



Momentum tak terhingga ($\vec{P}\infty$) model kominusi batubara

Lukman Hakim Nasution^{1,*}, Helmi Chazali Lubis¹, Zulkarnain¹, Nazaruddin²

¹⁾ Badan Riset dan Inovasi Daerah Provinsi Riau,
²⁾ Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru

Jl. Dr. Sutomo No. 106, Suka Mulia, Kec. Sail, Kota Pekanbaru, Riau 28133¹

Jl. Dirgantara No. 4, Arengka Raya, Kota Pekanbaru²

lukman_n82@yahoo.com

ABSTRAK

Kominusi secara physical collision (hentaman fisik) melalui prinsip linier mometum dilakukan pada sampel batubara sub-bituminus dengan panjang 10mm, lebar dan tebal masing-masing 1mm. Jarak proses momentum adalah 100cm, tekanan udara 0.1bar hingga 3bar, dimana dinding landasan berdiameter 65mm. Perubahan ukuran sampel terjadi setelah momentum, dan selanjutnya dianalisis secara matematik dengan metode penskalaan per millimeter, berfaktorkan volume dan massa material, dimana dilakukan pada kondisi sebelum dan sesudah momentum. Hasil analisis membuktikan bahwa ukuran pecahan semakin besar jika semakin jauh dari titik pusat momentum dan sebaliknya. Namun jumlah momentum akhir dan distribusi pecahan sampel tidak terdefiniskan secara matematik ($\vec{P}\infty$). Melalui metode penskalaan per millimeter yang dilakukan sebelum dan sesudah momentum berfaktorkan volume, massa dan ukuran akhir pecahan material, adalah alternatif untuk memprediksi kebutuhan energi, dan ukuran pecahan akhir yang ingin dicapai.

Kata kunci: Kominusi; momentum takhingga; Batubara.

ABSTRACT

Physical collision-based comminution using the principle of linear momentum was applied to sub-bituminous coal samples with dimensions of 10 mm in length and 1 mm in both width and thickness. The momentum interaction distance was 100 cm, with air pressure ranging from 0.1 bar to 3 bar, and an impact target wall diameter of 65 mm. Changes in sample size occurred after the momentum impact and were subsequently analyzed mathematically using a millimeter-scale method, incorporating volume- and mass-based factors under conditions before and after momentum application. The analysis results demonstrate that fragment size increases with increasing distance from the momentum center, and vice versa. However, the final momentum magnitude and the fragment distribution of the samples cannot be mathematically defined ($\vec{P}\infty$). The millimeter-scale method applied before and after momentum, incorporating volume, mass, and final fragment size, provides an alternative approach for predicting energy requirements and the desired final fragment size.

Keywords: Comminution; infinite momentum; coal.

1. PENDAHULUAN

Momentum (\vec{P}) merupakan jumlah vektor gerakan dari objek, yaitu massa dan waktu kecepataannya dalam unit kg/s. Sedangkan impuls (I) merupakan jumlah vektor dari Gaya selama jangka waktu tertentu yang sangat singkat, seperti impact (hentaman) yang berlaku pada dua objek. Maka $\Delta\vec{p} = I$ adalah pengaruh impuls pada objek, yaitu perubahan momentum dari objek, dimana $\vec{p}_b + \vec{I} = \vec{p}_a$ adalah momentum sebelum dan sesudah impuls terjadi, yaitu $\vec{p}_1 + I = \vec{p}_2$ adalah $m\vec{v}_1 + \sum_{t_1}^{t_2} \vec{F}_i dt = m\vec{v}_2$. Melalui prinsip momentum, hubungan vektor dapat dinyatakan dengan $m\vec{v}_1 + \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt = m\vec{v}_2$ atau $m\vec{v}_1 + F\Delta t = m\vec{v}_2$; dimana F adalah Gaya bagi linear momentum. Sedangkan physical collision (hentaman fisik) di antara dua objek merupakan linear momentum, serong dan

