



Mathematica Model Physical Collision On Comminution And Fragmentation Of Brittle Material Fracture

Lukman Hakim Nasution^{a,*,1}, Farouk Sumarli^{a,2}, Rafit Mahendra^{a,3}, Inpenas^{a,4},
 Heri Suropto^{a,5}, Alpison^{a,6}, Yasin Yusuf^{a,7}

^aLembaga Riset Genial Indo Mandiri Rokan Hulu-Riau

¹SMK N 1 Rambah Rokan Hulu-Riau

²SMP N 5 Tandun Rokan Hulu-Riau

³Dinas Pariwisata & Kebudayaan Rokan Hulu-Riau

⁴SMA N 1 Ujungbatu Rokan Hulu-Riau

⁵Universitas Pasir Pengaraian Rokan Hulu-Riau

⁶Perpustakaan dan Arsip Rokan Hulu-Riau

⁷MTsN 1 Ujungbatu Rokan Hulu-Riau

INFO ARTIKEL

Tersedia Online: Desember 2022

ABSTRAK

Pengembangan teori matematik *physycal collision* proses kominusi dan fragmentasi sampel batubara bitumius bergarispusat 10mm dengan cara ianya menghentamkan diri ke dinding rijid berbentuk setengah lingkaran berdiameter 60mm dengan jarak bervareasi; dimana tekanan tabung sebagai sumber *kinetic energy* untuk pergerakan sampel juga bervareasi. Analisis fragmen-fragmen pecahan sampel merujuk kepada teori *physical collision* kominusi dan fragmentasi partikel tunggal. Hasil analisis menunjukkan bahwa *physical collision* proses kominusi dan fragmentasi dapat ditentukan dari perubahan kondisi sistem pertama, kedua dan ketiga; dimana terjadinya perubahan *static impact* ke *dynamic impact* pada sampel. Kondisi perubahan *static impact* ke *dynamic impact* adalah proses distribusi *energy impact* merentasi material hingga terjadi pecah. Terjadinya pecah pada material menyebabkan perubahan bentuk dan ukuran awal kepada ukuran akhir sebagai proses kominusi dan fragmentasi secara matematik.

Kata kunci: *physycal collision*; coal; kominusi dan fragmentasi.

CONTACT

lukman_n82@yahoo.com

ABSTRACT

Development of a mathematical theory of physycal collision processes of comminution and fragmentation of bituminous coal samples with a center line of 10 mm by hitting a semicircular rigid wall with a diameter of 60 mm at various distances; where the tube pressure as a source of kinetic energy for sample movement also varies. Analysis of the sample fragments refers to the theory of physical collision comminution and single particle fragmentation. The results of the analysis show that the physical collision of the comminution and fragmentation processes can be determined from changes in the first, second and third system conditions; where there is a change in static impact to dynamic impact on the sample. The condition of changing static impact to dynamic impact is the process of distributing the impact energy across the material until it breaks. The occurrence of rupture in the material causes a change in shape and initial size to the final size as a mathematical comminution and fragmentation process.

Kata kunci: *physical collision*; coal; comminution and fragmentatio

I. PENDAHULUAN

Terjadinya proses hentaman/*impact* antara dua objek/material rapuh atau lebih secara linier melalui *kinetic energy* mengikot kepada prinsip mekanisme *physical collision* [1-5]; dan prinsip hukum kedua Newton, serta prinsip linear momentum [6-11]. Prinsip-prinsip tersebut sebagai dasar proses kominusi dan fragmentasi material lebih kecil dari ukuran awal dengan parameter utama adalah *force*, *mass*, *velocity*, dan *distance* [12-15]. *Surface impact* antara dua objek/material merupakan pergerakan *impact*, dan terjadinya perubahan bentuk material tersebut [17-22]; sebagai proses kominusi dan fragmentasi secara mekanik [22].

Proses kominusi dan fragmentasi material berawal dari *static impact* dan kemudian ke *dynamic impact* menyebabkan perubahan bentuk sebagai pergerakan kekuatan retakan akibat distribusi *energy kinetik impact* dari titik *central impact* sebagai pusat *energy impact*. Secara *physic* pecahnya material menjadi lebih kecil dari ukuran awal [24-28]; karena *energy impact* dibagi volume, dan volume sebagai ukuran fragmen dari material tersebut setelah pecah [29, 30].

