

DOI: 10.29303/jrpb.v9i1.217  
ISSN 2301-8119, e-ISSN 2443-1354  
Tersedia online di <http://jrpb.unram.ac.id/>

**PENDUGAAN REDUKSI UKURAN BERBASIS MODEL ALGORITMA  
PERHITUNGAN BALIK PADA PENEPUNGAN CANGKANG RAJUNGAN  
MENGUNAKAN BALL-MILL**

*Estimation of Particles Reduction based on Back-Calculation Algorithm Model  
in Crab Shells Ball-Milling*

**Vibi Rafianto<sup>1</sup>, Gunomo Djoyowasito<sup>2</sup>,  
Mochamad Bagus Hermanto<sup>3</sup>, Yusuf Wibisono<sup>3,\*</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Magister Keteknikan Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya, Jalan Veteran No. 1, Malang 65145, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya, Jalan Veteran No. 1, Malang 65145, Indonesia

<sup>3</sup>Program Studi Teknologi Bioproses, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya, Jalan Veteran No. 1, Malang 65145, Indonesia

Email\*): [Y\\_Wibisono@ub.ac.id](mailto:Y_Wibisono@ub.ac.id)

Diterima: Desember 2020

Disetujui: Maret 2021

**ABSTRACT**

*Rajungan (*Portunus pelagicus*) is one of the many marine animals found in Indonesian waters. Crab shells contains protein (32.95%), crude fiber (10.89%), calcium (22.93%), and phosphorus (0.78%). The high calcium content makes the crab shells can be processed to obtain hydroxyapatite compounds, which could be used as a slow-release fertilizer. In order to convert crab shell waste into hydroxyapatite compound, a process of reducing the size or shading of the crab shell is required. The flouring process can be carried out using a Ball-Mill, but there has been no specific research that discusses crab shells' mechanism using a Ball-Mill. The purpose of this study was to determine the milling parameters of the back-calculation algorithm model in crab shells milling so that the estimation of particle size reduction of crab shell flour particles was obtained. In this study, the batch type Ball-Mill was used to grind 1.5 kg of dry crab shells with different ball diameter ratios. The estimation of the solving parameters was carried out using a back-calculation algorithm model with the estimation of the solving parameters sequentially  $\alpha$ ;  $\alpha$ ;  $\delta$ ;  $\gamma$ ;  $\phi = 1.1; 1.9; 1000; 0.5; 0.6$  in treatment A, and  $\alpha$ ;  $\delta$ ;  $\gamma$ ;  $\phi$  is  $8.8; 6.4; 1000; 0.6; 8.8$  in treatment B. With these parameters, it can be simulated between the grinding time and the resulting particle size.*

**Keywords:** ball-mill; crab shells; hydroxyapatite; kinetic model; flour

**ABSTRAK**

Rajungan (*Portunus pelagicus*) merupakan salah satu hewan laut yang banyak terdapat di perairan Indonesia. Limbah cangkang rajungan memiliki kadar protein (32,95%), serat kasar

(10,89%), kalsium (22,93%), dan fosfor (0,78%). Kandungan kalsium yang tinggi membuat cangkang rajungan dapat diolah untuk mendapatkan senyawa hidroksiapatit, yang bisa dipergunakan untuk pupuk lepas lambat. Sebelum dikonversi menjadi senyawa hidroksiapatit, diperlukan proses pengecilan ukuran atau penepungan dari cangkang rajungan. Proses penepungan dapat dilakukan menggunakan *Ball-Mill*, tetapi belum ada penelitian secara khusus yang membahas tentang mekanisme penepungan cangkang rajungan menggunakan *Ball-Mill*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan parameter penggilingan dari model kinetik pada penggilingan cangkang rajungan sehingga didapatkan prediksi pengecilan ukuran partikel tepung cangkang rajungan. Dalam penelitian ini, *Ball-Mill* tipe *batch* digunakan untuk menggiling 1,5 kg cangkang rajungan kering dengan rasio diameter bola yang berbeda. Estimasi parameter pemecahan dilakukan menggunakan model algoritma penghitungan balik, dengan estimasi parameter pemecahan secara berurutan  $\alpha$ ;  $\alpha$ ;  $\delta$ ;  $\gamma$ ;  $\phi = 1,1$ ;  $1,9$ ;  $1000$ ;  $0,5$ ;  $0,6$  pada perlakuan A, dan  $\alpha$ ;  $\delta$ ;  $\gamma$ ;  $\phi$  adalah  $8,8$ ;  $6,4$ ;  $1000$ ;  $0,6$ ;  $8,8$  pada perlakuan B. Dengan menggunakan parameter tersebut dapat disimulasikan antara lama waktu penggilingan dengan ukuran partikel yang dihasilkan.