Corresponding Author:
✉ Lukman Hakim Nasution
Accepted on: 2025-12-20

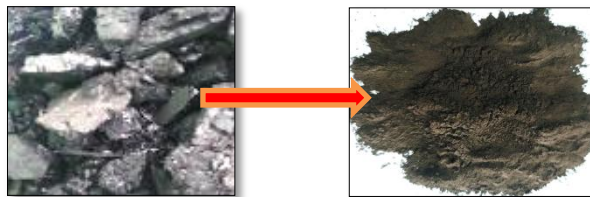
eksentrik [1-4]. Kecepatan, massa, dan area pengaruh momentum merupakan parameter physical collision diantara dua objek berprinsipkan kepada halaju, gerakan, dan dimensi saiz daripada objek tersebut [2, 5]. Momentum juga berfungsi sebagai suatu bentuk permulaan dan sifat retakan, serta kecepatan impact dari material [6]. Material dapat didefinisikan sebagai produk massa dan kecepatan yaitu $\vec{p} = mv$, dengan m adalah massa dalam kg, dan v adalah kecepatan dalam m/s [7-9]; ini untuk memastikan bahwa impact dapat dilakukan melalui physical collision berdasarkan momentum diantara partikel dan partikel terhadap dinding [10].

Prinsip ini berlaku pada mesin penghancur untuk mengubah batubara menjadi lebih kecil melalui proses kominusi, seperti mesin penghancur impact sekunder model rahang [11]; yang merupakan proses kominusi sewaktu impact static dan dinamic berlangsung [12, 13]. Kinetik energi dipengaruhi oleh kecepatan, ketebalan, dan kekerasan dari material [14-17], sesuai hukum impact sewaktu momentum terjadi [18]. Pengaruh sudut, bentuk material, dan ukuran terhadap area pusat impact dari linear momentum adalah sebagai area pusat energi impact [19-24]. Hal ini merupakan prinsip impact secara mekanik yang berujuan untuk memahamkan cara menghitung perubahan pergerakan material karena momentum [25].

Untuk meminimalkan ukuran material seperti batubara diperlukan proses impact atau penggilingan dengan berbagai kombinasi pemecahan, dan dapat dilakukan secara bertingkat [26]; dimana secara teori dapat ditentukan melalui momentum gerak dari material ketika impact terjadi [27, 28]. Ini juga sesuai dengan hukum penskalaan untuk pecahanasi material [29]; dimana terpecahanasinya material merupakan hubungan antara kecepatan terhadap jarak dari impact pada area kritikal material tersebut [29, 30]. Melalui konservasi linier momentum [31, 32], dapat diprediksi impact energi yang terjadi per unit volume dan massa material.

2. METHODOLOGI

Eksperimen kominusi pada sampel batubara berukuran panjang 10mm, dengan lebar dan tebal masing-masing 1mm dilakukan dengan jarak momentum secara linier adalah 100 cm, tekanan udara 0.1bar hingga 3bar dengan dinding berdiameter 65 mm.



Gambar 1. Pecahan sampel batubara setelah proses momentum

Perubahan ukuran material menjadi lebih kecil dari ukuran awal, selanjutnya secara matematik dianalisis melalui metode penskalaan per millimeter di awal sebelum dan sesudah momentum terjadi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis kominusi secara linier momentum ukuran pecahan sampel dilakukan secara matematik; persamaan momentum (\vec{P}) berkaitan dengan x sebagai energi impact dari momentum berdasarkan penskalaan per millimeter berfaktorkan volume (V_i), Massa (m_i), dan ukuran awal sampel (s_i); dengan x_a sebagai distribusi kinetik energi impact momentum proses kominusi sampel.

