

Kominusi Batubara Mencapai Bentuk Serbuk Berdasarkan *Kinetic Destruction Model* (KDM)

Lukman Hakim Nasution^{1,3*}, Zulkarnain¹, Muhammad Hafidz¹, Helmi Chazali Lubis¹, M. Subkhan Riza¹, Shinta Utiya Syah¹, Monalisa Hasibuan¹, Purnama Irwansyah², Asnan², Fajar Budiman², Syafril Sayafar³, Rinaldi³, Nazaruddin³, Heri Suripto⁴

¹Badan Riset dan Inovasi Daerah Provinsi Riau

²Badan Perencanaan Pembangunan Daerah, Penelitian dan Pengembangan Provinsi Riau

³Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru

⁴Universitas Pasir Pengaraian
lukman_n82@yahoo.com

ABSTRAK

Pengurangan ukuran material terus dilakukan pada industri kominusi dengan berbagai bentuk dan model, untuk memenuhi kebutuhan industri hilir. Analisis secara matematik diperlukan pada *kinetic destruction* (KD) untuk prediksi awal kebutuhan energi, dan ukuran akhir material proses kominusi. Melalui eksperimen dengan udara bertekanan 1bar-5bar, jarak *kinetic impact* 25cm-100cm terhadap sampel batubara bergarispusat 10mm³, kubus 1mm³, dan balok 10mm³; analisis KD dilakukan. Berdasarkan hasil analisis berfaktorkan volume, mass dan size (vmsz) material; nilai KD berkurang akibat faktor pertambahan jarak mengikut pertambahan pecahan vmsz dalam millimeter; untuk itu diperlukan penggandaan input energi sesuai pertambahan jarak vmsz dalam milimeter. Pembuktian pengandaan nilai KD sesuai pertambahan jarak vmsz, mampu mengurangi ukuran sampel hingga menjadi bentuk serbuk, sesuai hasil perhitungan dari $KD_{D_V} = \frac{V_i}{V_f} \Big|_{d_{V_d}}$, $KD_{D_m} = \frac{m_i}{m_f} \Big|_{d_{m_d}}$, $KD_{D_{sz}} = \frac{sz_i}{sz_f} \Big|_{d_{sz_d}}$ dengan rasio

perbandingan $R = \frac{S_i}{S_f}$. Nilai pecahan akhir dari ketiga bentuk dan ukuran sampel adalah ± 0.000001852 mm, berjumlah lebih dari 5.400.000 pecahan, dan mass setiap pecahan ± 0.0000000001 kg. Disimpulkan bahwa KDM dapat diaplikasikan pada industri kominusi untuk memprediksi kebutuhan energi, dan ukuran material hingga mencapai bentuk serbuk yang diinginkan.

Kata kunci: Kominusi; batubara; *kinetic destruction model*

ABSTRACT

Material size reduction continues to be carried out in the comminution industry with various shapes and models, to meet the needs of downstream industries. Mathematical analysis is required on kinetic destruction (KD) for early prediction of energy requirement, and final size of comminuted material. Through experiments with pressurised air of 1bar-5bar, kinetic impact distance of 25cm-100cm on coal samples with centres of 10mm³, cubes of 1mm³, and blocks of 10mm³; KD analysis was conducted. Based on the results of the analysis factoring in the volume, mass and size (vmsz) of the material; the KD value decreases due to the factor of distance increase according to the fractional increase of vmsz in millimetres; therefore, it is necessary to double the energy input according to the increase of vmsz distance in millimetres. The proof of doubling the KD value according to the increase in vmsz distance, is able to reduce the sample size to powder form, according to the calculation results of the

$KD_{D_V} = \frac{V_i}{V_f} \Big|_{d_{V_d}}$, $KD_{D_m} = \frac{m_i}{m_f} \Big|_{d_{m_d}}$, $KD_{D_{sz}} = \frac{sz_i}{sz_f} \Big|_{d_{sz_d}}$

ratio $R = \frac{S_i}{S_f}$. The final fraction value of the three sample shapes and sizes is ± 0.000001852 mm, totalling more than 5,400,000 fractions, and the mass of each fraction is ± 0.0000000001 kg. It is concluded that KDM can be applied to the comminution industry to predict energy requirements, and material size to achieve the desired powder shape.

