



Terbit online pada laman web jurnal :
<https://ejournal.sttp-yds.ac.id/index.php/js/index>

SAINSTEK

| ISSN (Print) 2337-6910 | ISSN (Online) 2460-1039 |



Model Matematik Eksperimental dan Validasi Momentum Takhingga ($\vec{P}_\infty$) Proses Kominusi dan Fragmentasi Batubara

Lukman Hakim Nasution^{a*}, Weriono^b, Rinaldi^c, Julnaidi^d, Syafril Syafar^e, Emri Juli Harnis^f, Purnama Irawansyah^g, Sopyan Hadi^h, Nasrol Akmalⁱ, Andi Husnadi^j, Tri Haryon^k.

^{a,f,g,h,i}Badan Perencanaan Pembangunan Daerah, Penelitian dan Pengembangan Provinsi Riau-Indonesia.

^{b,c,d,e}Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru, Jl. Dirgantara No.4

^{j,k}Pengembangan Pendidikan Formal Badan Kepegawaian Daerah Provinsi Riau-Indonesia, Research Center of Mining Technology, National Research and Innovation Agency of Indonesia, Jalan Ir. Sutami Km. 15 South Lampung, Lampung, Indonesia, 35361

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 22 Mei 2024

Revisi Akhir: 26 Juni 2024

Diterbitkan Online: 29 Juni 2024

KATA KUNCI

Batubara, Momentum tak hingga, Material rapuh.

KORESPONDENSI

Telepon: -

E-mail: lukman_n82@yahoo.com

ABSTRACT

Kominusi secara *physical collision* melalui prinsip linier mometum dilakukan pada sampel batubara dengan panjang 10mm, lebar dan tebal masing-masing 1mm. Jarak proses momentum adalah 100cm, tekanan udara 0.1bar hingga 3bar, dan 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.

1. PENDAHULUAN

Momentum ($\vec{p}$) merupakan jumlah vektor gerakan dari objek, yaitu massa dan waktu kecepatannya dalam unit kg/s. Sedangkan impuls (I) merupakan jumlah vektor dari Gaya selama jangka waktu tertentu yang sangat singkat, seperti impact 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 $m\vec{v}_1 + \sum \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}_i dt = m\vec{v}_2$.

Melalui prinsip momentum, hubungkait vektor dapat dinyatakan dengan $m\vec{v}_1 + \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt = m\vec{v}_2$ atau $m\vec{v}_1 + \vec{F}\Delta t = m\vec{v}_2$; dimana $\vec{F}$ adalah Gaya bagi linear momentum. Sedangkan *physical collision* di antara dua objek merupakan linear momentum, serong dan 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 $\vec{p} = m\vec{v}$, 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 memahami 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. METODOLOGI

Eksperimen kominusi pada sampel batubara berukuran panjang 10 mm, 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.

