

## Iterasi Momentum Fragmentasi Batubara Mencapai Bentuk Serbuk

Lukman Hakim Nasution<sup>1\*</sup>, Gapar<sup>1</sup>, Fajar Budiman<sup>1</sup>, Subkhan Riza<sup>1</sup>, Eka Arief Yanto Putra<sup>1</sup>, Rama Yudha Satria<sup>1</sup>, Emri Juli Harnis<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Badan Perencanaan Pembangunan Daerah, Penelitian dan Pengembangan Provinsi Riau, Indonesia

Email: [lukman\\_n82@yahoo.com](mailto:lukman_n82@yahoo.com)

Received: 13/05/2024; Revised: 03/06/2024; Accepted: 27/06/2024; Published: 30/06/2024

### ABSTRACT

*The smaller size of coal can increase the working efficiency of electricity generating boilers, but to get this size, a method is needed that is able to predict the resulting size. An experimental iterative momentum method is presented, which was developed through experimental fragmentation of 1mm<sup>3</sup> and 10mm<sup>3</sup> coal samples into powder with a parabolic solid base wall. Then an analysis process using mathematical calculations was carried out, and it was proven that the momentum iteration per millimeter scale could determine the final size of the coal produced. Starting from 1 coal fragment measuring 1mm<sup>3</sup> and 10mm<sup>3</sup> to 5,314,410 fragments with the size of each fragment in millimeters being 0.000001852, and the mass of each fragment in kg being 0.0000000001. This proves that fragments size down to powder form using the momentum iteration method can be applied to coal as fuel for power plant boilers, and waste processing without a separation process into nanometer scale particles to increase the functional value and use value of waste in a tenoeconomic way in Riau Province.*

**Keywords:** Iterasi momentum, fragmentation, coal powder form

### ABSTRAK

Ukuran batubara semakin kecil mampu meningkatkan efisiensi kerja boiler pembangkit listrik, namun untuk mendapatkan ukuran tersebut diperlukan metode yang mampu memprediksi ukuran dihasilkan. Eksperimental metode iterasi momentum disajikan, dimana dibangun melalui eksperimental fragmentasi sampel batubara berukuran 1mm<sup>3</sup> dan 10mm<sup>3</sup> menjadi serbuk dengan dinding landasan pejal berbentuk parabolic. Kemudian proses analisis dengan pengiraan secara matematik dilakukan, dan membuktikan bahwa iterasi momentum per millimeter skala dapat menentukan ukuran akhir batubara yang dihasilkan. Bermula dari 1 fragment batubara berukuran 1mm<sup>3</sup> dan 10mm<sup>3</sup> menjadi 5.314.410 fragments dengan ukuran masing-masing fragments dalam unit millimeter adalah 0.000001852, dan massa setiap fragments dalam kg adalah 0.0000000001. Ini membuktikan bahwa fragments size hingga bentuk serbuk dengan metode iterasi momentum dapat diaplikasikan pada batubara sebagai bahan bakar boiler pembangkit listrik, dan pengolahan sampah tanpa proses pemisahan menjadi partikel skala nanometer untuk meningkatkan nilai fungsi serta nilai guna dari sampah secara tenoekonomi di Provinsi Riau.

**Kata Kunci:** Iterasi momentum, fragmentasi, bentuk bubuk batu bara

### PENDAHULUAN

Berdasarkan prinsip matematik bahwa fracture pada brittle material karena adanya faktor tekanan secara terus menerus pada material tersebut [1-3]. Jumlah kerusakan material berupa fracture akan terus bertambah dengan penerapan momentum secara terus menerus, dan ini sebagai hukum penskalaan untuk fragmentasi material

[4]. Material terfragmentasi sebagai akibat dari hubungan kecepatan terhadap jarak momentum di ruang kritikal material tersebut [5, 6]. Melalui pemodelan matematik dan eksperimen penskalaan batas kekuatan momentum, proses fragmentasi pada brittle material beserta distribusi dan keseragaman ukuran akhir fragmentnya dapat ditentukan [7].

Namun tetap diperlukan geometri material untuk proses analisis perhitungan ukuran akhir material dari hasil eksperimen [8, 9]. Terdapat aspek penting proses terfragmentasinya material seperti jenis material itu sendiri, dan tingkat tekanan, geometri, mekanisme fracture dan jenis material itu sendiri [10, 11], dimana mekanisme tekanan merupakan faktor utama fragmentasi [12].