**Kata kunci:** *ball-mill*; cangkang rajungan; hidroksiapatit; model kinetik; tepung

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Rajungan (*Portunus pelagicus*) merupakan salah satu hewan laut yang banyak terdapat di perairan Indonesia. Berdasarkan data Kementerian Kelautan dan Perikanan (2017), ekspor rajungan mencapai 15.867 ton yang berupa daging beku. Setiap 100 – 350 g rajungan menghasilkan limbah cangkang rajungan sebanyak 51 – 150 g (Purnamasari, *et al.*, 2015) dikarenakan 57% dari limbah rajungan berupa cangkang (Multazam, 2002). Kusumawati (2014) menyatakan bahwa limbah rajungan memiliki kadar protein 32,95%, serat kasar 10,89%, kalsium 22,93%, dan fosfor 0,78%. Dengan kandungan protein dan kalsium yang cukup tinggi cangkang rajungan dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk sintesis hidroksiapatit (Wibisono, *et al.*, 2018). Hidroksiapatit adalah material sejenis keramik yang memiliki kandungan kalsium dan fosfat yang tinggi (Ulfyana, *et al.*, 2018). Karena kandungan fosfat yang dikandungnya, dan juga sifat penyerapan balik (*bioresorbable*), hidroksiapatit bisa dimanfaatkan sebagai pupuk lepas lambat, baik dalam senyawa tunggal maupun dikombinasikan dengan pupuk

konvensional (Wibisono, *et al.*, 2020). Sebelum dapat dikonversi menjadi hidroksiapatit, cangkang rajungan harus ditepungkan terlebih dahulu, sehingga mudah direaksikan dengan bahan prekursor lain.

Salah satu cara untuk dapat membuat tepung dari cangkang rajungan adalah dengan menggunakan alat *Ball-Mill*. Prinsip kerja *Ball-Mill* adalah dengan menghancurkan bahan menggunakan bola – bola dalam tabung horizontal yang berputar sehingga bola – bola tersebut akan berputar dan bertumbukan langsung dengan bahan menyebabkan fragmentasi pada bahan menjadi ukuran yang halus (Diana, 2010). Penggilingan menggunakan *Ball-Mill* menghasilkan bubuk yang lebih kecil dan seragam (Yan, *et al.*, 2019).

Pendugaan ukuran partikel yang berhasil diproses dengan menggunakan *Ball-Mill* perlu dilakukan untuk melihat efisiensi penepungan dengan berbagai variasi ukuran dan rasio bola yang dipergunakan. Lebih jauh, pengaruh bahan yang diproses dalam *Ball-Mill* juga menentukan ukuran partikel serta distribusi ukuran partikel yang dihasilkan. Beberapa model matematika *Ball-Mill* dikembangkan diantaranya model kinetik berdasarkan pada persamaan keseimbangan massa yang

menyatakan kuantitas interval ukuran partikel tertentu (Monov, *et al.*, 2012). Proses *wet and dry Ball-Mill* dianalisis untuk mendapatkan pengaruh terhadap produktivitas partikel halus (Kotake, *et al.*, 2011). Penggunaan *back-calculation algorithm* dilakukan untuk mendapatkan parameter pemecahan dari proses penggilingan tipe *batch*. Selain itu pemodelan *Ball-Mill* tipe *batch* dapat dilakukan dengan distribusi ukuran kumulatif dalam bentuk notasi matriks (Hosten, 2005).

**Tujuan**

Sejauh ini belum ada penelitian yang berfokus pada mekanisme penggilingan cangkang rajungan dengan menggunakan *Ball-Mill* tipe *batch*, sehingga tujuan dari penelitian ini adalah menentukan parameter penggilingan dari model kinetik penggilingan cangkang rajungan menggunakan *Ball-Mill* tipe *batch* dan menggunakannya sebagai acuan untuk prediksi pengecilan ukuran partikel selama 10 jam proses penggilingan.