Keywords: *Electrolysis of water; Clean hydrogen; Electrolysis techniques; Catalysts; Sustainable energy*

Corresponding Author:
✉ Lukman Hakim Nasution
Accepted on: 2024-12-24

1. PENDAHULUAN

Destruction material adalah proses menghancurkan material dari ukuran besar ke ukuran rata-rata lebih kecil, dapat dilakukan melalui proses impact, pemotongan atau penggilingan [1]. Proses ini sebagai langkah penting dalam memproses berbagai jenis material; berdasarkan prinsip fracture mechanic, kebutuhan energi penghancuran, distribusi dan ukuran akhir material yang diinginkan. [2-4]. Secara matematik proses ini dapat ditentukan melalui hubungan antara mekanisme penghancuran terhadap ukuran, dan kebutuhan energi [5, 6]. Kebutuhan energi tersebut dipengaruhi oleh distribusi dan ukuran pecahan yang dihasilkan, model penghancuran, dan fenomena peningkatan kebutuhan energi terhadap ukuran pecahan [7]. Kajian proses ini dapat ditentukan dengan memperkirakan ciri material, dan melalui eksperimen [8], berdasarkan impact atau tekanan, serta kerusakan partikel tunggal material [9]. Jumlah kebutuhan energi pada proses ini juga tergantung dari ukuran dan distribusi pecahan material; dimana kebutuhan energi meningkat, seiring ukuran pecahan material semakin kecil [10]. Proses ini juga tergantung dari hubungan antara energi terhadap pengecilan ukuran material yang diinginkan [11], hubungan antara penghancuran terhadap energi dan ukuran material, seperti proses impact dan penggilingan sebagai proses kominusi [12].

Proses kominusi merupakan proses momentum diantara dua objek [13, 14]; sebagai prinsip impact dan gilas pengurangan ukuran material [15]. Proses kominusi umumnya dilakukan secara bertingkat sesuai ukuran awal material, kapasitas mesin seperti crusher jenis impact [16]; dan dapat dianalisis secara matematik [17-19]. Proses kominusi untuk brittle material berawal dari static impact ke dynamic, dimana titik awal impact sebagai pusat fracture energi [20]. Proses kominusi dengan kinetic energy impact juga dipengaruhi oleh ukuran, jarak material ke titik impact [21-23]; jenis dan bentuk dinding landasan penghancur [24], serta geometri material [25, 26]. Geometri dari ruang impact juga memiliki hubungan terhadap peningkatan retak dan pecahan material, [27-30]; dan secara matematik juga dipengaruhi oleh jarak [31].

Jika beban impact untuk pertumbuhan retak dan pecahan dipengaruhi oleh kinetic energy, maka kinetic energy sebagai energy antarmuka untuk kominusi yang berkaitan terhadap perhitungan perbedaan antara kinetic energy impact per unit volume material awal, sebelum dan sesudah proses [32, 33]; termasuk energy per satuan massa, dan perubahan bentuk, serta ukuran akhir material dihasilkan [34, 35]. Proses penghancuran melalui kinetic energy impact juga dipengaruhi oleh kecepatan dan ketebalan, serta pengaruh bentuk dan ukuran awal dari material [36-45].