Persamaan momentum ($\vec{P} = x$)

| | | |
|-------------------------------|--|---|
| $\vec{P} = _{V_i, m_i, s_i}$ | $x_{V'_i, m'_i, s'_i}$ | $\vec{p}_{1V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{2V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{3V'_i, m'_i, s'_i}$ |
| $\vec{P} _{V_a, m_a, s_a}$ | $\frac{1}{2}mv^2 _{x_{a1}} \rightarrow \frac{1}{2}mv^2 _{x_{a10}}$ | $x \cong \vec{P} _{V_a, m_a, s_a} \rightarrow x \cong \vec{P} _{V_j, m_j, s_j}$ |
| $\vec{P} _{V_a, m_a, s_a}$ | $x _{\frac{1}{2}mv^2 _{1mm^3}} \cong \vec{p}_a _{1mm^3}$ | $\vec{p}_{1V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{2V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{3V'_i, m'_i, s'_i}$ \vec{P}'_1 |
| $\vec{P} _{V_b, m_b, s_b}$ | $x _{\frac{1}{2}mv^2 _{2mm^3}} \cong \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 2mm^3}$ | $\vec{p}_{1V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{2V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{3V'_i, m'_i, s'_i}$ \vec{P}'_2 |
| $\vec{P} _{V_c, m_c, s_c}$ | $x _{\frac{1}{2}mv^2 _{3mm^3}} \cong \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 3mm^3}$ | $\vec{p}_{1V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{2V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{3V'_i, m'_i, s'_i}$ \vec{P}'_3 |
| $\vec{P} _{V_d, m_d, s_d}$ | $x _{\frac{1}{2}mv^2 _{4mm^3}} \cong \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 4mm^3}$ | $\vec{p}_{1V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{2V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{3V'_i, m'_i, s'_i}$ \vec{P}'_4 |
| $\vec{P} _{V_e, m_e, s_e}$ | $x _{\frac{1}{2}mv^2 _{5mm^3}} \cong \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 5mm^3}$ | $\vec{p}_{1V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{2V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{3V'_i, m'_i, s'_i}$ \vec{P}'_5 |
| $\vec{P} _{V_f, m_f, s_f}$ | $x _{\frac{1}{2}mv^2 _{6mm^3}} \cong \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 6mm^3}$ | $\vec{p}_{1V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{2V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{3V'_i, m'_i, s'_i}$ \vec{P}'_6 |
| $\vec{P} _{V_g, m_g, s_g}$ | $x _{\frac{1}{2}mv^2 _{7mm^3}} \cong \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 7mm^3}$ | $\vec{p}_{1V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{2V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{3V'_i, m'_i, s'_i}$ \vec{P}'_7 |
| $\vec{P} _{V_h, m_h, s_h}$ | $x _{\frac{1}{2}mv^2 _{8mm^3}} \cong \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 8mm^3}$ | $\vec{p}_{1V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{2V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{3V'_i, m'_i, s'_i}$ \vec{P}'_8 |
| $\vec{P} _{V_i, m_i, s_i}$ | $x _{\frac{1}{2}mv^2 _{9mm^3}} \cong \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 9mm^3}$ | $\vec{p}_{1V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{2V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{3V'_i, m'_i, s'_i}$ \vec{P}'_9 |
| $\vec{P} _{V_j, m_j, s_j}$ | $x _{\frac{1}{2}mv^2 _{10mm^3}} \cong \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 10mm^3}$ | $\vec{p}_{1V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{2V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{3V'_i, m'_i, s'_i}$ \vec{P}'_{10} |

Persamaan distribusi momentum per millimeter (x_a)