**METODE PENELITIAN**

**Bahan dan Alat**

Cangkang rajungan kering sebanyak 1,5 Kg dengan kadar air basah  $9,5 \pm 0,12\%$  dan ukuran lebar 8 – 10 cm digunakan pada penelitian ini. Cangkang rajungan didapat dari limbah pabrik pengolahan rajungan di pesisir pantai Pasuruan, Jawa Timur. Cangkang rajungan dicuci dan dibersihkan dari sisa daging menggunakan air mengalir. Selanjutnya cangkang yang sudah bersih dijemur menggunakan matahari selama 12 jam dan di oven menggunakan oven listrik selama 4 jam pada suhu 115°C.

Perbandingan antara berat cangkang rajungan yang digunakan adalah 1:10 dengan total berat bola yang digunakan dalam proses penggilingan, dengan volume cangkang rajungan dan bola yang digunakan tidak lebih dari 25% dari total volume *Ball-Mill* yang digunakan.

Alat utama yang digunakan pada penelitian ini adalah *Ball mill* tipe *batch* dengan diameter 25 cm dan panjang 30 cm digunakan untuk proses penepungan. Rotasi dari *ball mill* diperoleh dari motor listrik 2 HP yang diatur menggunakan *inverter* Toshiba VF-S11. Pada bagian dalam *ball mill* terdapat 3 besi penopang setiap 120° dengan ketinggian 1 cm. Pada penelitian ini, bola penghancur pada *Ball mill* menggunakan 4 macam ukuran bola *stainless steel* dengan diameter masing – masing 4,5 cm, 3,6 cm, 2,4 cm, dan 1 cm.

**Metode Penelitian**

Pemodelan matematika dilakukan menggunakan *software* MATLAB® R2007b Analisis dan pengukuran distribusi ukuran diameter partikel tepung didapat kurang dari 500 µm dengan menggunakan *CILAS 1090- dry*. Model matematika yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada *back-calculation algorithm* (Hermanto, *et al.*, 2019 dan Das, 2001) seperti yang dituliskan pada persamaan 1.

$$\frac{\partial F(x,t)}{\partial t} = \int_x^\infty S(x')B(x,x')dF(x',t)....(1)$$

Penjabaran dari persamaan 1 ditulis pada persamaan 2 dengan total ukuran fraksi total dibagi menjadi N bagian.

$$\frac{\partial F_i}{\partial t} = \sum_{j=i+1}^N S(x_j)B(x_i,x_j).....(2)$$

Dimana:

$F_i$  = Ukuran fraksi partikel kumulatif  $\leq X_i$

$S(x_j)$  = Fungsi seleksi

$B(x_i,x_j)$  = Fungsi pemecahan (distribusi kumulatif ukuran partikel  $\leq i^{th}$ )

$X_i$  = Diameter partikel dari fraksi i

Fungsi seleksi dan fungsi pemecahan secara berurutan ditulis pada persamaan 3 dan persamaan 4.

$$S_j = a \left(\frac{x_j}{x_m}\right)^\alpha .....(3)$$

$$B_{i,j} = \phi \left(\frac{x_i}{x_j}\right)^\gamma + (1 - \phi) \left(\frac{x_i}{x_j}\right)^\delta \dots\dots\dots(4)$$

Parameter yang bertanggung jawab pada fungsi seleksi adalah  $\alpha$ , dimana  $\alpha$  adalah parameter yang mempengaruhi cepat lambatnya penepungan dan  $\alpha$  adalah parameter yang mempengaruhi kecepatan proses penepungan antara satu waktu dengan waktu berikutnya, sedangkan parameter yang berpengaruh pada fungsi pemecahan adalah  $\delta$  terhadap laju pemecahan partikel di awal sebaran (partikel halus),  $\gamma$  terhadap laju pemecahan partikel, dan  $\phi$  terhadap laju pemecahan pada akhir sebaran partikel. Bentuk matriks dari persamaan 3 dapat dinyatakan dengan dengan persamaan 5 dan 6.