No	Persamaan momentum ($\vec{P} = x$)		
1	$\vec{P} = _{V_i, m_i, s_i}$	$x_{V'_i, m'_i, s'_i}$	$\vec{p}_{1V'_1, m'_1, s'_1} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, s'_2} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, s'_3}$
2	$\vec{P} _{V_a, m_a, s_{za}}$	$\frac{1}{2}mv^2 _{x_{a1}} \rightarrow \frac{1}{2}mv^2 _{x_{a10}}$	$x \approx \vec{P} _{V_a, m_a, s_{za}} \rightarrow x \approx \vec{P} _{V_j, m_j, s_{zj}}$
3	$\vec{P} _{V_a, m_a, s_{za}}$	$x _{\frac{1}{2}mv^2 _{1mm^3}} \approx \vec{p}_a _{1mm^3}$	$\vec{p}_{1V'_1, m'_1, s'_1} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, s'_2} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, s'_3}$ $\vec{P}'_1$
4	$\vec{P} _{\int_{V_a, m_a, s_{za}} V_b, m_b, s_{zb}}$	$x _{\frac{1}{2}mv^2 _{2mm^3}} \approx \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 2mm^3}$	$\vec{p}_{1V'_1, m'_1, s'_1} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, s'_2} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, s'_3}$ $\vec{P}'_2$
5	$\vec{P} _{\int_{V_a, m_a, s_{za}} V_c, m_c, s_{zc}}$	$x _{\frac{1}{2}mv^2 _{3mm^3}} \approx \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 3mm^3}$	$\vec{p}_{1V'_1, m'_1, s'_1} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, s'_2} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, s'_3}$ $\vec{P}'_3$
6	$\vec{P} _{\int_{V_a, m_a, s_{za}} V_d, m_d, s_{zd}}$	$x _{\frac{1}{2}mv^2 _{4mm^3}} \approx \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 4mm^3}$	$\vec{p}_{1V'_1, m'_1, s'_1} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, s'_2} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, s'_3}$ $\vec{P}'_4$
7	$\vec{P} _{\int_{V_a, m_a, s_{za}} V_e, m_e, s_{ze}}$	$x _{\frac{1}{2}mv^2 _{5mm^3}} \approx \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 5mm^3}$	$\vec{p}_{1V'_1, m'_1, s'_1} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, s'_2} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, s'_3}$ $\vec{P}'_5$
8	$\vec{P} _{\int_{V_a, m_a, s_{za}} V_f, m_f, s_{zf}}$	$x _{\frac{1}{2}mv^2 _{6mm^3}} \approx \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 6mm^3}$	$\vec{p}_{1V'_1, m'_1, s'_1} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, s'_2} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, s'_3}$ $\vec{P}'_6$
9	$\vec{P} _{\int_{V_a, m_a, s_{za}} V_g, m_g, s_{zg}}$	$x _{\frac{1}{2}mv^2 _{7mm^3}} \approx \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 7mm^3}$	$\vec{p}_{1V'_1, m'_1, s'_1} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, s'_2} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, s'_3}$ $\vec{P}'_7$
10	$\vec{P} _{\int_{V_a, m_a, s_{za}} V_h, m_h, s_{zh}}$	$x _{\frac{1}{2}mv^2 _{8mm^3}} \approx \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 8mm^3}$	$\vec{p}_{1V'_1, m'_1, s'_1} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, s'_2} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, s'_3}$ $\vec{P}'_8$
11	$\vec{P} _{\int_{V_a, m_a, s_{za}} V_i, m_i, s_{zi}}$	$x _{\frac{1}{2}mv^2 _{9mm^3}} \approx \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 9mm^3}$	$\vec{p}_{1V'_1, m'_1, s'_1} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, s'_2} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, s'_3}$ $\vec{P}'_9$
12	$\vec{P} _{\int_{V_a, m_a, s_{za}} V_j, m_j, s_{zj}}$	$x _{\frac{1}{2}mv^2 _{10mm^3}} \approx \vec{p}_a _{1mm^3 \rightarrow 10mm^3}$	$\vec{p}_{1V'_1, m'_1, s'_1} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, s'_2} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, s'_3}$ $\vec{P}'_{10}$

Persamaan distribusi momentum per millimeter (x_a)						
No	V	d	x_a	Faktor volume (mm)	Faktor massa (kg)	Faktor ukuran pecahan (mm)
13	V_a	1	100	$\vec{p}_{1V'_1} + \vec{p}_{1V'_2} + \vec{p}_{1V'_3} _1$	$\vec{p}_{1m'_1} + \vec{p}_{1m'_2} + \vec{p}_{1m'_3} _1$	$\vec{p}_{1s'_{z1}} + \vec{p}_{1s_z} + \vec{p}_{1s'_{z3}} _1$
14	V_b	2	50	$\vec{p}_{2V'_1} + \vec{p}_{2V'_2} + \vec{p}_{2V'_3} _2$	$\vec{p}_{2m'_1} + \vec{p}_{2m'_2} + \vec{p}_{2m'_3} _2$	$\vec{p}_{2s'_{z1}} + \vec{p}_{2s_z} + \vec{p}_{2s'_{z3}} _2$
15	V_c	3	33.3	$\vec{p}_{3V'_1} + \vec{p}_{3V'_2} + \vec{p}_{3V'_3} _3$	$\vec{p}_{3m'_1} + \vec{p}_{3m'_2} + \vec{p}_{3m'_3} _3$	$\vec{p}_{3s'_{z1}} + \vec{p}_{3s_z} + \vec{p}_{3s'_{z3}} _3$
16	V_d	4	25	$\vec{p}_{4V'_1} + \vec{p}_{4V'_2} + \vec{p}_{4V'_3} _4$	$\vec{p}_{4m'_1} + \vec{p}_{4m'_2} + \vec{p}_{4m'_3} _4$	$\vec{p}_{4s'_{z1}} + \vec{p}_{4s_z} + \vec{p}_{4s'_{z3}} _4$
17	V_e	5	20	$\vec{p}_{5V'_1} + \vec{p}_{5V'_2} + \vec{p}_{5V'_3} _5$	$\vec{p}_{5m'_1} + \vec{p}_{5m'_2} + \vec{p}_{5m'_3} _5$	$\vec{p}_{5s'_{z1}} + \vec{p}_{5s_z} + \vec{p}_{5s'_{z3}} _5$