2. METODOLOGI

Proses pengurangan ukuran brittle material dilakukan melalui eksperimen impact secara linier momentum, menggunakan udara bertekanan 1bar hingga 5bar pada batubara bergarispusat 10 mm^3 , dan berukuran 10mm panjang dengan tebal 1mm dan lebar 1mm, serta 1 mm^3 dengan jarak impact 100cm. Kemudian analisis kinetic destruction secara matematik dilakukan terhadap pecahan sampel yang telah mengalami pengurangan ukuran akibat proses impact.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Persamaan-persamaan matematik dalam analisis Kinetic Destruction Model (KDM) material, melalui sampel batubara. Analisis ini berfaktorkan volume, massa, dan ukuran (vms) sampel, serta jarak, yang dapat menentukan nilai dari kinetic energy pada kehancuran sampel mencapai bentuk serbuk. Tahapan persamaan-persamaan analisis secara matematik disajikan sebagai berikut:

$$\sum KD_D = \int_{V_i}^{V_f} (KD|_{V_d} - V_d) dV_d \quad 1$$

$$\sum KD_D = \int_{m_i}^{m_f} (KD|_{m_d} - m_d) dm_d \quad 2$$

$$\sum KD_D = \int_{SZ_i}^{SZ_f} (KD|_{sz_d} - sz_d) dsz_d \quad 3$$

KD adalah kinetic destruction awal, KD_D adalah distribusi KD , V_d distribusi volume, $d_{(V_d)}$ adalah fungsi volume sebagai jarak, V_i dan V_f adalah volume awal dan akhir; dimana m_d adalah distribusi massa, $d_{(m_d)}$ adalah fungsi massa sebagai jarak, m_i dan m_f adalah massa awal dan akhir. Sedangkan sz_d distribusi ukuran partikel, $d_{(sz_d)}$ adalah fungsi ukuran partikel sebagai jarak, sz_i dan sz_f adalah ukuran partikel awal dan akhir. Sehingga untuk memecahkan sampel menjadi bentuk serbuk berfaktorkan vms, seperti 1 unit sampel bervolume 10mm³ dapat dipecahkan menjadi 1.000.000; dengan sz_f difungsikan sebagai d , dan jumlah total KD diperlukan dapat ditentukan.

$$\frac{10 \text{ mm}^3}{1,000,000} = sz_f, \text{ di mana: } \left[\frac{KEM}{1,000,000} = \right. \quad 4$$

$$\left. sz_f \right] \quad KD_{Total} = KD_{maks} + KD_{med} + KD_{min} \quad 5$$

Sementara input KD awal pada 1mm pertama vms digandakan sesuai jumlah pembagian volume diawal dalam millimeter; dan saat proses destruction terjadi, kinetic energy diserap dan beredar dari titik awal destruction merentasi sampel dengan tingkat rasio pengurangan (R), s_i dan s_f adalah perbandingan ukuran awal dan akhir partikel sebelum dan setelah terjadinya destruction.

$$KD_{DV} = \frac{V_i}{V_f} \Big|_{dV_d} \quad 6$$

$$KD_{Dm} = \frac{m_i}{m_f} \Big|_{dm_d} \quad 7$$

$$KD_{Dsz} = \frac{sz_i}{sz_f} \Big|_{dsz_d} \quad 8$$

$$R = \frac{s_i}{s_f} \quad 9$$

Sedangkan perbandingan pengurangan ukuran sampel dapat dihasilkan ditinjau dari momentum pada saat destruction terjadi, dengan \vec{p} momentum sebelum proses, \vec{p}'_1 momentum setelah proses, $\frac{\vec{p}}{\vec{p}'_1=sz_1}$ adalah sz_1 ukuran partiel pertama, $\frac{\vec{p}}{\vec{p}'_2=sz_2}$ adalah sz_2 ukuran partikel kedua, dan $\frac{\vec{p}}{\vec{p}'_3=sz_3}$ adalah sz_3 ukuran partikel ketiga sampel pecaha oleh KD .