Batubara termasuk jenis brittle material yang banyak digunakan sebagai bahan bakar boiler pembangkit listrik [13, 14]. Pemecahan batubara sebagai bahan bakar boiler dilakukan untuk mendapatkan fragments lebih kecil dengan parameter adalah massa per satuan volume [15]. Semakin kecil fragments batubara dapat meningkatkan efisiensi kerja boiler [16]. Pemecahan dengan metode momentum memiliki ciri bahwa frsgmentasi pada area pusat momentum akan lebih hancur dan drastis melemah apabila beredar sebagai pembebasan energy [17, 18].

Proses fragmentasi juga memiliki kaitan dengan momentum ( $\vec{p}$ ) sebagai jumlah vektor gerakan dari objek dengan massa dan kecepatan dalam unit kg.m/s [19]. Kecepatan, bentuk, volume dan kekerasan material mempengaruhi ukuran fragments hasil momentum, dimana pada area pusat momentum merupakan pusat hentaman dari fragmentasi material [20-28]. Konsep ini sesuai dengan hukum penskalaan fracture yaitu  $\phi = \frac{W}{V}$ , di mana  $\phi^* = \frac{W}{V D^{1/3}}$  dengan  $\phi^*$  ialah fragments,  $W$  adalah energy losses setelah fragmentasi,  $V$  ialah volume material, dan  $D$  adalah eksponen berpecah [29].

Fragmentation juga merupakan size distribution oleh plot massa kumulatif

fragments size tersebut [30], dan secara matematik dapat dianalisis melalui perbedaan ukuran fragments awal dan akhir hasil eksperimen dengan fragment tunggal [31-33]. Berdasarkan momentum, perubahan geometri material dapat ditentukan melalui perbedaan ukuran awal dan akhir setelah terjadinya momentum [34, 35], dimana proses ini dapat dilakukan melalui kaedah eksperimen [36, 37]. Ketika terjadinya momentum pada material, maka terjadi perubahan energy momentum ke energy antar muka, dan untuk pengiraan antara energy momentum adalah dengan per unit volume awal material sebelum dan sesudah proses dengan ditunjukkan pada ukuran fragments menjadi lebih kecil [38, 39].

## METODE

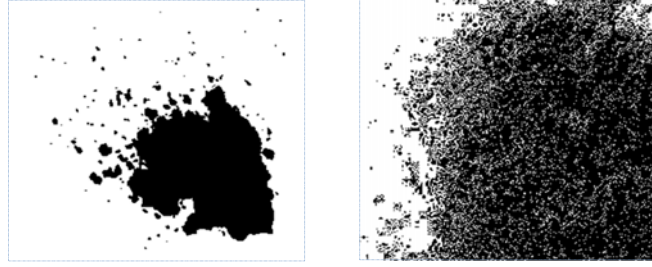
Proses fragmentasi pada sampel batubara berukuran  $1\text{mm}^3$  dan  $10\text{mm}^3$  berawal setelah mengalami momentum dengan adanya perubahan geometri; dimana perubahan geometri awal permukaan sampel merupakan intensitas dari momentum sebagai kekuatan terhadap suatu ruang [40-42]. Model fragmentasi sampel dibangun berdasarkan ruang rentasan energy momentum dengan penskalaan dari iterasi momentum per unit millimeter [43-48], dari fragmens size yang dihasilkan dari eksperimen [49-59].



**Gambar 1.** Alat proses iterasi momentum fragmentasi batubara



**Gambar 2.** Fragments nonhomogeneitas sampel tanpa iterasi momentum



**Gambar 3.** Fragments homogeneitas sampel dengan iterasi momentum

$$IE|_{V_a, m_a, p_{s_a}} = \frac{1}{2} m v^2 \Big|_{IE_{a_1}} \rightarrow IE|_{V_j, m_j, p_{s_j}} = \frac{1}{2} m v^2 \Big|_{IE_{a_{10}}} \quad 1$$

$$IE|_{V_i, m_i, p_{s_i}} = x_{V'_i, m'_i, p_{s'_i}} = \vec{p}_{1V'_1, m'_1, p_{s'_1}} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, p_{s'_2}} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, p_{s'_3}} \quad 2$$

$$IE|_{V_a, m_a, p_{s_a}} = \frac{1}{2} m v^2 \Big|_{1 \text{ mm}^3} IE_{a_1} = \vec{p}_{1V'_1, m'_1, p_{s'_1}} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, p_{s'_2}} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, p_{s'_3}} = x'_1 \quad 3$$