| V | d | x_a | Faktor volume (mm) | Faktor massa (kg) | Faktor ukuran pecahan (mm) |
|-------|-----|-------|--|--|--|
| V_a | 1 | 100 | $\vec{p}_{1V'_i} + \vec{p}_{1V'_2} + \vec{p}_{1V'_3} _1$ | $\vec{p}_{1m'_i} + \vec{p}_{1m'_2} + \vec{p}_{1m'_3} _1$ | $\vec{p}_{1s'_i} + \vec{p}_{1s'_2} + \vec{p}_{1s'_3} _1$ |
| V_b | 2 | 50 | $\vec{p}_{2V'_i} + \vec{p}_{2V'_2} + \vec{p}_{2V'_3} _2$ | $\vec{p}_{2m'_i} + \vec{p}_{2m'_2} + \vec{p}_{2m'_3} _2$ | $\vec{p}_{2s'_i} + \vec{p}_{2s'_2} + \vec{p}_{2s'_3} _2$ |
| V_c | 3 | 33.3 | $\vec{p}_{3V'_i} + \vec{p}_{3V'_2} + \vec{p}_{3V'_3} _3$ | $\vec{p}_{3m'_i} + \vec{p}_{3m'_2} + \vec{p}_{3m'_3} _3$ | $\vec{p}_{3s'_i} + \vec{p}_{3s'_2} + \vec{p}_{3s'_3} _3$ |
| V_d | 4 | 25 | $\vec{p}_{4V'_i} + \vec{p}_{4V'_2} + \vec{p}_{4V'_3} _4$ | $\vec{p}_{4m'_i} + \vec{p}_{4m'_2} + \vec{p}_{4m'_3} _4$ | $\vec{p}_{4s'_i} + \vec{p}_{4s'_2} + \vec{p}_{4s'_3} _4$ |
| V_e | 5 | 20 | $\vec{p}_{5V'_i} + \vec{p}_{5V'_2} + \vec{p}_{5V'_3} _5$ | $\vec{p}_{5m'_i} + \vec{p}_{5m'_2} + \vec{p}_{5m'_3} _5$ | $\vec{p}_{5s'_i} + \vec{p}_{5s'_2} + \vec{p}_{5s'_3} _5$ |
| V_f | 6 | 16.6 | $\vec{p}_{6V'_i} + \vec{p}_{6V'_2} + \vec{p}_{6V'_3} _6$ | $\vec{p}_{6m'_i} + \vec{p}_{6m'_2} + \vec{p}_{6m'_3} _6$ | $\vec{p}_{6s'_i} + \vec{p}_{6s'_2} + \vec{p}_{6s'_3} _6$ |
| V_g | 7 | 14.2 | $\vec{p}_{7V'_i} + \vec{p}_{7V'_2} + \vec{p}_{7V'_3} _7$ | $\vec{p}_{7m'_i} + \vec{p}_{7m'_2} + \vec{p}_{7m'_3} _7$ | $\vec{p}_{7s'_i} + \vec{p}_{7s'_2} + \vec{p}_{7s'_3} _7$ |
| V_h | 8 | 12.5 | $\vec{p}_{8V'_i} + \vec{p}_{8V'_2} + \vec{p}_{8V'_3} _8$ | $\vec{p}_{8m'_i} + \vec{p}_{8m'_2} + \vec{p}_{8m'_3} _8$ | $\vec{p}_{8s'_i} + \vec{p}_{8s'_2} + \vec{p}_{8s'_3} _8$ |
| V_i | 9 | 11.1 | $\vec{p}_{9V'_i} + \vec{p}_{9V'_2} + \vec{p}_{9V'_3} _9$ | $\vec{p}_{9m'_i} + \vec{p}_{9m'_2} + \vec{p}_{9m'_3} _9$ | $\vec{p}_{9s'_i} + \vec{p}_{9s'_2} + \vec{p}_{9s'_3} _9$ |
| V_j | 10 | 10 | $\vec{p}_{10V'_i} + \vec{p}_{10V'_2} + \vec{p}_{10V'_3} _{10}$ | $\vec{p}_{10m'_i} + \vec{p}_{10m'_2} + \vec{p}_{10m'_3} _{10}$ | $\vec{p}_{10s'_i} + \vec{p}_{10s'_2} + \vec{p}_{10s'_3} _{10}$ |