$$R = \frac{\vec{p}}{\vec{p}'_1=sz_1}, \frac{\vec{p}}{\vec{p}'_2=sz_2}, \frac{\vec{p}}{\vec{p}'_3=sz_3}, \dots, \frac{\vec{p}}{\vec{p}'_n=sz_n} \quad 10$$

$$R = sz_1 + sz_2 + sz_3 + \dots + sz_n = \frac{S_i}{s_f} \quad 11$$

$$\frac{\Delta sz_i}{\Delta KD} = \frac{sz_1 + sz_2 + \dots + sz_n}{KD_1 + KD_2 + \dots + KD_n} \quad 12$$

$$\frac{sz_3 - sz_2 - sz_1}{KD_1}, \dots, \frac{sz_3 - sz_2 - sz_1}{KD_{1.000.000}}, \dots, \frac{sz_3 - sz_2 - sz_1}{KD_\infty} = \frac{\Delta sz}{KD_{D_\infty}} \quad 13$$

KD_1 hingga KD_∞ adalah KD_d , dimana $\frac{KD}{V_i} = \frac{KD}{m_i} = \frac{KD}{sz_i}$ dengan $F = ma$, $KE = \frac{1}{2}mv^2 = KD = \frac{mv^2}{2m}$, dan $z\bar{p} = zp'$, yaitu $p'_1 = sz_1$, $p'_2 = sz_2$ dan $p'_3 = sz_3$ adalah perubahan kinetic destruction pada pengurangan ukuran partikel per perubahan pecahan sampel. Maka ΔF sebagai perubahan fragmentasi pecahan dapat diperoleh melalui $\bar{z}\bar{p} = \bar{p}'_1 + \bar{p}'_2 + \bar{p}'_3$, dengan $\bar{z}\bar{p}' = sz_1 + sz_2 + sz_3$, atau $sz_1 + sz_2 + sz_3$, dan ΔKD adalah zp , yaitu nilai kinetic destruction fragmentasi sampel.

$$KD = \frac{\Delta KD}{\Delta F} \text{ dan } \Delta KD = \lim_{sz \rightarrow 0} \frac{\Delta KD}{\Delta F} \quad \begin{matrix} 1 \\ 4 \end{matrix}$$

$$KD = \lim_{\vec{p} \rightarrow \infty} \frac{z\bar{p}}{z\bar{p}'} \quad \begin{matrix} 1 \\ 5 \end{matrix}$$

Sedangkan rasio pengurangan dari KD berdasarkan volume sampel berkaitan dengan tingkat rasio pengurangan (R) dapat ditentukan; dengan $zV_i = V'_1 + V'_2 + V'_3$ dimana $V'_1 = sz_1, m_1$, $V'_2 = sz_2, m_2$ dan $V'_3 = sz_3, m_3$.

$$R_1 = \frac{V_i}{V'_1 = sz_1} \quad 16a$$

$$R_2 = \frac{V_i}{V'_2 = sz_2} \quad 16b$$

$$R_3 = \frac{V_i}{V'_3 = sz_3} \quad 16c$$

Sehingga perbandingan pengurangan ukuran sampel dari kinetic destruction berdasarkan vms dapat ditentukan, dengan V_i, m_i, sz_i adalah vms sampel, $V'_1, m'_1, sz'_1 = sz_1$, $V'_2, m'_2, sz'_2 = sz_2$, dan $V'_3, m'_3, sz'_3 = sz_3$ adalah ukuran akhir vms setelah proses.

$$R = \frac{S_i}{s_f} = \left[R_1 = \frac{V_i m_i sz_i}{V'_1 m'_1 sz'_1 = sz_1}, R_2 = \frac{V_i m_i sz_i}{V'_2 m'_2 sz'_2 = sz_2}, R_3 = \frac{V_i m_i sz_i}{V'_3 m'_3 sz'_3 = sz_3} = R \right] \quad 17$$

Berdasarkan hasil analisis, bahwa nilai KD berkurang karena vms sampel hancur, dan faktor pertambahan jarak mengikut faktor pertambahan vms dalam millimeter. Ini membuktikan bahwa KD dapat mengurangi ukuran sampel menjadi bentuk serbuk, berdasarkan persamaan $KD_{D_V}, KD_{D_m}, KD_{D_{sz}}$ dan hasil perhitungan; dimana 1mm³ sampel awal menjadi berukuran ± 0.000001852 mm, jumlah pecahan lebih dari 5.400.000, dan massa setiap ukuran pecahan ± 0.0000000001 kg. Sehingga dapat dipastikan bahwa persamaan matematik dari KD dapat diaplikasikan pada kinetic destruction untuk proses pengurangan ukuran material menjadi bentuk serbuk yang dikehendaki.