$$IE|_{V_a, m_a, p_{s_a} + \dots + V_j, m_j, p_{s_j}} = \frac{1}{2} m v^2 \Big|_{10 \text{ mm}^3} x_{a_{10}} = \vec{p}_{1V'_1, m'_1, p_{s'_1}} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, p_{s'_2}} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, p_{s'_3}} = x'_{10} \quad 4$$

$$IE = \frac{1}{2} m v^2 \Big|_{10 \text{ mm}^3} = \vec{p}_{1V'_1, m'_1, p_{s'_1}} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, p_{s'_2}} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, p_{s'_3}} \quad 5$$

$$IE_D = \frac{1}{2} m v^2 \Big|_{1 \text{ mm}^3 \rightarrow 10 \text{ mm}^3} = \vec{p}_{1V'_1, m'_1, p_{s'_1}} + \vec{p}_{2V'_2, m'_2, p_{s'_2}} + \vec{p}_{3V'_3, m'_3, p_{s'_3}} \quad 6$$

$$IE_1 = IE_i|_{1 \text{ mm}^3} \rightarrow IE_{10} = IE_i|_{10 \text{ mm}^3} \quad 7$$

$$\text{Contact momentum } 1 IE_{a_1} = x_{V_a} = \frac{1}{2} m v^2 \Big|_{10 \text{ mm}^3} = IE_{ff_a} = \frac{1}{2} m v^2 \Big|_{V_a} = \quad 8$$

$$\frac{1}{2} m v^2 \Big|_1 = \text{Fragmentation}$$

$$\text{Noncontact momentum} = \int_2^9 x_{a_{10}} = \int_{x_{V_b} = \frac{1}{2} m v^2 \Big|_{10 \text{ mm}^3}}^{x_{V_j} = \frac{1}{2} m v^2 \Big|_{10 \text{ mm}^3}} = \quad 9$$

$$\int_{x_{FF_b} = \frac{1}{2} m v^2 \Big|_{V_b} = \frac{1}{2} m v^2 \Big|_2}^{x_{FF_j} = \frac{1}{2} m v^2 \Big|_{V_j} = \frac{1}{2} m v^2 \Big|_{10}} = \text{Fragmentation}$$

Factor volume

Factor massa

Factor ukuran  
fragment

$$\vec{p}_{1V'_1} + \vec{p}_{1V'_2} + \vec{p}_{1V'_3} \Big|_1 \quad \vec{p}_{1m'_1} + \vec{p}_{1m'_2} + \vec{p}_{1m'_3} \Big|_1 \quad \vec{p}_{1p_{s'_1}} + \vec{p}_{1p_{s'}} + \vec{p}_{1p_{s'_3}} \Big|_1 \quad 10$$

$$\vec{p}_{2V'_1} + \vec{p}_{2V'_2} + \vec{p}_{2V'_3} \Big|_2 \quad \vec{p}_{2m'_1} + \vec{p}_{2m'_2} + \vec{p}_{2m'_3} \Big|_2 \quad \vec{p}_{2p_{s'_1}} + \vec{p}_{2p_{s'}} + \vec{p}_{2p_{s'_3}} \Big|_2 \quad 11$$

$$\vec{p}_{10V'_1} + \vec{p}_{10V'_2} + \vec{p}_{10V'_3} \Big|_{10} \quad \vec{p}_{10m'_1} + \vec{p}_{10m'_2} + \vec{p}_{10m'_3} \Big|_{10} \quad \vec{p}_{10ps'_1} + \vec{p}_{10ps} + \vec{p}_{10ps'_3} \Big|_{10} \quad 12$$

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil eksperimen bahwa fragmentation secara physic collision dari Impact Energy (*IE*) menyebabkan terjadinya perubahan ukuran sampel. Perubahan ini secara matematik terjadi di setiap 1mm<sup>3</sup> pertama hingga 1mm<sup>3</sup> ke sepuluh sampel, dimana Distribusi Impact Energy (*IE<sub>D</sub>*) fragmentasi adalah berfaktorkan volume, massa dan ukuran fragment, serta jarak dari titik pusat impact per unit milimeter sebagai momentum ( $\vec{p}$ ).