$$\frac{d\tilde{F}}{dt} = \tilde{A}\tilde{F} + \tilde{C} \dots\dots\dots(5)$$

$$A_{ij} = \begin{cases} S_j B_{i,j} - S_{j+1} B_{i,j+1} & ; i < j \\ -S_{j+1} B_{i,j+1} & ; i = j \\ 0 & ; i > j \end{cases}$$

$$C_{i,1} = S_N B_{i,N} \dots\dots\dots(6)$$

**Prosedur Penelitian**

Pada penelitian proses penggilingan selama 4 jam menggunakan dua perlakuan tanpa pengulangan dimana pada perlakuan A menggunakan ukuran bola 3.6, 2.4, dan 1 cm dengan perbandingan 1:4:16 dan pada perlakuan B menggunakan ukuran bola 4,5 cm, 2,4 cm, dan 1 cm dengan perbandingan 1 : 10 : 100. Persamaan diferensial diselesaikan menggunakan formulasi Runge-Kutta dengan metode Dorman-Prince sebagai metode standar di MATLAB yang disebut ODE45. Estimasi parameter dilakukan dengan menggunakan jumlah *error* optimasi kuadrat antara prediksi dari model matematika dan data dari hasil pengamatan. Pendekatan dilakukan menggunakan fungsi *lsqnonlin* di MATLAB. Dimana interval dari estimasi parameter didapat dari fungsi *nlparci*.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

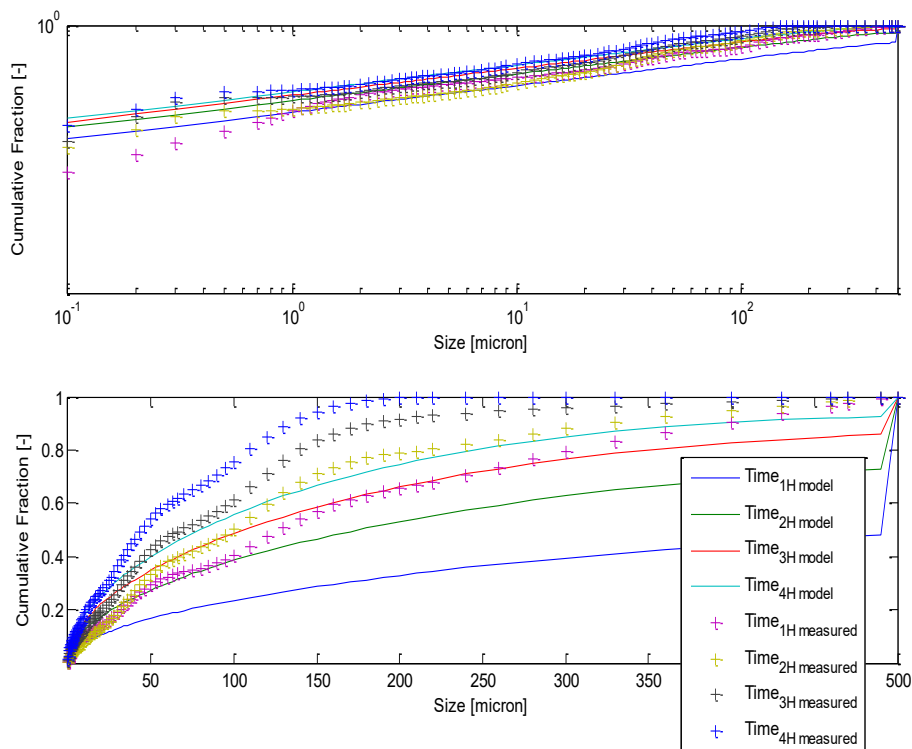
Penggilingan terhadap cangkang rajungan dilakukan selama 4 jam dan diambil sampel setiap satu jam untuk pengamatan distribusi ukuran partikel menggunakan CILAS 1090-*dry*. Total data pengukuran sebanyak 100 titik berkisar antara 0,1  $\mu$ m hingga 500  $\mu$ m yang kemudian dibandingkan dengan hasil model matematika untuk mendapatkan lima parameter proses penggilingan. Simulasi dan estimasi parameter menggunakan model matematika dengan *back-calculation algorithm* secara kumulatif dapat memperhitungkan distribusi partikel dimulai dari fraksi partikel halus pada grid pertama (0,1  $\mu$ m) hingga fraksi partikel kasar pada grid N (500  $\mu$ m), sehingga nilai grid terakhir harus sama dengan 100% atau 1.