4. KESIMPULAN

Nilai KD berkurang jika vms dari sampel hancur, dimana faktor pertambahan jarak mengikut faktor pertambahan vms dalam millimeter, yang membuktikan bahwa KD dapat mengurangi ukuran sampel menjadi bentuk serbuk, berdasarkan persamaan $KD_{D_v}, KD_{D_m}, KD_{D_{sz}}$ dan hasil perhitungan. Sampel dari ukuran awal 1mm³ menjadi berukuran ± 0.000001852 mm, jumlah pecahan lebih dari 5.400.000, dan massa setiap ukuran pecahan ± 0.0000000001 kg. Sehingga persamaan matematik KD dapat diaplikasikan sebagai kinetic destruction dalam memproses material rapuh menjadi bentuk serbuk sesuai yang dikehendaki.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional, Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Perencanaan Pembangunan Daerah, Penelitian dan Pengembangan Provinsi Riau, Indonesia. which has assisted the facilities during conducting the research.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sebastien Moulinet and Mokhtar Adda Bedia (2015). Popping Balloons: A Case Study of Dynamical Fragmentation. *American Physical Society. PRL* 115, 184301: 1-5.
- [2] Lei Liu (2018). Comparison of different comminution flowsheets in terms of minerals liberation and separation properties. *Minerals Engineering. Minerals Engineering. Volume 125: 26-33.*
- [3] R. A. Mariano and C. L. Evans (2018). The effect of breakage energies on the mineral liberation properties of ores. *Minerals Engineering. Volume 126: 184-193.*
- [4] Zhen Li (2018). Mineral liberation analysis on coal components separated using typical comminution methods. *Minerals Engineering. Volume 126: 74- 81.*
- [5] Peter Radziszewski (2014). Energy recovery potential in comminution processes. *Minerals Engineering. Volumes 46-47: 83-88.*
- [6] Jack Jeswiet and Alex Szekeres (2016). Energy Consumption in Mining Comminution. *Procedia CIRP. Volume 48: 140-145.*
- [7] A. Mwanga, M. Parian and P. Lamberg (2017). Comminution modeling using mineralogical properties of iron ores. *Minerals Engineering. Volume 111: 182-197.*
- [8] Xuemin Liu, Man Zhang and Nan Hub (2016). Calculation model of coal comminution energy consumption. *Minerals Engineering. Volume 92: 21-27.*
- [9] A. Jankovic (2015). 8 - Developments in iron ore comminution and classification technologies. *Iron Ore Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability: 251-282.*
- [10] Chunshun Zhang, Giang D. Nguyen and Jayantha Kodikara (2016). An application of breakage mechanics for predicting energy–size reduction relationships in comminution. *Powder Technology. Volume 287: 121-130.*
- [11] Bo Wang, Ullrich Martin and Sebastian Rapp (2017). Discrete element modeling of the single-particle crushing test for ballast stones. *Computers and Geotechnics* 88. 61–73.