Perubahan ukuran pecahan fragmen material mengikot *physical collision theory* menunjukkan bahwa terjadinya perubahan nilai *energy impact* dari *static* ke *dynamic*. Proses ini berawal dari titik pusat *impact* dan seterusnya merentasi sepanjang material [31-35]. Oleh sebab itu, *physical collision* proses kominusi dan fragmentasi perlu dilakukan secara esperimental untuk mendapatkan analisis teori secara matematik.

II. MATERIAL DAN METODE

Eksperimental dilakukan untuk pengembangan teori matematik dari *physycal collision*, berkaitan dengan proses kominusi dan fragmentasi batubara bitumius bergarispusat 10mm. Prosesnya adalah batubara menghentamkan diri ke dinding rijid berbentuk setengah lingkaran berdiameter 60mm dengan jarak bervareasi, dan tekanan tabung sebagai sumber *kinetic energy* untuk pergerakan sampel juga bervareasi.

Proses ini menyebabkan batubara pecah secara *physic* menjadi fragmen-fragmen lebih kecil dari ukuran awal.



Gambar 1. Fragmen sampel



Gambar 2. Prototype machine impact process

Fenomena batubara pecah menjadi fragmen-fragmen lebih kecil dari ukuran awal dianalisis mengikot teori *physical collision* kominusi dan fragmentasi partikel tunggal.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis *physical collision* kominusi terhadap proses fragmentasi sampel bergarispusat 10mm³ berdasarkan *kinetic energy impact (KEI)* hasil dari eksperimental terdiri dari tiga tahapan. Tahap pertama sistem adalah:

$$\sum_{1 \rightarrow n}^0 F = \sum_{1 \rightarrow n}^0 m \cdot \sum_{1 \rightarrow n}^0 a \quad (1)$$

dimana KEI_1 sistem dalam kondisi diam, yaitu kondisi dimana tahap pertama ini sebagai parameter untuk sistem kondisi tahap kedua dan ketiga; dengan persamaan Gaya (F), kinetik energy (KE), dan momentum (\vec{p}) adalah:

$$\vec{p}_{1m_1} = \vec{p}'_{1m'_1} + \vec{p}'_{1m'_2} + \vec{p}'_{1m'_3} = 0 \quad (2)$$

dimana: \vec{p}_{1m_1} dan $\vec{p}'_{1m'_1} + \vec{p}'_{1m'_2} + \vec{p}'_{1m'_3}$ adalah linear

momentum awal dan akhir dari sistem kondisi pertama yaitu 0. Sedangkan perubahan linear momentum merupakan jumlah energi dalam sistem berkaitan dengan ukuran sampel; sehingga melalui hubungan antara hukum Newton kedua dengan momentum dan kecepatan adalah:

$$F = m \cdot a = m \frac{dv}{dt} = \frac{d(m \cdot v)}{dt} = \frac{dp}{dt} \quad (3)$$

dimana:

dv merupakan perubahan kecepatan (v), dt adalah perubahan massa (m), dan dp adalah perubahan momentum. Karena perubahan kecepatan dan momentum pada kondisi pertama sistem adalah 0, persamaan hubungan antara hukum Newton kedua

dengan linear momentum dan percepatan (a), dapat ditulis sebagai berikut:

$$F_1 = m_i \cdot a_1 = m_i \frac{dv_1}{dt_1} = \frac{d(m_i \cdot v_1)}{dt_1} = \frac{d\vec{p}_1}{dt_1} = 0 \quad (4)$$

dimana:

$$F_1 = m_i \cdot a_1 = m_i \frac{dv_1}{dt_1} = \frac{d(m_i \cdot v_1)}{dt_1} = \frac{d\vec{p}_1}{dt_1} = 0$$

merupakan hubungan antara Gaya terhadap linear momentum, dan a pada kondisi pertama di sistem; sehingga hubungan *kinetic energy* terhadap linear momentum adalah:

$$KE = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{(m \cdot v)^2}{2 \cdot m} = \frac{p^2}{2 \cdot m} \quad (5)$$

dimana KE adalah *kinetic energy* dalam *joule*, dan untuk hubungan KE sistem terhadap proses *impact* secara linier momentum dapat dinyatakan $KEI_1 = 0$ yaitu:

$$KEI_1 = \frac{1}{2} m_i \cdot v_1^2 = \frac{(m_i \cdot v_1)^2}{2 \cdot m_i} = \frac{p_1^2}{2 \cdot m_i} = 0 \quad (6)$$