Berdasarkan persamaan 1 hingga 9 bahwa fragmentasi pada 1mm<sup>3</sup> pertama hingga 1<sup>3</sup>mm ke 10 terjadi secara contact dan noncontact dari titik pusat momentum sebagai pusat impact per unit milimeter adalah Impact Energy Distribusi (*IE<sub>D</sub>*); dimana *V<sub>d</sub>* adalah

distribusi volume, *d<sub>(V<sub>d</sub>)</sub>* adalah fungsi volume sebagai jarak, *V<sub>i</sub>* dan *V<sub>f</sub>* adalah volume awal dan akhir sampel. Sedangkan *m<sub>d</sub>* adalah distribusi massa, *d<sub>(m<sub>d</sub>)</sub>* adalah fungsi massa sebagai jarak, *m<sub>i</sub>* dan *m<sub>f</sub>* adalah massa awal dan akhir. Kemudian *ps<sub>d</sub>* sebagai distribusi particle size, *d<sub>(ps<sub>d</sub>)</sub>* adalah fungsi particle size sebagai jarak, *ps<sub>i</sub>* dan *ps<sub>f</sub>* adalah particle size awal dan akhir sampel.

Kemudian dari hasil perhitungan secara matematik berdasarkan persamaan 10 hingga 12, nilai *IE* serta hubungannya terhadap *IE<sub>D</sub>*, volume, massa dan size particle hingga mencapai bentuk serbuk adalah contoh pembuktian iterasi momentum seperti dijelaskan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil perhitungan pola pembagian berkelipatan 3 iterasi momentum per millimeter

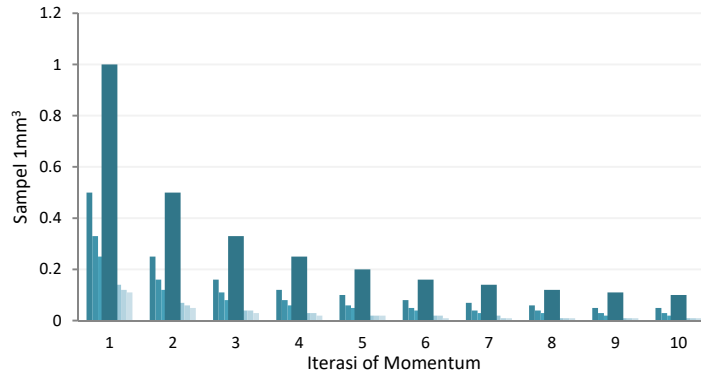
Fragmentation Batubara	Jumlah Fragments			
Pembagian <i>V</i> 1mm <sup>3</sup> ke 1 per mm skala	3	27	19.683	531.441*
Particles size dalam mm	0.333	0.037	0.00005	0.000001852
Massa setiap <i>ps</i> dalam kg	0.00003	0.000003	0.000000004	0.0000000001
<i>IE</i> setiap <i>ps</i>	1.099	0.1222	0.00016	0.0000062
<i>IE</i> setiap <i>ps</i> tanpa fungsi jarak	33.00	3.70	0.005	0.0001
<i>IE</i> per <i>ps</i> dengan fungsi jarak	32.997	3.663	0.00495	0.000098333
Pembagian <i>V</i> 1mm <sup>3</sup> ke 1 hingga Ke 10	30	270	196.830	5.314.410**
Particles size dalam mm	0.333	0.037	0.00005	0.000001852
Massa setiap <i>ps</i> dalam kg	0.00003	0.000003	0.000000004	0.0000000001
<i>IE</i> setiap <i>ps</i>	1.099	0.1222	0.00016	0.0000062
<i>IE</i> setiap <i>ps</i> tanpa fungsi jarak	33.00	3.70	0.005	0.0001
<i>IE</i> per <i>ps</i> dengan fungsi jarak	32.997	3.663	0.00495	0.000098333

Pada table 1 menunjukkan pembagian volume dari 1mm<sup>3</sup> ke 1 hingga 1mm ke 10 jumlah fragments dihasilkan adalah sebanyak 5.314.410;

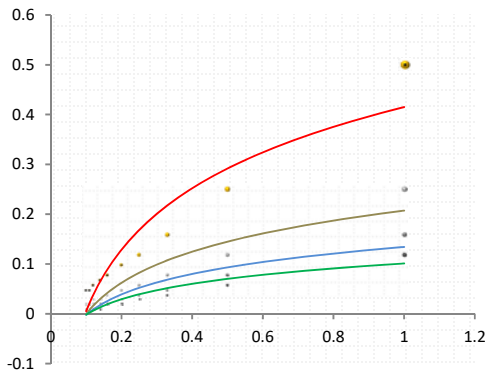
dimana ukuran particle dalam millimeter adalah 0.000001852 dengan massa dalam kg adalah 0.0000000001, dan *IE* setiap particles dalam bar

adalah 0.0000062. Analisis secara matematik dari penerapan persamaan-persamaan di atas membuktikan bahwa fragmentasi sampel dengan metode iterasi momentum dapat menjadikan sampel mencapai bentuk serbuk.