Persamaan momentum berfaktor jarak per millimeter terhadap pecahan sampel

| Persamaan | d (mm) | Fungsi d |
|---------------------------------------|----------|----------------------------|
| $\vec{P}_1 = \vec{P}'_i _{1mm^3}$ | 1 | 1 mm ke 1 V_a, m_a, s_a |
| $\vec{P}_2 = \vec{P}'_i _{2mm^3}$ | 2 | 1 mm ke 2 V_b, m_b, s_b |
| $\vec{P}_3 = \vec{P}'_i _{3mm^3}$ | 3 | 1 mm ke 3 V_c, m_c, s_c |
| $\vec{P}_4 = \vec{P}'_i _{4mm^3}$ | 4 | 1 mm ke 4 V_d, m_d, s_d |
| $\vec{P}_5 = \vec{P}'_i _{5mm^3}$ | 5 | 1 mm ke 5 V_e, m_e, s_e |
| $\vec{P}_6 = \vec{P}'_i _{6mm^3}$ | 6 | 1 mm ke 6 V_f, m_f, s_f |
| $\vec{P}_7 = \vec{P}'_i _{7mm^3}$ | 7 | 1 mm ke 7 V_g, m_g, s_g |
| $\vec{P}_8 = \vec{P}'_i _{8mm^3}$ | 8 | 1 mm ke 8 V_h, m_h, s_h |
| $\vec{P}_9 = \vec{P}'_i _{9mm^3}$ | 9 | 1 mm ke 9 V_i, m_i, s_i |
| $\vec{P}_{10} = \vec{P}'_i _{10mm^3}$ | 10 | 1 mm ke 10 V_j, m_j, s_j |

\vec{P}_{10} sampel 10mm³ berfaktorkan V, m, s

$$\vec{P}_{10} = \vec{P}'_i|_{10mm^3} = \vec{p}_{1V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{2V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{3V'_i, m'_i, s'_i}$$

\vec{P}_a sampel per millimeter sampel 10mm³ berfaktorkan V, m, s

$$\vec{P}_a|_{1mm^3-10mm^3} = \int_1^{10} \vec{p}_{1V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{2V'_i, m'_i, s'_i} + \vec{p}_{3V'_i, m'_i, s'_i}$$

Faktor V, m, s dan jarak dari titik momentum terhadap \vec{P}_a pecahan sampel

$$\sum \vec{P}_d = \int_{V_i}^{V_f} [\vec{P}|_{V_d} - V_d] dV_d \propto \sum \vec{P}_d = \int_{m_i}^{m_f} [\vec{P}|_{m_d} - m_d] dm_d \propto \sum \vec{P}_d$$

$$= \int_{sz_i}^{sz_f} [\vec{P}|_{sz_d} - sz_d] dsz_d$$

Berdasarkan persamaan-persamaan menunjukkan bahwa momentum pada sampel terdiri dari momentum per millimeter independen (\vec{P}), dan (\vec{P}_a) momentum dengan penambahan per millimeter sebagai fungsi jarak dari sampel 1mm pertama hingga 1mm ke sepuluh. Sehingga persamaan momentum sampel per millimeter menandakan ukuran pecahan sampel. Sedangkan pecahan sampel akan semakin besar jika semakin jauh dari titik pusat momentum, dan semakin kecil jika semakin dekat titik pusat momentum.

Persamaan

$$\vec{P}_a = \int_{P'_1}^{P'_3} V \frac{dv_{P'_1}}{dt} d\vec{p} + \int_{P'_2}^{P'_3} V \frac{dv_{P'_2}}{dt} d\vec{p} + \int_{P'_1}^{P'_3} V \frac{dv_{P'_2}}{dt} d\vec{p}$$

$$\vec{P}_a = \int_{P'_1}^{P'_3} m \frac{dv_{P'_1}}{dt} d\vec{p} + \int_{P'_2}^{P'_3} m \frac{dv_{P'_2}}{dt} d\vec{p} + \int_{P'_1}^{P'_3} m \frac{dv_{P'_2}}{dt} d\vec{p}$$

$$\vec{P}_a = \int_{P'_1}^{P'_3} sz \frac{dv_{P'_1}}{dt} d\vec{p} + \int_{P'_2}^{P'_3} sz \frac{dv_{P'_2}}{dt} d\vec{p} + \int_{P'_1}^{P'_3} sz \frac{dv_{P'_2}}{dt} d\vec{p}$$