Kemudian untuk melengkapi kondisi pertama pada sistem, parameter jarak dapat dinyatakan di dalam kondisi sistem kedua (KEM_2), yaitu kondisi sistem dimana F berlaku, dan menyebabkan perubahan posisi dan kedudukan sampel dari kondisi pertama sistem ke kondisi kedua sistem sebagai tahap kedua, yaitu:

$$F_2 = m_i \cdot a_1, \quad (7)$$

dimana

$$a_1 = \frac{\Delta v_1}{\Delta t_1} \text{ dengan } \Delta v_1 = v_{f1} - v_{i1} \text{ dan}$$

$$\Delta t_1 = t_{f1} - t_{i1}$$

dimana F_2 adalah Gaya kondisi sistem pertama, m_i adalah massa awal, a_1 adalah percepatan, Δv_1 adalah perubahan kecepatan, v_{i1} adalah kecepatan awal, v_{f1} adalah kecepatan akhir, Δt_1 adalah perubahan waktu, t_{i1} adalah waktu awal, dan t_{f1} adalah waktu akhir sampel kondisi sistem kedua. Sehingga persamaan linear momentum pada kondisi sistem kedua adalah:

$$\vec{p}_2 = m_i \cdot v_1 \quad (8)$$

dimana $\vec{p}_2 = m_i \cdot v_1$ adalah linear momentum sampel kondisi sistem kedua, dengan perubahan sistem pada linear momentum adalah:

$$\vec{p}_{2m_i} = \vec{p}_{2m_1} + \vec{p}_{2m_2} + \vec{p}_{2m_3} \quad (9)$$

dimana \vec{p}_{2m_i} adalah linear momentum awal, dan $\vec{p}_{2m_1} + \vec{p}_{2m_2} + \vec{p}_{2m_3}$ adalah linear momentum kondisi sistem kedua; sehingga persamaan untuk perubahan jumlah dari linear momentum adalah:

$$F_2 = m_i \cdot a_1 = m_i \frac{dv_1}{dt_1} = \frac{d(m_i \cdot v_1)}{dt_1} = \frac{d\vec{p}_2}{dt_1} \quad (10)$$

dimana $F_2 = m_i \cdot a_1 = m_i \frac{dv_1}{dt_1} = \frac{d(m_i \cdot v_1)}{dt_1} = \frac{d\vec{p}_2}{dt_1}$ adalah hubungan Gaya terhadap linear momentum dan percepatan sampel; maka persamaan hubungan antara *KEI* terhadap linear momentum kondisi sistem kedua adalah:

$$KEI_2 = \frac{1}{2} m_i \cdot v_1^2 = \frac{(m_i \cdot v_1)^2}{2 \cdot m_i} = \frac{p_2^2}{2 \cdot m_i} \quad 11$$

dimana $KEM_2 = \frac{1}{2} m_{1cl} \cdot v_1^2 = \frac{(m_{1cl} \cdot v_1)^2}{2 \cdot m_{1cl}} = \frac{p_2^2}{2 \cdot m_{1cl}}$ adalah KE kondisi sistem kedua, dan dapat dinyatakan sebagai awal *impact static* sampel ke dinding penghancur sistem; sedangkan kondisi sistem ketiga adalah perubahan *impact static* ke *impact dynamic* bermula dari:

$$F_3 = m_i \cdot a_1, \quad (12)$$

dimana $a_1 = \frac{\Delta v_1}{\Delta t_1}$ dengan $\Delta v_1 = v_{f1} - v_{i1}$ dan

$$\Delta t_1 = t_{f1} - t_{i1}$$

dimana F_3 adalah Gaya pada kondisi sistem ketiga, dengan persamaan linear momentumnya dapat ditulis sebagai berikut:

$$\vec{p}_3 = m_i \cdot v_1 \quad (13)$$

dimana $\vec{p}_3 = m_i \cdot v_1$ adalah linear momentum kondisi sistem ketiga, dengan persamaan percepatan dan linear momentum sistem adalah:

$$\vec{p}_{3m_i} = \vec{p}_{3m_1} + \vec{p}_{3m_2} + \vec{p}_{3m_3} \quad (14)$$

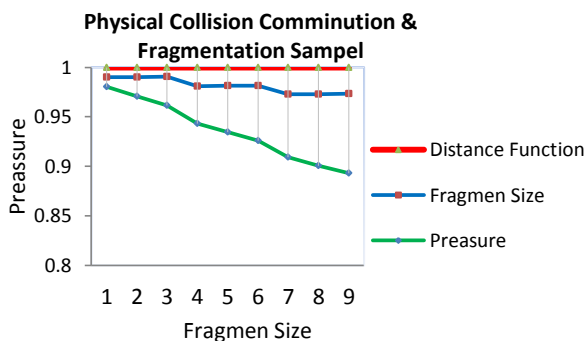
Dimana \vec{p}_{3m_i} adalah linear momentum awal, $\vec{p}_{3m_1} + \vec{p}_{3m_2} + \vec{p}_{3m_3}$ adalah linear momentum akhir kondisi sistem ketiga. Kemudian hubungan antara hukum Newton kedua terhadap linear momentum dan percepatan serta sistem adalah:

$$F_3 = m_i \cdot a_1 = m_i \frac{dv_1}{dt_1} = \frac{d(m_i \cdot v_1)}{dt_1} = \frac{d\vec{p}_3}{dt_1} \quad (15)$$

dimana $F_3 = m_i \cdot a_1 = m_i \frac{dv_1}{dt_1} = \frac{d(m_i \cdot v_1)}{dt_1} = \frac{d\vec{p}_3}{dt_1}$ adalah hubungan antara Gaya terhadap linear momentum dan percepatan kondisi sistem ketiga. Sedangkan hubungan antara KEI terhadap kondisi sistem ketiga dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$KEI_3 = \frac{1}{2} m_i \cdot v_1^2 = \frac{(m_i \cdot v_1)^2}{2 \cdot m_i} = \frac{\vec{p}_3^2}{2 \cdot m_i} \quad (16)$$

dimana $KEM_3 = \frac{1}{2} m_i \cdot v_1^2 = \frac{(m_i \cdot v_1)^2}{2 \cdot m_i} = \frac{\vec{p}_3^2}{2 \cdot m_i}$ adalah KEI kondisi sistem ketiga, dimana kondisi ini dapat dinyatakan sebagai awal terjadinya proses kominusi terhadap fragmentasi sampel; yaitu sampel telah menghentamkan diri, adanya perubahan persamaan Gaya, linear momentum, dan KEI. Sedangkan KEI dan distribusi dari *kinetic energy impact distribution* (KEM_d) merupakan proses kominusi terhadap fragmentasi sampel secara *physical collision*.



Gambar 3. Grafik *physical collision* kominusi dan ukuran pecahan fragmen sampel

Berdasarkan Gambar 1, dapat dinyatakan bahwa perubahan bentuk dan ukuran sampel terjadi setelah adanya proses perubahan *static impact* ke *dynamic impact* di kondisi sistem ketiga. Sedangkan untuk menentukan prediksi nilai *kinetic energy impact distribution* dan ukuran pecahan fragmen sampel merujuk kepada teori *fracture brittle material and particle distribution* dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$KEI_d \rightarrow B_{size} = C_{size} - A_{size} \rightarrow \left[\frac{x_i = \Delta x_i}{V_i = \Delta V_i} \right]_{size_{maks}} - \left[\frac{x_i = \Delta x_i}{V_i = \Delta V_i} \right]_{size_{min}} = \left[\frac{x_i = \Delta x_i}{V_i = \Delta V_i} \right]_{size_{med}} \quad (17)$$

$$B_{x_H} = C_{x_H} - A_{x_H} \rightarrow \left[\frac{x_i = \Delta x_i}{V_i = \Delta V_i} \right]_{x_{Hmaks}} - \left[\frac{x_i = \Delta x_i}{V_i = \Delta V_i} \right]_{x_{Hmin}} = \left[\frac{x_i = \Delta x_i}{V_i = \Delta V_i} \right]_{x_{Hmed}} \quad (18)$$

dimana kajian khusus *fracture brittle material and particle distribution* akan di tampilkan pada paper selanjutnya.