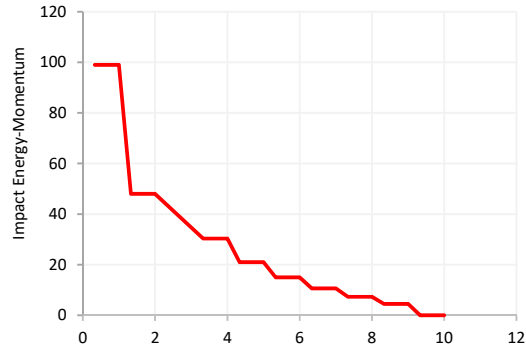
Proses iterasi momentum pada fragmentasi sampel berdasarkan figure 4, menunjukkan bahwa semakin banyak iterasi momentum dilakukan, maka ukuran fragments dihasilkan akan semakin kecil hingga dapat mencapai bentuk serbuk.



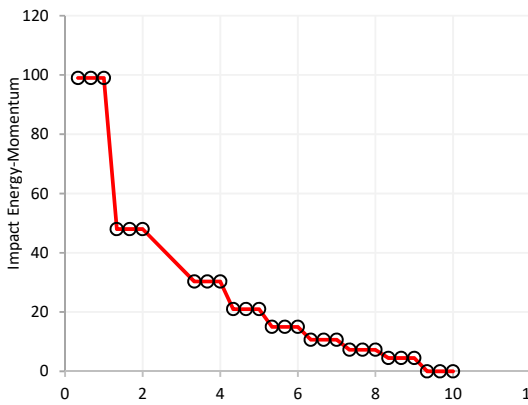
**Gambar 4.** Iterasi momentum pada sampel 1mm<sup>3</sup>



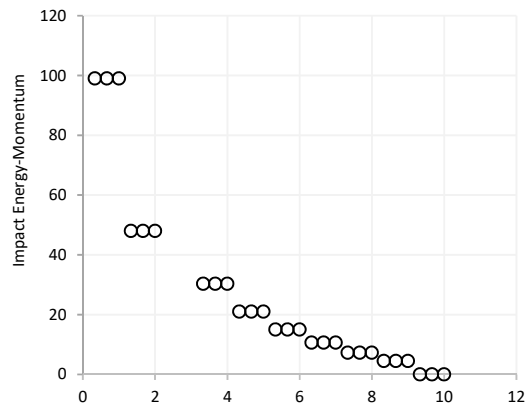
**Gambar 5.**  $IE$  fragmentasi sample



**Gambar 6.**  $IE_D$  fragmentasi sampel



**Gambar 7.**  $IE_D$  Iterasi sampel



**Gambar 8.** Fragments iterasi sampel

Sedangkan  $IE$ ,  $IE_D$  serta ukuran fragments berdasarkan figure 5 hingga figure 8 menunjukkan bahwa terdapat hubungan antara energy dan uuran fragments dihasilkan. Pergerakan energy adalah secara berperingkat sesuai dengan ukuran fragments mengikut per unit milimeter.

Iterasi momentum juga mengikut pada pembagian tiga ukuran fragments disetiap iterasi momentum yang terjadi. Ukuran fragments dipengaruhi oleh transformasi iterasi momentum ke energy impact sebagai peubah volume dan massa sampel. Model iterasi momentum ini dapat digunakan untuk proses fragmentasi bahan rapuh mencapai bentuk serbuk diinginkan dengan tetap berpedoman kepada pembagian unit per milimeter, dimana bentuk pecahan tidak mempengaruhi ukuran fragments.