- [12] Chunshun Zhang, Giang D. Nguyen and Jayantha Kodikara (2016). An Application of Breakage Mechanics for Predicting Energy Size Reduction Relationships in Comminution. *Powder Technology*. Volume 287: 121-130.
- [13] Inhwan Han (2018). Analysis of Vehicle Collision Accidents Based on Qualitative Mechanic. *Forensic Science International*. FSI 9428, PII: S0379-0738(18)30490-0.
- [14] 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.
- [15] Carina Ulsen (2018). Concrete Aggregates Properties Crushed by Jaw and Impact Secondary Crushing: *Journal of Materials Research and Technology*, JMRT 381: 9-18.
- [16] C. M. Narayanan and B. C. Bhattacharyya (2014). *Mechanical Operations for Chemical Engineers*. India: Khana publishers.
- [17] Juliana Segura-Salazar Gabriel (2017). Mathematical Modeling of a Vertical Shaft Impact Crusher Using the Whiten Model. *Minerals Engineering*. Volume 111: 222-228.
- [18] Marcus Johansson (2017). A Fundamental Model of an Industrial-Scale Jaw Crusher. *Minerals Engineering*. Volume 105: 69-78.
- [19] Weihong Li (2017). Reducing Comminution Over-Grinding of Powder Coatings with Modified Grinding Pins in an Air Classifier Mill. *Powder Technology*. Volume 344: 36-45.
- [20] Yang Ju (2016). 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.
- [21] G. C. Sih (2017). Mechanics and Physics of Energy Density Theory, Theoretical and Applied Fracture Mechanics. *Powder Technology*, 308, 1-12. Volume 4: 157-173.
- [22] X. P. Zhou (2018). Understanding the Fracture Behavior of Brittle and Ductile Multi-Flawed Rocks by Uniaxial Loading by Digital Image Correlation. *Engineering Fracture Mechanics*. Volume 199: 438-460.
- [23] A. Pineau, A. Benzerga and T. Pardoen (2016). Failure of metals I: Brittle and Ductile Fracture. *Acta Materialia*. Volume 107: 424-483.
- [24] R. P. Thompson and W.J.Clegg (2018). Predicting Whether a Material is Ductile or Brittle. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. Volume 22: 100-108.
- [25] Ian Hutchings and Philip Shipway (2017). *Surface Topography and Surfaces in Contact*. Tribology Second Edition. Friction and Wear of Engineering Materials: 7-35.
- [26] Willian F. Hosford (2005). *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge University Press. ISBN -10: 0-521-84670-6.
- [27] M. M. Kou, Y. J. Lian, and Y. T. Wang (2019). Numerical Investigations on Crack Propagation and Crack Branching in Brittle Solids under Dynamic Loading Using Bond-Particle Model. *Engineering Fracture Mechanics*. Volume 212: 41-56.
- [28] Y. Takashima (2017). Observation of Micro Cracks beneath Fracture Surface during Dynamic Crack Propagation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. Volume 92: 178-184.

- [29] Lei Zhou (2018). Dynamic Propagation Behavior of Cracks Emanating from Tunnel Edges under Impact Loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Volume 105: 119-126.
- [30] 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.
- [31] Erik Eberhardt (2016). Geotechnical Design in Highly Stressed Brittle Rock. *Geotechnical design in highly stressed brittle rock*: 1-30.
- [32] Simon Nicolas Roth, Pierre Leger and Azzeddine Soulimani (2015). A combined XFEM-Damage Mechanics Approach for Concrete Crack Propagation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Volume 283: 923-955.
- [33] A. Huang, Guangda Lu and Pizhong Qiao (2015). An improved Peridynamic Approach for Quasi Static Elastic Deformation and Brittle Fracture Analysis. *MS2937: S0020-7403(15)00072-7*.
- [34] Avi Uzi and Avi Levy (2018). Energy Absorption by the Particle and the Surface during Impact. *Wear*. Volumes 404–405: 92-110.
- [35] Alejandro Gutierrez and Jules Guichou (2014). Computational Simulation of Fracture of Materials in Comminution Devices. *Minerals Engineering*. Volume 61: 73-81.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Burns Shane Joseph (2015). Theoretical and Numerical Analysis of Rigid Body Impacts with Friction. *NUI Galway: Thesis Doctor of Philosophy*.
- [41] L. M. Tavares and R.P. King (1998). Single-Particle Fracture under Impact Loading. *International Journal Mineral Processing*. Volume 54: 1-28.
- [42] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.

- [44] Shihara Perera (2017). Modeling Impact Actions of Flying and Falling Objects. University of Melbourne Australia: Thesis Doctor of philosophy.