IV. KESIMPULAN

Physical collision kominusi dan fragmentasi material rampuh secara analisis matematik dapat ditentukan berdasarkan perubahan kondisi system pertama, kedua dan ketiga; dimana terjadinya perubahan *static impact* ke *dynamic impact* pada material tersebut. Kondisi perubahan *static impact* ke *dynamic impact* merupakan proses *kinetic energy impact distribution* yang merentasi material hingga terjadi pecah. Terjadinya pecah pada material menyebabkan perubahan bentuk dan ukuran awal kepada akhir material sebagai proses kominusi dan fragmentasi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pemerintah Kabupaten Rokan Hulu, pengawas dan staf PUSPIPEK Serpong Indonesia khususnya dari laboratorium metalurgi karena telah banyak membantu dalam hal saran dan dukungan teknis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Kirane, Y. Su and Zdenek, P. Bazant, "Strain Rate Dependent Microplane Model for High Rate Comminution of Concrete under Impact Based on Kinetic Energy Release Theory". USA: *The royal Society Publishing*, 2015.
- [2] D. Saini and B. Shafei, "Concrete Constitutive Models for Low Velocity Impact Simulations". *International Journal of Impact Engineering*. Volume 132: 103329, 2019.
- [3] F.o Begani and M. S. Gulino, "A Vehicle Model for Crash Stage Simulation". *IFAC-PapersOnLine*. Volume 51: 837-842, 2018.
- [4] M. J. Rhodes, "Introduction to Particle Technology". 2nd Edition. John Wiley and Sons, Ltd: ISBN 9780470014271, 2008.
- [5] H. Ayas, H. H. Benzahar and M. Chabaat, "Energy Release Rate during the Cracking of