## KESIMPULAN

Analisis perhitungan iterasi momentum membuktikan dapat mengubah ukuran awal sampel batubara menjadi 5.314.410 bagian, dimana ukuran masing-masing fragments dalam unit millimeter adalah 0.000001852, dan massanya dalam kg adalah 0.0000000001. Ini membuktikan bahwa semakin banyak momentum dilakukan, maka ukuran fragments dihasilkan semakin kecil, dimana proses ini dipengaruhi oleh transformasi iterasi momentum ke energi impact sebagai peubah volume dan massa sampel. Iterasi momentum dilakukan dengan pembagian tiga ukuran fragments disetiap momentum yang terjadi. Model iterasi momentum ini dapat digunakan untuk proses fragmentasi material mencapai bentuk serbuk, seperti untuk pengolahan sampah tanpa proses pemisahan menjadi partikel skala nanometer; dan

meningkatkan nilai fungsi serta nilai guna dari sampah secara tenoekonomi di Provinsi Riau.

## UCAPAN TERIMA KASIH

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, atas dukungan dan penyediaan fasilitas penelitian selama penelitian ini berlangsung.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afshar, T., Disfani, M. M., Arulrajah, A., Narsilio, G. A., & Emam, S. (2017). Momentum of Particle Shape on Breakage of Recycled Construction and Demolition Aggregates. *Powder Technology*, 308, 1-12.
- Asia-Pacific Economic Cooperation (APEC). (2016). Energi Demand and Supply Outlook - 6th Edition: Volume II Economy reviews. Tokyo: Asia-Pacific Energy Research Centre (APERC).
- Aziznejad, S., Esmaili, K., Hadjigeorgiou, J., & Labrie, D. (2018). Responses of Jointed Rock Masses Subjected to Momentum Loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10, 624-634.
- Bae, D. M., Prabowo, A. R., Cao, B., Sohn, J. M., Zakki, A. F., & Wang, Q. (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*, 13(16), 2691-2704.
- Bazant, Z. P., & Caner, F. C. (2014). Momentum Comminution of Solids due to Local Kinetic Energy of High Shear Strain Rate: I. Continuum Theory and Turbulence Analogy. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 64, 223-235.
- Bazant, Z. P., & Su, Y. (2015). Impact Comminution of Solids Due to Progressive Crack Growth Driven by Kinetic Energy of High-Rate Shear. *Journal of Applied Mechanics*, 82(3), 1-5.
- Bosia, F., Pugno, N., Lacidogna, G., & Carpinteri, A. (2008). Mesoscopic Modeling of Acoustic Emission Through an Energetic