Nilai prediksi parameter awal diperoleh dengan menganalisis efek parameter pada simulasi model. Prediksi parameter terbaik yang menghasilkan nilai simulasi terdekat dengan data pengukuran dipilih sebagai prediksi parameter awal untuk optimasi. Prediksi parameter awal secara berurutan  $\alpha$ ;  $\alpha$ ;  $\delta$ ;  $\gamma$ ;  $\phi = 1,1 ; 1,9 ; 1000 ; 0,5 ; 0,6$  pada perlakuan A, dan untuk  $\alpha$ ;  $\delta$ ;  $\gamma$ ;  $\phi$  adalah 8,8 ; 6,4 ; 1000 ; 0,6 ; 8,8 pada perlakuan B. Simulasi dan hasil estimasi parameter perlakuan A ditampilkan pada Gambar 1 dan perlakuan B pada Gambar 2.

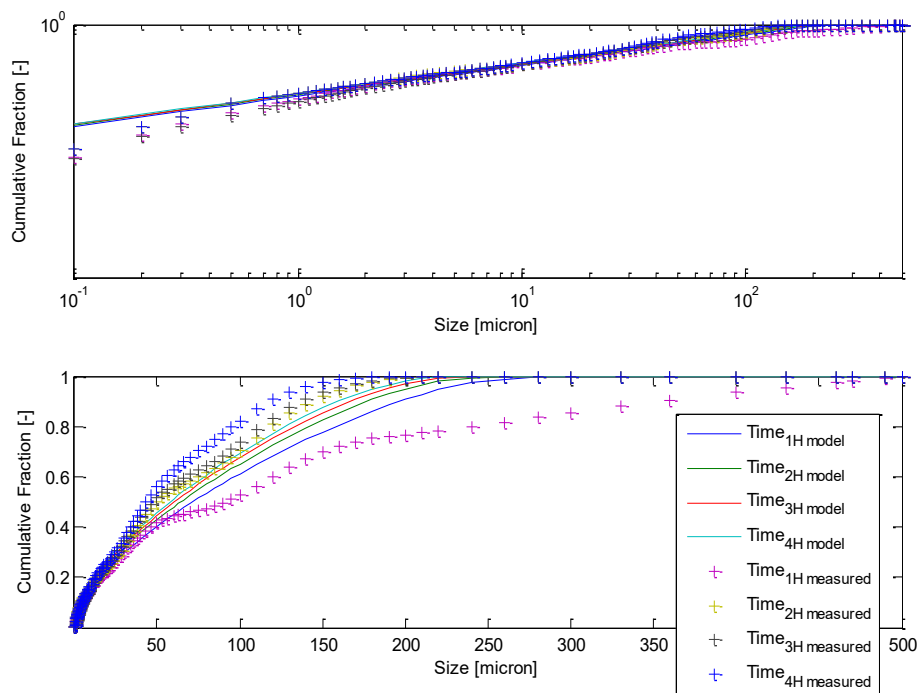
Pada Gambar 1 dan 2 terdapat dua jenis angka simulasi penggilingan yang menggambarkan angka yang sama, dimana pada gambar bagian atas menggunakan sumbu logartmik dan bagian atas menggunakan sumbu skala reguler. Sumbu logartmik digambarkan sebagai jarak yang sama untuk data pengukuran dari fraksi partikel halus hingga partikel kasar. Sedangkan sumbu reguler tidak dapat menggambarkan fraksi partikel halus dengan jelas. Pada Gambar 1 dan 2 dengan skala logartmik menggambarkan bahwa pada fraksi halus model simulasi tidak sesuai dengan data pengukuran. Lintasan