18	V_f	6	16.6	$\vec{p}_{6V'_1} + \vec{p}_{6V'_2} + \vec{p}_{6V'_3} _6$	$\vec{p}_{6m'_1} + \vec{p}_{6m'_2} + \vec{p}_{6m'_3} _6$	$\vec{p}_{6sz'_1} + \vec{p}_{6sz} + \vec{p}_{6sz'_3} _6$
19	V_g	7	14.2	$\vec{p}_{7V'_1} + \vec{p}_{7V'_2} + \vec{p}_{7V'_3} _7$	$\vec{p}_{7m'_1} + \vec{p}_{7m'_2} + \vec{p}_{7m'_3} _7$	$\vec{p}_{7sz'_1} + \vec{p}_{7sz} + \vec{p}_{7sz'_3} _7$
20	V_h	8	12.5	$\vec{p}_{8V'_1} + \vec{p}_{8V'_2} + \vec{p}_{8V'_3} _8$	$\vec{p}_{8m'_1} + \vec{p}_{8m'_2} + \vec{p}_{8m'_3} _8$	$\vec{p}_{8sz'_1} + \vec{p}_{8sz} + \vec{p}_{8sz'_3} _8$
21	V_i	9	11.1	$\vec{p}_{9V'_1} + \vec{p}_{9V'_2} + \vec{p}_{9V'_3} _9$	$\vec{p}_{9m'_1} + \vec{p}_{9m'_2} + \vec{p}_{9m'_3} _9$	$\vec{p}_{9sz'_1} + \vec{p}_{9sz} + \vec{p}_{9sz'_3} _9$
23	V_j	10	10	$\vec{p}_{10V'_1} + \vec{p}_{10V'_2} + \vec{p}_{10V'_3} _{10}$	$\vec{p}_{10m'_1} + \vec{p}_{10m'_2} + \vec{p}_{10m'_3} _{10}$	$\vec{p}_{10sz'_1} + \vec{p}_{10sz} + \vec{p}_{10sz'_3} _{10}$

