaatkan bahan radioaktif secara langsung, sehingga aman untuk dikembangkan dalam konteks teknologi pertambangan. Keunggulan utama dari pendekatan ini terletak pada karakteristik gelombang kejut yang dapat diarahkan dan dikontrol, menghasilkan distribusi energi yang lebih presisi dibandingkan peledakan konvensional. Melalui pengaturan parameter fisik seperti kecepatan partikel dan densitas batuan, tekanan puncak dapat direayasa agar sesuai dengan karakteristik geologi target. Hal ini memungkinkan fragmentasi yang lebih selektif dan terfokus, mengurangi kehilangan energi dan kerusakan pada area non-target. Dari sisi efisiensi energi, karena sistem bekerja secara impulsif dan hanya aktif saat dibutuhkan, konsumsi energi dapat ditekan lebih rendah dibanding metode konvensional yang bersifat mekanis atau kontinu. Ini berkontribusi pada penghematan energi operasional secara keseluruhan. Selain itu, metode ini cenderung menghasilkan getaran yang lebih terkendali dan tidak menimbulkan residu kimia, menjadikannya teknologi yang mendukung eksplorasi berkelanjutan dan ramah lingkungan. Proyeksi pengembangan sistem ini juga mengarah pada rancangan yang aman, efisien, dan adaptif. Aman karena tidak melibatkan bahan peledak kimia yang reaktif, efisien karena mampu mentransfer energi secara langsung dan tepat sasaran, serta adaptif karena memungkinkan integrasi dengan sistem sensor dan kendali otomatis, termasuk penggunaan teknologi robotik dalam ekskavasi medan geologi yang kompleks. Dengan dukungan validasi numerik dan eksperimental, sistem ini berpotensi dikembangkan menjadi solusi teknologi ekskavasi generasi baru yang menjawab tantangan industri secara ilmiah dan terukur. Hasil kajian yang mencakup potensi dan arah pengembangan teknologi ekskavasi berbasis gelombang kejut energi tinggi diuraikan pada tabel berikut.

**Tabel 2.** Potensi dan Arah Pengembangan Teknologi Ekskavasi Berbasis Gelombang Kejut Energi Tinggi

| <b>Aspek</b>                         | <b>Deskripsi</b>                                                                                            |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fenomena Dasar</b>                | Peningkatan kecepatan partikel akibat impuls energi tinggi meningkatkan tekanan batuan secara eksponensial. |
| <b>Efek Utama</b>                    | Fragmentasi batuan keras lebih efisien dan terarah bahkan pada formasi geologi ekstrem.                     |
| <b>Inspirasi Teknologi</b>           | Pendekatan fisika nuklir (non-radioaktif) sebagai konsep sistem eksplosif presisi masa depan.               |
| <b>Kelebihan Potensial</b>           | Hemat energi, Presisi tinggi, Minim dampak lingkungan, Dapat dikendalikan otomatis                          |
| <b>Aplikasi Potensial</b>            | Ekskavasi non-konvensional di batuan beku, kristalin, tambang dalam, dan daerah terpencil.                  |
| <b>Integrasi Teknologi</b>           | Sistem gelombang kejut → Sensor tekanan → Kendali otomatis/robotik → Ekskavasi adaptif.                     |
| <b>Kebutuhan Penelitian Lanjutan</b> | Validasi eksperimen, Simulasi numerik lanjut (ANSYS Autodyn, LS-DYNA, COMSOL)                               |
| <b>Output Simulasi Diperlukan</b>    | Distribusi tegangan, Kecepatan retakan batuan, Pola propagasi gelombang kejut                               |
| <b>Tingkat Kesiapan Teknologi</b>    | TKT 1–3 (Eksploratif hingga simulasi awal) - menuju pengembangan prototipe skala laboratorium.              |

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan gelombang kejut energi tinggi yang diinspirasi oleh prinsip fisika nuklir memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai teknologi penghancuran batuan yang lebih presisi, efisien, dan berkelanjutan dibandingkan metode konvensional. Mekanismenya yang bersifat non-kontak dan dapat dikendalikan secara terarah memungkinkan distribusi energi yang lebih fokus, mengurangi pemborosan energi dan dampak lingkungan. Selain itu, sistem ini berpeluang menjadi teknologi yang aman karena tidak menggunakan bahan peledak kimia, serta adaptif terhadap berbagai karakteristik geologi melalui pengaturan parameter fisik seperti densitas dan kecepatan partikel. Meskipun saat ini masih berada pada tahap eksploratif dan teoritis, hasil kajian ini memberikan landasan ilmiah yang kuat untuk penelitian lanjutan berupa simulasi numerik dan uji laboratorium berskala kecil. Langkah tersebut diperlukan guna mengevaluasi performa sistem secara kuantitatif sebelum memasuki tahap desain prototipe dan penerapan di industri pertambangan secara nyata.

#### 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Manado yang telah memberikan dukungan moral dan fasilitas dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan sejawat atas masukan dan diskusi yang konstruktif selama proses penyusunan artikel ini. Segala bentuk kontribusi dan kerja sama yang diberikan telah memberikan nilai tambah yang signifikan dalam penyelesaian artikel ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Babaeian, M., Ataei, M., Sereshki, F., Sotoudeh, F., & Mohammadi, S. (2019). A new framework for evaluation of rock fragmentation in open pit mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(2), 325–336.
- Dewey, J. M. (2018). The Rankine - Hugoniot equations: Their extensions and inversions related to blast waves. In *Blast Effects* (pp. 17–35). Springer.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., & Zimmerman, R. (2009). *Fundamentals of rock mechanics* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Kutter, B. L., & Hashash, Y. M. A. (2015). Numerical modeling of shock and blast effects in geomaterials. Springer.
- Lvovsky, A. I. (2018). *Quantum Physics: An Introduction Based on Photons*. Springer, Cham.
- Morissan, M. (2017). *Metode Penelitian Survei*. Jakarta: Kencana.
- Mudjiyanto, B. (2018). *Tipe Penelitian Eksploratif Komunikasi Exploratory Research In Communication Study*. Jakarta: Puslitbang APTIKA dan IKP Badan Litbang SDM, Kementerian Kominfo.
- Petrescu, F. I. T., & Petrescu, R. V. (2019). Advanced dynamics and fracture mechanics. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(3), 324–336.
- Shi, C., Pian, J., Zhang, C., Chen, X., & Zhang, Y. (2024). Numerical study on rock fracturing with pulsed pressure in hard rocks with a pipe-domain seepage model. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 130, 102860.
- Sugiyono. (2019). *Metodelogi Penelitian Kuantitatif dan Kualitatif Dan R&D*. Bandung: ALFABETA.



- Vogt, D. (2016). A review of rock cutting for underground mining: Past, present, and future. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(11).
- Wibowo, A. (2024). *Fisika Teknik*. Yayasan Prima Agus Teknik, Semarang.
- Wu, Q., Zhang, D., & Li, X. (2018). Review on the mechanical response and energy evolution of rocks under dynamic loading. *Engineering Geology*, 242, 130–147.
- Zel'dovich, Y. B., & Raizer, Y. P. (2012). *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena*. Courier Corporation.
- Liew, M. S., Danyaro, K. U., & Zawawi, N. A. W. A. (2020). A comprehensive guide to different fracturing technologies: A review. *Energies*, 13(13), 3326.

\*\*\*