titik data pengukuran terutama pada fraksi halus disebabkan oleh pengaruh dari ukuran bola beragam yang berfungsi sebagai penggiling. Setiap ukuran bola memiliki kontribusi tertentu pada kisaran tertentu pada penampilan fraksi partikel. Bola dengan diameter 3,6 cm berkontribusi pada partikel berukuran 120  $\mu\text{m}$  - 150  $\mu\text{m}$ , bola dengan diameter 2,4 cm berkontribusi pada partikel berukuran 30  $\mu\text{m}$  - 40  $\mu\text{m}$ , dan bola dengan diameter 1 cm berkontribusi pada partikel berukuran 8  $\mu\text{m}$  - 10  $\mu\text{m}$ . Sedangkan pada Gambar 2 bola dengan diameter 4,5 cm berpengaruh pada ukuran partikel 40  $\mu\text{m}$  - 100  $\mu\text{m}$ , bola berdiameter 2,4 cm berpengaruh pada ukuran partikel 30  $\mu\text{m}$  - 40  $\mu\text{m}$ , dan bola dengan diameter 1 cm berpengaruh pada ukuran partikel 8  $\mu\text{m}$  - 10  $\mu\text{m}$ .

Sementara Tabel 1 dan 2 menampilkan pendugaan parameter dan nilai intervalnya. Parameter  $\alpha$  dan  $\gamma$  telah memiliki nilai pendugaan yang tepat pada kedua perlakuan. Sedangkan parameter  $\alpha$  dan  $\phi$  memiliki nilai pendugaan yang hampir tepat, nilai pendugaan parameter  $\phi$  pada perlakuan A memiliki nilai presisi yang lebih dibandingkan pada perlakuan B. Namun, untuk nilai pendugaan pada parameter  $\delta$  memiliki nilai presisi yang terendah pada kedua perlakuan disebabkan nilai deviasi yang lebih tinggi. Parameter – parameter ini mewakili pengaruh dari kuantitas bola, rasio diameter bola, kecepatan rotasi bola, rasio massa terhadap tepung, dan volume efektif ruang penggilingan untuk mekanisme pemecahan partikel.



**Gambar 1.** Pengukuran nilai dan model simulasi dari kumulatif distribusi ukuran selama penggilingan A, pada gambar bagian atas menunjukkan rentang grafik pada ukuran  $10^{-1}$  sampai  $10^2$  mikron yang lebih jelas



**Gambar 2.** Pengukuran nilai dan model simulasi dari kumulatif distribusi ukuran selama penggilingan B, pada gambar bagian atas menunjukan rentang grafik pada ukuran  $10^{-1}$  sampai  $10^2$  mikron yang lebih jelas

**Tabel 1.** Pendugaan nilai parameter pada perlakuan A

Parameter	Nilai pendugaan	Interval Kepercayaan ( $\times 10^7$ )	
$\alpha$	1,1	-0,0104	0,0104
$\alpha$	1,9	0,0000	0,0000
$\delta$	1000	-1,1074	1,1075
$\gamma$	0,5	0,0000	0,0000
$\phi$	0,6	-0,0057	0,0057

**Tabel 2.** Pendugaan nilai parameter pada perlakuan B

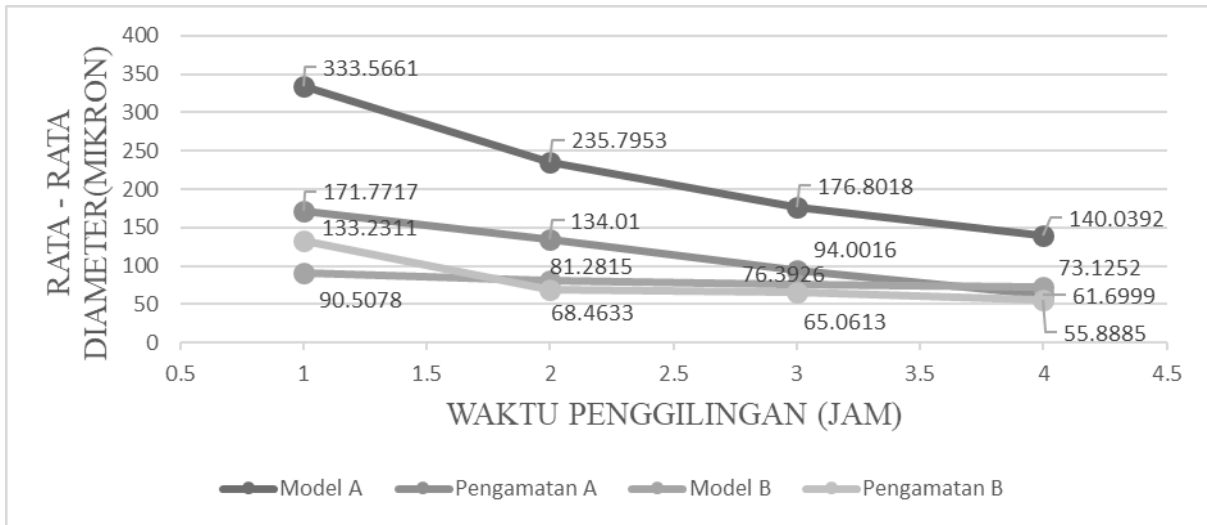
Parameter	Nilai pendugaan	Interval Kepercayaan ( $\times 10^7$ )	
$\alpha$	8,8	-0,0512	0,0512
$\alpha$	6,4	0,0000	0,0000
$\delta$	1000	-4,7106	4,7108
$\gamma$	0,6	0,0000	0,0000
$\phi$	8,8	-0,0512	0,0512