- Approach. *International Journal of Solids and Structures*, 45(22-23), 5856-5866.
- Brown, A. J. (2002). Collision Scenarios and Probabilistic Collision Damage. *Marine Structures*, 15(4-5), 335-364.
- Carpinteri, A., & Pugno, N. (2005). *Scaling Laws on Strength of Solids Related to Mechanics or to Geometry*. Italy: Nature Publishing Group.
- Carpinteri, A., Lacidogna, G., Corrado, M., & Di Battista, E. (2016). Cracking and Crackling in Concrete-Like Materials: A Dynamic Energy Balance. *Engineering Fracture Mechanics*, 155, 130-144.
- Cereceda, D., Graham-Brady, L., & Daphalapurkar, N. (2017). Modeling Dynamic Fragmentation of Heterogeneous Brittle Materials. *International Journal of Mechanical Sciences*, 99, 85-101.
- Chen, X., & Chan, A. H. C. (2018). Modeling Momentum Fracture and Fragmentation of Laminated Glass Using The Combined Finite-Discrete Element Method. *International Journal of Mechanical Sciences*, 112, 15-29.
- Chen, X., & Chan, A. H. C. (2018). Modelling Momentum Fracture and Fragmentation of Laminated Glass Using The Combined Finite-Discrete Element Method. *International Journal of Momentum Engineering*, 112, 15-29.
- Chen, X., & Chan, A. H. C. (2018). Modelling Momentum Fracture and Fragmentation of Laminated Glass Using The Combined Finite-Discrete Element Method. *International Journal of Momentum Engineering*, 112, 15-29.
- Davydova, M., Uvarov, S., & Chudinov, V. (2014). Scaling Law of Quasi Brittle Fragmentation. *Procedia Materials Science*, 3, 580-585.
- Gilvarry, J. J. (1961). Fracture of brittle solids. I. Distribution Function for Fragment Size in Single Fracture (Theoretical). *Journal of Applied Physics*, 32(3), 391-399.
- Guin, L., Raphanel, J. L., & Kysar, J. W. (2016). Atomistically Derived Cohesive Zone Model of Intergranular Fracture in Polycrystalline Graphene. *Journal of Applied Physics*, 119(245107).
- Haeri, H., Sarfarazi, V., Marji, M. F., Hedayat, A., & Zhu, Z. (2016). Experimental and numerical study of shear fracture in brittle materials with interference of initial double cracks. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 29(5), 555-566.
- Hassani-Gangaraj, M., Veysset, D., Nelson, K. A., & Schuh, C. A. (2018). In-Situ Observations of Single Micro-Particle Impact Bonding. *Scripta Materialia*, 145, 9-13.
- Horiba. (2010). *A Guidebook to Particle Size Analysis*. Horiba, 1-17.
- Hou, T. X., Xu, Q., & Zhou, J. W. (2015). Size Distribution, Morphology and Fractal Characteristics of Brittle Rock Fragmentations by the Impact Loading Effect. *Acta Mechanica*, 226, 3623-3637.
- Hou, T. X., Xu, Q., & Zhou, J. W. (2015). Size Distribution, Morphology and Fractal Characteristics of Brittle Rock Fragmentations by The Momentum Loading Effect. *Acta Mechanica*, 226, 3623-3637.
- Huang, D., Lu, G., & Qiao, P. (2018). An Improved Peridynamic Approach for Quasi-Static Elastic Deformation and Brittle Fracture Analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, 94-95, 111-122.
- Huang, M. (2002). *Vehicle crash mechanics*. CRC press.
- Huo, J., Wang, W., Sun, W., Ling, J., & Dong, J. (2017). The Multi-Stage Rock Fragmentation Load Prediction Model of Tunnel Boring Machine Cutter Group Based on Dense Core Theory. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90, 277-289.
- Jiang, S., Shen, L., Guillard, F., & Einav, I. (2018). The Effect of Inter-Grain Contact Material on The Dynamic Fracture of Short Glass Bead Chains Under Momentum. *Powder Technology*, 339, 911-921.
- Klichowicz, M., Fruhwirt, T., & Lieberwirth, H. (2018). New Experimental Setup for The Validation of DEM Simulation of Brittle Crack Propagation at Grain Size Level. *Minerals Engineering*, 128, 312-323.
- Kudryavtsev, O. A., & Sapozhnikov, S. B. (2016). Numerical Simulations of Ceramic Target Subjected to Ballistic Momentum Using Combined DEM/FEM Approach. *International Journal of Mechanical Sciences*, 114, 60-70.
- Lai, X., Liu, L., Li, S., Zeleke, M., Liu, Q., & Wang, Z. (2018). A Non-Ordinary State-Based Peridynamics Modeling of Fractures in Quasi-Brittle Materials. *International Journal of Mechanical Sciences*, 111, 130-146.