Persamaan momentum berfaktor jarak per millimeter terhadap pecahan sampel

	Persamaan	d (mm)	Fungsi d
24	$\vec{P}_1 = \vec{P}'_i _{1\text{ mm}^3}$	1	1 mm ke 1 V_a, m_a, sz_a
25	$\vec{P}_2 = \vec{P}'_i _{2\text{ mm}^3}$	2	1 mm ke 2 V_b, m_b, sz_b
26	$\vec{P}_3 = \vec{P}'_i _{3\text{ mm}^3}$	3	1 mm ke 3 V_c, m_c, sz_c
27	$\vec{P}_4 = \vec{P}'_i _{4\text{ mm}^3}$	4	1 mm ke 4 V_d, m_d, sz_d
28	$\vec{P}_5 = \vec{P}'_i _{5\text{ mm}^3}$	5	1 mm ke 5 V_e, m_e, sz_e
29	$\vec{P}_6 = \vec{P}'_i _{6\text{ mm}^3}$	6	1 mm ke 6 V_f, m_f, sz_f
30	$\vec{P}_7 = \vec{P}'_i _{7\text{ mm}^3}$	7	1 mm ke 7 V_g, m_g, sz_g
31	$\vec{P}_8 = \vec{P}'_i _{8\text{ mm}^3}$	8	1 mm ke 8 V_h, m_h, sz_h
32	$\vec{P}_9 = \vec{P}'_i _{9\text{ mm}^3}$	9	1 mm ke 9 V_i, m_i, sz_i
33	$\vec{P}_{10} = \vec{P}'_i _{10\text{ mm}^3}$	10	1 mm ke 10 V_j, m_j, sz_j
	$\vec{P}$ sampel 10 mm^3 berfaktorakan V, m, s		
34	$\vec{P}_{10} = \vec{P}'_i _{10\text{ mm}^3} = \vec{p}_{1V'_1, m'_1, sz'_1} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, sz'_2} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, sz'_3}$		
	$\vec{P}_a$ sampel per millimeter sampel 10 mm^3 berfaktorakan V, m, s		
35	$\vec{P}_a _{1\text{ mm}^3-10\text{ mm}^3} = \int_1^{10} \vec{p}_{1V'_1, m'_1, sz'_1} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, sz'_2} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, sz'_3}$		
	Faktor V, m, s dan jarak dari titik momentum terhadap $\vec{P}_a$ pecahan sampel		
36	$x_1 = x_i _{1\text{ mm}^3} \rightarrow x_{10} = x_i _{10\text{ mm}^3}$		
37	$\sum \vec{P}_d = \int_{V_i}^{V_f} [\vec{P} _{V_d} - V_d] dV_d \propto \sum \vec{P}_d = \int_{m_i}^{m_f} [\vec{P} _{m_d} - m_d] dm_d \propto \sum \vec{P}_d = \int_{sz_i}^{sz_f} [\vec{P} _{sz_d} - sz_d] dsz_d$		

Berdasarkan persamaan 1 hingga 37, menunjukkan bahwa momentum pada sampel terdiri dari momentum per millimeter independen ($\vec{P}$), dan ($\vec{P}_a$) momentum dengan pertambahan per millimeter sebagai fungsi jarak dari sampel 1mm pertama hingga 1mm ke sepuluh.

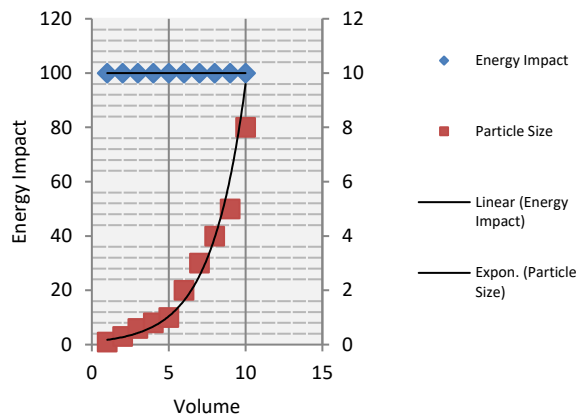
Sehingga persamaan momentum sampel per millimeter menandakan ukuran pecahan sampel. Sedangkan pecahan sampel akan semakin besar jika semakin jauh dari titik pusat momentum, dan semakin kecil jika semakin dekat titik pusat momentum.