- Composite Materials”. *Energy Procedia*. Volume 74: 1040-1047, 2015.
- [6] Z. Dongmei, G. Shiqiao, N. Shaohua and L. Haipeng, “Study on Collision of Threaded Connection during Impact”. *International Journal of Impact Engineering*. Volume 106: 133-145, 2017.
- [7] N. Saini and C. Kleinstreuer, “A New Collision Model for Ellipsoidal Particles in Shear Flow”. *Journal of Computational Physics*. Volume 376: 1028-1050, 2019.
- [8] KuahaiYu, A . Husam, Elghannay and DaneshTafti, “An Impulse Based Model for Spherical Particle Collisions with Sliding and Rolling”. *Powder Technology*. Volume 319: 102-116, 2017.
- [9] S. Shafiei, “Experimental Investigation of Tsunami Borne Debris Impact Force on Structures: Factors Affecting Impulse-Momentum Formula”. *Ocean Engineering*. Volume 127: 158-169, 2016.
- [10] A. E. Chubykalo, A. Espinoza and B. P. Kosyakov, “The Origin of the Energy Momentum Conservation Law”. *Annals of Physics*. Volume 384: 85-104, 2017 .
- [11] V. Tomar and M. Bose, “Anomalies in Normal and Oblique Collision Properties of Spherical Particles”. *Powder Technology*. Volume 325: 669-677, 2018.
- [12] A. S. Grigoriev, “Kinetic Approach to The Development of Computational Dynamic Models for Brittle Solids”. *International Journal of Impact Engineering*. Volume 123: 14-25, 2019.
- [13] Ferhun C. Caner and Zdenek P. Bazant, “Impact Comminution of Solids Due to Local Kinetic Energy of High Shear Strain rate: II–Microplane Model and Verification”. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. Volume 64: 236-248, 2014.
- [14] T. M. Loganathan, “10-Ballistic Impact Response of Laminated Hybrid Composite Materials”. *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering: 171-191, 2019.
- [15] D. Cereceda, “A Micro-Mechanical Modeling Approach for Dynamic Fragmentation in Brittle Multi-Phase Materials”. *International Journal of Solids and Structures*. Volume 134: 116-129, 2018.
- [16] T. Korman, “Impact of Physical and Mechanical Properties of Rocks on Energy Consumption of Jaw Crusher”. Physicochemical problem of mineral processing. Volume 51: 461-475, 2015.
- [17] E. Buhl, “Ejecta from Experimental Impact Craters: Particle Size Distribution and Fragmentation Energy”. Volume 237: 131-142, 2014.
- [18] X. Chen and A. H. C. Chan, “Modelling Impact Fracture and Fragmentation of Laminated Glass Using the Combined Finite-Discrete Element Method”. *International Journal of Impact Engineering*. Volume 112: 15-29, 2018.
- [19] G. R. Ballantyne, W. Peukert and M. S. Powell, “Size Specific Energy (SSE) Energy Required Generating Minus 75 Micron Material”. *International Journal of Mineral Processing*. Volume 136: 2-6, 2015.
- [20] J. S. Salazar, “Mathematical Modeling of a Vertical Shaft Impact Crusher Using the Whiten Model”, *Minerals Engineering*. Volume 111: 222-228, 2017.
- [21] J. E. W. Eade, “Hypervelocity Impact Fragmentation of Basalt and Shale Projectiles. *Icarus*. Volume 311: 52-68, 2018.
- [22] E. Buhl, “Ejecta from Experimental Impact Craters: Particle Size Distribution and Fragmentation Energy”, *Icarus*, Volume 237: 131-142, 2014.
- [22] Y. Ju, “CDEM-Based Analysis of the 3D Initiation and Propagation of Hydrofracturing Cracks in Heterogeneous Glutenites. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. Volume 35: 614-623, 2016.
- [24] R. R. Santhapuram and A. K. Nair, “Frictional Properties of Multi Asperity Surfaces at the Nanoscale”, *Computational Materials Science*. Volume 136: 253-263, 2017.
- [25] X. Chen and A. H. C. Chan, “Modelling Impact Fracture and Fragmentation of Laminated Glass Using the Combined Finite Discrete Element Method”. *International Journal of Impact Engineering*. Volume 112: 15-29, 2018.

- [26] J. S. Salazar, "Mathematical Modeling of a Vertical Shaft Impact Crusher Using the Whiten Model", *Minerals Engineering*. Volume 111: 222-228, 2017.
- [27] J. E. W. Eade, "Hypervelocity Impact Fragmentation of Basalt and Shale Projectiles". *Icarus*: 52-68, 2018.
- [28] Y. Kanda, S. Sano and F. Saito, *Relationship between Particle Size and Fracture Energy for Single Particle Crushing*. Kona No 3 (2985): 10-108-112, 2017.
- [29] Y. X. and Y. Wang, "Size Effect on Specific Energy Distribution in Particle Comminution". *Word scientific Fractals*. Volume 25: No. 2, 11: 1750016, 2017.
- [30] K. Uenishi, "Dynamic Fragmentation of Ice Spheres: Two Specific Fracture Patterns", *Procedia Structural Integrity*. Volume 13: 670-675, 2018.
- [31] X. Lai, "A Non-Ordinary State-Based Peridynamics Modeling of Fractures in Quasi-Brittle Materials". *International Journal of Impact Engineering*. Volume 111: 130-146, 2018.
- [32] S. Jiang, "The Effect of Inter-Grain Contact Material on the Dynamic Fracture of Short Glass Bead Chains under Impact". *Powder Technology*. Volume 339: 911-921, 2018.
- [33] O. A. Kudryavtsev and S. B. Sapozhnikov, "Numerical Simulations of Ceramic Target Subjected to Ballistic Impact Using Combined DEM/FEM Approach". *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 114: 60-70, 2016.
- [34] Y. Wang, "A New SPH-Based Continuum Framework with an Embedded Fracture Process Zone for Modelling Rock Fracture", *International Journal of Solids Structures*. Volume 159: 40-57, 2019
- [35] L. F. Orozco, "Discrete-Element Model for Dynamic Fracture of a Single Particle". *International Journal of Solids and Structures*. Volume 166: 47-56, 2019.