- Li, X. F., Li, H. B., & Zhao, J. (2017). 3D Polycrystalline Discrete Element Method (3PDEM) for Simulation of Crack Initiation and Propagation in Granular Rock. *Computers and Geotechnics*, 90, 96-112.
- Li, X. F., Li, H. B., Zhang, Q. B., Jiang, J. L., & Zhao, J. (2018). Dynamic Fragmentation of Rock Material: Characteristic Size, Fragment Distribution and Pulverization Law. *Engineering Fracture Mechanics*, 199, 739-759.
- Liu, J., Long, Y., Ji, C., Zhong, M., & Liu, Q. (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*, 109, 264-275.
- Ma, G., Zhang, Y., Zhou, W., Ng, T. T., Wang, Q., & Chen, X. (2018). The effect of different fracture mechanisms on impact fragmentation of brittle heterogeneous solid. *International Journal of Impact Engineering*, 113, 132-143.
- Ma, G., Zhou, W., Zhang, Y., Wang, Q., & Chang, X. (2018). Fractal behavior and shape characteristics of fragments produced by the impact of quasi-brittle spheres. *Powder Technology*, 325, 498-509.
- Motamedi, D., & Mohammadi, S. (2010). Dynamic Analysis of Fixed Cracks in Composites by the Extended Finite Element Method. *Engineering Fracture Mechanics*, 77, 3373-3393.
- Paluszny, A., et al. (2016). A Direct Fragmentation Method with Weibull Function Distribution of Sizes Based on Finite-and Discrete Element Simulations. *International Journal of Solids and Structures*, 38(51).
- Pereira, L. F., Weerheijm, J., & Sluys, L. J. (2018). Simulation of Compaction and Crushing of Concrete in Ballistic Momentum with A New Damage Model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 111, 208-221.
- Pillai, U., Heider, Y., & Markert, B. (2018). A diffusive dynamic brittle fracture model for heterogeneous solids and porous materials with implementation using a user-element subroutine. *Computational Materials Science*, 153, 36-47.
- Rhodes, M. (2008). *Introduction to Particle Technology: 2nd Edition*. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd.
- Roth, S. N., Léger, P., & Soulaïmani, A. (2015). A Combined XFEM-Damage Mechanics Approach for Concrete Crack Propagation. *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 283, 923-955.
- Saeidi, F., Tavares, L. M., Yahyaee, M., & Powell, M. (2016). A Phenomenological Model of Single Particle Breakage as a Multi-Stage Process. *Minerals Engineering*, 98, 90-100.
- Saeidi, F., Yahyaee, M., Powell, M., & Tavares, L. M. (2017). Investigating the Effect of Applied Strain Rate in a Single Breakage Event. *Minerals Engineering*, 100, 211-222.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2008). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics* (7th Ed.). Brooks/Cole, Engage Learning.
- Shi, F. (2016). A review of the applications of the JK size-dependent breakage model Part 2: Assessment of material strength and energy requirement in size reduction. *International Journal of Mineral Processing*, 157, 36-45.
- Shi, T., & Leung, C. K. (2017). Minimum energy based method to predict the multiple cracking pattern in quasi-brittle beam. *International Journal of Solids and Structures*, 117, 1-13.
- Takashima, Y., Kawabata, T., Yamada, S., & Minami, F. (2017). Observation of Micro-Cracks Beneath Fracture Surface During Dynamic Crack Propagation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 92, 178-184.
- Tan, C. Z. (2018). Wave Equation for the Energy and the Momentum of a Moving Particle. *Optik (Stuttg)*, 168, 864-872.
- Tavares, L. M., & King, R. P. (1998). Single-Particle Fracture Under Impact Loading. *International Journal of Mineral Processing*, 54(1), 1-28.
- Vangi, D., Begani, F., Gulino, M. S., & Spitzhüttl, F. (2018). A Vehicle Model for Crash Stage Simulation. *IFAC-PapersOnLine*, 51(2), 837-842.
- Wang, S., Ding, Y., Wang, C., Zheng, Z., & Yu, J. (2017). *Dynamic Material Parameters of Closed-Cell Foams Under High-Velocity Impact*. *International Journal of Impact Engineering*, 99, 111-121.
- Wang, Y., Bui, H. H., Nguyen, G. D., & Ranjith, P. G. (2019). A New SPH-Based Continuum Framework with An Embedded Fracture

- Process Zone for Modeling Rock Fracture. *International Journal of Solids and Structures*, 159, 40-57.
- World Energy Council. (2016). *World Energy Resources Batubara*. London: World Energy Council.
- Wunsche, M., Sladek, J., Sladek, V., Zhang, C., Garcia-Sanchez, F., & Saez, A. (2017). Dynamic Crack Analysis in Piezoelectric Solids Under Time-Harmonic Loadings with a Symmetric Galerkin Boundary Element Method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 84, 141-153.
- Xu, X., Wu, S., Jin, A., & Gao, Y. (2018). Review of The Relationships Between Crack Initiation Stress, Mode I Fracture Toughness and Tensile Strength of Geo-Materials. *International Journal of Geomechanics*, 18(10).
- Yan, C., Ou, Z. C., Duan, Z. P., & Huang, F. L. (2015). An analytical approach to dynamic spalling of brittle materials. *International Journal of Impact Engineering*, 83, 28-36.
- Zhang, G., Gazonas, G. A., & Bobaru, F. (2017). Supershear Damage Propagation and Sub-Rayleigh Crack Growth from Edge-On Momentum: A Peridynamic Analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, 113, 73-87.
- Zhao, T., Crosta, G. B., Uteri, S., & De Blasio, F. V. (2017). Investigation of Rock Fragmentation During Rockfalls and Rock Avalanches via 3-D Discrete Element Analyses. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122, 678-695.
- Zhou, X. P., Lian, Y. J., Wong, L. N. Y., & Berto, F. (2018). Understanding The Fracture Behavior of Brittle and Ductile Multi-Flawed Rocks by Uniaxial Loading Using Digital Image Correlation. *Engineering Fracture Mechanics*, 199, 438-460.
- Zuo, J., Liu, H., & Li, H. (2015). A Theoretical Derivation of The Hoek-Brown Failure Criterion for Rock Materials. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(4), 361-366.