No	Persamaan
38	$\vec{P}_a = \int_{P'_1}^{P'_3} V \frac{dv_{P'_1}}{dt} d\vec{p} + \int_{P'_2}^{P'_3} V \frac{dv_{P'_2}}{dt} d\vec{p} + \int_{P'_1}^{P'_3} V \frac{dv_{P'_2}}{dt} d\vec{p}$
39	$\vec{P}_a = \int_{P'_1}^{P'_3} m \frac{dv_{P'_1}}{dt} d\vec{p} + \int_{P'_2}^{P'_3} m \frac{dv_{P'_2}}{dt} d\vec{p} + \int_{P'_1}^{P'_3} m \frac{dv_{P'_2}}{dt} d\vec{p}$
40	$\vec{P}_a = \int_{P'_1}^{P'_3} sz \frac{dv_{P'_1}}{dt} d\vec{p} + \int_{P'_2}^{P'_3} sz \frac{dv_{P'_2}}{dt} d\vec{p} + \int_{P'_1}^{P'_3} sz \frac{dv_{P'_2}}{dt} d\vec{p}$
	$\vec{P}_a = \vec{p}'_1 \begin{bmatrix} SV, m, sz_{a1} \\ SV, m, sz_{b1} \\ SV, m, sz_{c1} \\ SV, m, sz_{d1} \\ SV, m, sz_{e1} \\ SV, m, sz_{f1} \\ SV, m, sz_{g1} \\ SV, m, sz_{h1} \\ SV, m, sz_{i1} \\ SV, m, sz_{j1} \end{bmatrix} + \vec{p}'_2 \begin{bmatrix} SV, m, sz_{a2} \\ SV, m, sz_{b2} \\ SV, m, sz_{c2} \\ SV, m, sz_{d2} \\ SV, m, sz_{e2} \\ SV, m, sz_{f2} \\ SV, m, sz_{g2} \\ SV, m, sz_{h2} \\ SV, m, sz_{i2} \\ SV, m, sz_{j2} \end{bmatrix} + \vec{p}'_3 \begin{bmatrix} SV, m, sz_{a3} \\ SV, m, sz_{b3} \\ SV, m, sz_{c3} \\ SV, m, sz_{d3} \\ SV, m, sz_{e3} \\ SV, m, sz_{f3} \\ SV, m, sz_{g3} \\ SV, m, sz_{h3} \\ SV, m, sz_{i3} \\ SV, m, sz_{j3} \end{bmatrix}$
43	$\vec{P}_a \cong Mesh_1 = \int_{P'_1}^{P'_3} V, m, sz \frac{dv_{P'_1}}{dt} d\vec{p}$

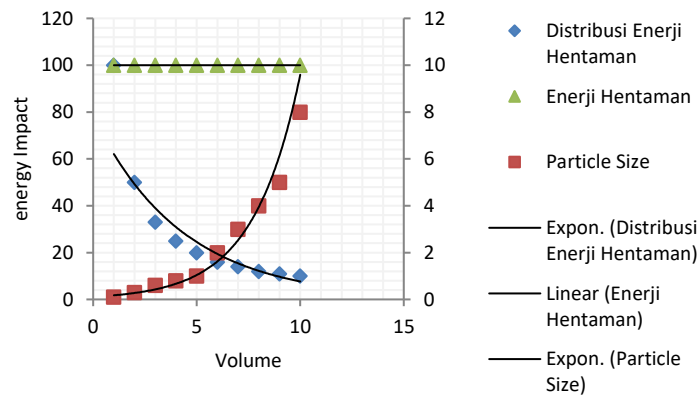
$$\vec{P}_a \cong Mesh_2 = \int_{P_1'}^{P_3'} V, m, sz m \frac{dv_{P_2'}}{dt} d\vec{p}$$

$$\vec{P}_a \cong Mesh_3 = \int_{P_1'}^{P_3'} V, m, sz \frac{dv_{P_3'}}{dt} d\vec{p}$$

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 energy impact terhadap V, m, sz



Gambar 3 Grafik hubungan antara energi impact distribution terhadap particle size

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

$$\vec{P}|_{1mm^3-10mm^3} \propto \int_1^{10} |\vec{p}_{1V_1',m_1',sz_1'} + \vec{p}_{2V_2',m_2',sz_2'} + \vec{p}_{3V_3',m_3',sz_3'} \rightarrow [\sum \vec{P}_i \rightarrow \sum \vec{p}_f = \int_0^\infty |V, m, sz]| \quad 46$$

Persamaan 46 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 energi jika penskalaan per mlimeter dilakukan di awal sebelum dan sesudah momentum.

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 terdefinisikan 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 dihasilkan dan kebutuhan energi impact, dalam hal ini adalah kinetik energi.

ACKNOWLEDGMENT

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional-Indonesia dan Pusat Penelitian Teknologi Pertambangan serta Badan Perencanaan Pembangunan Daerah, Penelitian dan Pengembangan Provinsi Riau-Indonesia, serta Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru atas dukungan dan penyediaan fasilitas penelitian selama penelitian ini berlangsung.

REFERENSI

- [1] Matthew Huang (2002). *Vehicle Crash Mechanics*. International Standard Book. Number 0-8493-0104-1, CRC Press LLC.
- [2] [Inhwan 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. Deshpande (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 Scientifics 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] [Fateme 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 Pecahanation 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.