Perbedaan persentase kesalahan perlakuan A pada 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam penggilingan adalah 94,19%, 75,95%, 88,08%, 126,96%. Pada perlakuan B persentase kesalahan pada 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam penggilingan adalah 32,06%, 18,72%, 17,41%, 30,84%. Pada perlakuan A terlihat nilai kesalahan sangat besar pada 75% hingga 126%, sedangkan pada perlakuan B nilai kesalahan relatif kecil yaitu pada 17,41% hingga 32,06%. Hal ini disebabkan data yang digunakan

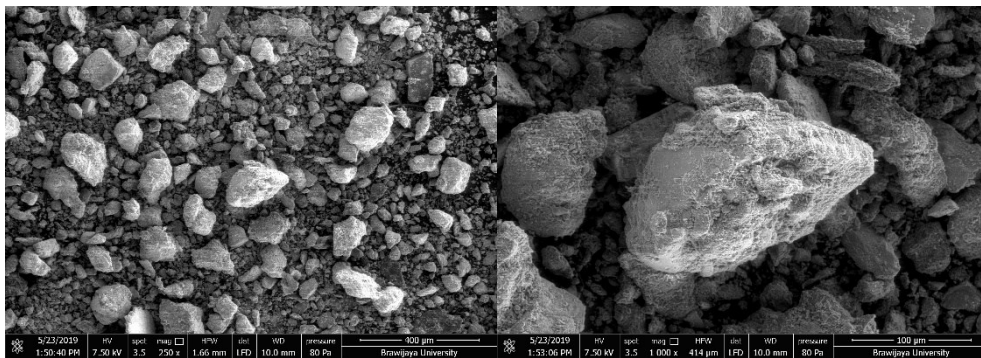
merupakan rata – rata distribusi ukuran partikel yang didapatkan dengan pengamatan melalui *distribution particle size analyzer* Cilas 1090 dengan prinsip kerja difraksi cahaya laser. Hal ini menambah tingkat kesalahan bahwa pemancaran laser hanya melalui sumbu y sehingga tidak dapat menggambarkan secara nyata bentuk dari kedua sumbu x dan y (Wang, 2019). Hal ini menyebabkan semakin tidak beraturan bentuk dari partikel yang diamati akan meningkatkan

kemungkinan kesalahan yang dihasilkan pengukuran dengan menggunakan prinsip difraksi cahaya laser (Varga, *et al.*, 2019).

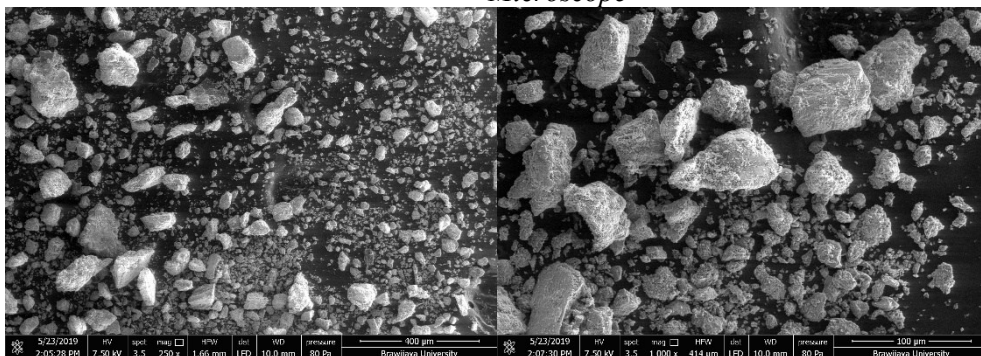
Diameter rata – rata dari data pengukuran dibandingkan dengan hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Simulasi model dan hasil pengamatan rata – rata diameter