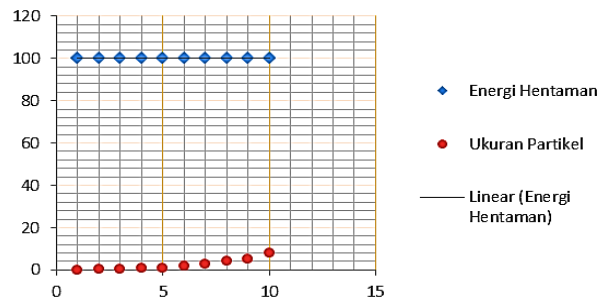
$$\vec{P}_a = \vec{p}'_1 \begin{bmatrix} SV,m,sz_{a1} \\ SV,m,sz_{b1} \\ SV,m,sz_{c1} \\ SV,m,sz_{d1} \\ SV,m,sz_{e1} \\ SV,m,sz_{f1} \\ SV,m,sz_{g1} \\ SV,m,sz_{h1} \\ SV,m,sz_{i1} \\ SV,m,sz_{j1} \end{bmatrix} + \vec{p}'_2 \begin{bmatrix} SV,m,sz_{a2} \\ SV,m,sz_{b2} \\ SV,m,sz_{c2} \\ SV,m,sz_{d2} \\ SV,m,sz_{e2} \\ SV,m,sz_{f2} \\ SV,m,sz_{g2} \\ SV,m,sz_{h2} \\ SV,m,sz_{i2} \\ SV,m,sz_{j2} \end{bmatrix} + \vec{p}'_3 \begin{bmatrix} SV,m,sz_{a3} \\ SV,m,sz_{b3} \\ SV,m,sz_{c3} \\ SV,m,sz_{d3} \\ SV,m,sz_{e3} \\ SV,m,sz_{f3} \\ SV,m,sz_{g3} \\ SV,m,sz_{h3} \\ SV,m,sz_{i3} \\ SV,m,sz_{j3} \end{bmatrix}$$

$$\vec{P}_a \cong Mesh_1 = \int_{P'_1}^{P'_3} V, m, sz \frac{dv_{P'_1}}{dt} d\vec{p}$$

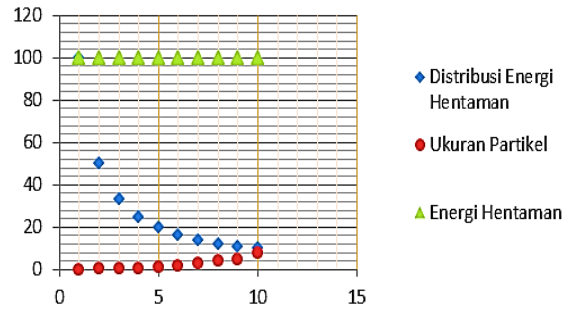
$$\vec{P}_a \cong Mesh_2 = \int_{P'_1}^{P'_3} V, m, szm \frac{dv_{P'_2}}{dt} d\vec{p}$$

$$\vec{P}_a \cong Mesh_3 = \int_{P'_1}^{P'_3} V, m, sz \frac{dv_{P'_3}}{dt} d\vec{p}$$

Momentum yang terjadi pada sampel menyebabkan pecahan terdistribusi, dan dikelompokkan ke dalam kelompok volume dan massa, sesuai dengan kesamaan ukuran dan berat. Sehingga distribusi momentum berfaktorkan volume, massa, dan ukuran pecahan adalah berdasarkan penskalaan per millimeter.



Gambar 2. Grafik hubungan antara energi hentaman terhadap V, m, sz



Gambar 3. Grafik hubungan antara energi impact distribution terhadap ukuran partikel.

Berdasarkan persamaan 1 hingga 43, gambar 2 dan 3, dapat dinyatakan bahwa persamaan umum momentum proses kominusi sampel adalah:

$$\vec{P}|_{1mm^3-10mm^3} \propto \int_1^{10} |\vec{p}_{1V'_1, m'_1, sz'_1} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, sz'_2} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, sz'_3}| \rightarrow [\sum \vec{P}_i \rightarrow \sum \vec{p}_f = \int_0^\infty |V, m, sz|]$$

Berdasarkan persamaan di atas menunjukkan bahwa jumlah momentum awal adalah jumlah momentum akhir, hingga tak hingga yang berfaktorkan volume, massa, dan ukuran pecahan; dimana jumlah momentum akhir adalah ukuran akhir material sebagai proses kominusi. Persamaan ini dapat memprediksi ukuran pecahan akhir serta kebutuhan energy jika penskalaan per mlimeter dilakukan di awal sebelum dan sesudah momentum.

4. KESIMPULAN

Persamaan-persamaan matematik dari hasil analisis menunjukkan bahwa jumlah momentum awal proses kominusi merupakan jumlah momentum akhirnya. Semakin kecil dan banyak jumlah pecahan setelah momentum; maka jumlah momentum yang terjadi tidak dapat terdefiniskan melalui persamaan matematik, namun dapat dituliskan dalam bentuk $\vec{P}|_{1mm^3-10mm^3} \propto \int_1^{10} |\vec{p}_{1V'_1, m'_1, sz'_1} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, sz'_2} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, sz'_3}| \rightarrow [\sum \vec{P}_i \rightarrow \sum \vec{p}_f = \int_0^\infty |V, m, sz|$; dimana melalui penskalaan per millimeter berfaktorkan volume, massa dan ukuran pecahan akhir material, dapat memprediksi ukuran pecahan yang dihsilkan dan kebutuhan energi impact, dalam hal ini adalah kinetik energi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional-Indonesia dan Pusat Penelitian Teknologi Pertambangan serta Badan Perencanaan Pembangunan Daerah dan Sekolah Tinggi Teknik Nusantara Mandiri atas dukungan dan penyediaan fasilitas penelitian selama penelitian ini berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Matthew Huang (2002). Vehicle Crash Mechanics. International Standard Book. Number 0-8493-0104-1, CRC Press LLC.
- [2] Inhwon Han (2018). Analysis of Vehicle Collision Accidents Based on Qualitative Mechanics. Forensic Science International. FSI 9428, PII: S0379-0738(18)30490-0.

- [3] Aditya Rio Prabowo (2016). Energy Behavior on Side Structure in Event of Ship Collision Subjected to External Parameters. Elsevier, Volume 2: e00192.
- [4] Pavlos Asteriou and George Tsiambaos (2018). Effect of Impact Velocity, Block Mass and Hardness on the Coefficients of Restitution for Rockfall Analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Volume 106: 41-50.
- [5] Britta Buck (2018). Dynamics of Wet Particle–Wall Collisions: Influence of Wetting Condition. *Chemical Engineering Research and Design*. Volume 135: 21-29.
- [6] A. Goel, H.N.G. Wadley and V.S. Deshpandea (2018). Impact of Granular Slugs on Rigid Targets: Effect of Grain Shape and Fracture. *European Journal of Mechanics-A/Solids*. Volume 71: 64-76.
- [7] J. O. Bird (1983). 7 - Linear Momentum and Impulse. *Newness Physical Science. Book for Engineers*: 19-20.
- [8] J. O. Bird (1987). 27-Linear Momentum and Impulse. *Newness Engineering Science Book*: 211-212.
- [9] J. O. Bird (1993). 26 - Linear Momentum and Impulse. *Newness Engineering and Physical Science Book*: 228-229.
- [10] Kuahai Yu (2017). An Impulse Based Model for Spherical Particle Collisions with Sliding and Rolling. *Powder Technology*. Volume 319: 102-116.
- [11] Carina Ulsen (2018). Concrete Aggregates Properties Crushed by Jaw and Impact Secondary Crushing: *Journal of Materials Research and Technology, JMRT* 381: 9-18.
- [12] James D. Hogan (2015). Dynamic Brittle Pecahanation: Probing the Byproducts of Hypervelocity Impact in Space. *Procedia Engineering*. Volume 103: 205-212.
- [13] X. F. Li (2018). Dynamic pecahanation of rock material: Characteristic size, pecahan distribution and pulverization law. *Engineering Fracture Mechanics*. Volume 199: 739-759.
- [14] Kedar Kirane (2016). Strain Rate Dependent Micro plane Model for High Rate Comminution of Concrete under Impact Based on Kinetic Energy Release Theory. *Powder Technology. The Royal Society*: 102-116.
- [15] J. Mars, E. Chebbi, M. Wali and F. Dammak (2018). Numerical and Experimental Investigations of Low Velocity Impact on Glass Fiber-reinforced Polyamide. *Composites Part B: Engineering*. Volume 146: 116-123.
- [16] Dong Myung Bae, Aditya Rio Prabowo and Bo Cao (2016). Numerical Simulation for the Collision between Side Structure and Level Ice in Event of Side Impact Scenario. *Latin American Journal of Solids and structures*. Volume 13: 2991-3004.
- [17] Liu Jianfeng and Yuan Long (2017). The Influence of Liner Material on the Dynamic Response of the Finite Steel Target Subjected to High Velocity Impact by Explosively Formed Projectile. *International Journal of Impact Engineering* Volume 109: 264-275.
- [18] Zhang Dongmei (2017). Study on Collision of Threaded Connection during Impact. *International Journal of Impact Engineering*. Volume 106: 133-145.
- [19] Burns Shane Joseph (2015). Theoretical and Numerical Analysis of Rigid Body Impacts with Friction. *NUI Galway: Thesis Doctor of Philosophy*.

- [20] L. M. Tavares and R.P. King (1998). Single-Particle Fracture under Impact Loading. *International Journal Mineral Processing*. Volume 54: 1-28.
- [21] Paul W. Cleary, Rob D. Morrison and Gary W. Delaney (2018). Incremental Damage and Particle Size Reduction in a Pilot SAG Mill: DEM Breakage Method Extension and Validation. *Minerals Engineering*. Volume 128: 56-68.
- [22] Zdenek P. Bazant and Yewan Su (2015). Impact Comminution of Solids Due to Progressive Crack Growth Driven by Kinetic Energy of High Rate Shear. *Journal of Applied Mechanics*. ASME. Volume 82: 031007-1.
- [23] Raymond A. Serway and John W. Jewett, Jr. (2008). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physic*. Seventh Editions. Thomson Higher Education 10 Davis Drive Belmont. USA: CA 94002-3098, ISBN-13: 978-0-495-11245-7-10: 0-495-11245-3.
- [24] Shihara Perera (2017). *Modeling Impact Actions of Flying and Falling Objects*. University of Melbourne Australia: Thesis Doctor of philosophy.
- [25] Min Seok Choi and Jin Won Lee (2015). Characteristics of Kinetic Energy Transfer in Collisions between a Fragile Nano-Particle and a Rigid Particle on a Surface. *Journal of Aerosol Science*. Volume 84: 1-8.
- [26] Robert H. Perry and Don W. Green (1998). *Perry's Chemical Engineers Handbook*. Seventh Edition. United States of America: R. R. Donnelley & Sons Company.
- [27] Fatemeh Saeidi (2016). A Phenomenological Model of Single Particle Breakage as a Multi-Stage Process. *Minerals Engineering*. Volume 98: 90-100.
- [28] C. Z. Tan (2018). Wave Equation for the Energy and the Momentum of a Moving Particle. *Optic*. Volume 168: 864-872.
- [29] Gang Ma (2018). The Effect of Different Fracture Mechanisms on Impact Pechanation of Brittle Heterogeneous Solid. *International Journal of Impact Engineering*. Volume 113: 132-143.
- [30] Lei Zhou (2018). Dynamic Propagation Behavior of Cracks Emanating from Tunnel Edges under Impact Loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Volume 105: 119-126.
- [31] G. Murali, A. S. Santhi and G. Mohan Ganesh (2014). Empirical Relationship between the Impact Energy and Compressive Strength for Fiber Reinforced Concrete. *Journal of scientific and industrial research*. Volume 73: 469-473.
- [32] E. Hoek and C. D. Martin (2014). Fracture Initiation and Propagation in Intact Rock-A Review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Volume 6: 287-300.