Gambar 4. Bentuk partikel perlakuan A diamati menggunakan Scanning Electron Microscope



Gambar 5. Bentuk partikel perlakuan B diamati menggunakan Scanning Electron Microscope

Untuk membuktikan bentuk dari partikel yang tidak beraturan dilakukan analisis menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 untuk

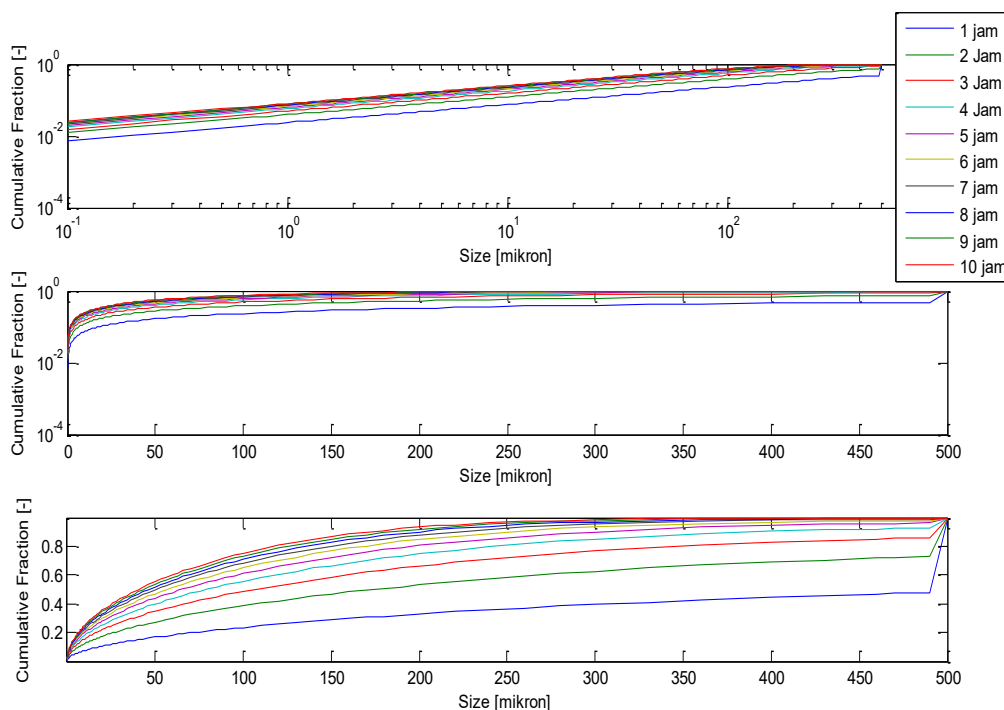
perlakuan A dan Gambar 5 untuk perlakuan B. Terlihat bahwa bentuk partikel yang lebih seragam pada perlakuan B menyebabkan hasil perhitungan model lebih mendekati hasil pengamatan

dibandingkan pada perlakuan A. Semua estimasi parameter yang didapat dan digunakan untuk simulasi *ball mill* adalah yang terdekat dengan diameter partikel rata – rata dari data hasil kedua perlakuan, sehingga model dapat digunakan untuk simulasi lebih lanjut.

Dengan menggunakan parameter yang ada, dapat disimulasikan proses penggilingan untuk beberapa jam ke depan. Dari hasil simulasi pada Gambar 3 dapat dilihat semakin lama proses penggilingan semakin sedikit jumlah partikel dengan diameter besar. Hal ini dikarenakan terjadinya tumbukan antara bola penggiling dengan bahan yang digunakan, semakin lama proses penepungan maka semakin banyak bahan yang terpecah menjadi partikel kecil dan semakin sedikit partikel dengan diameter besar yang tersisa. Dengan begitu maka hasil permodelan untuk penggilingan selama 10 jam ditampilkan pada Gambar 6 dan 7, sehingga terlihat bahwa dari perlakuan A menunjukkan

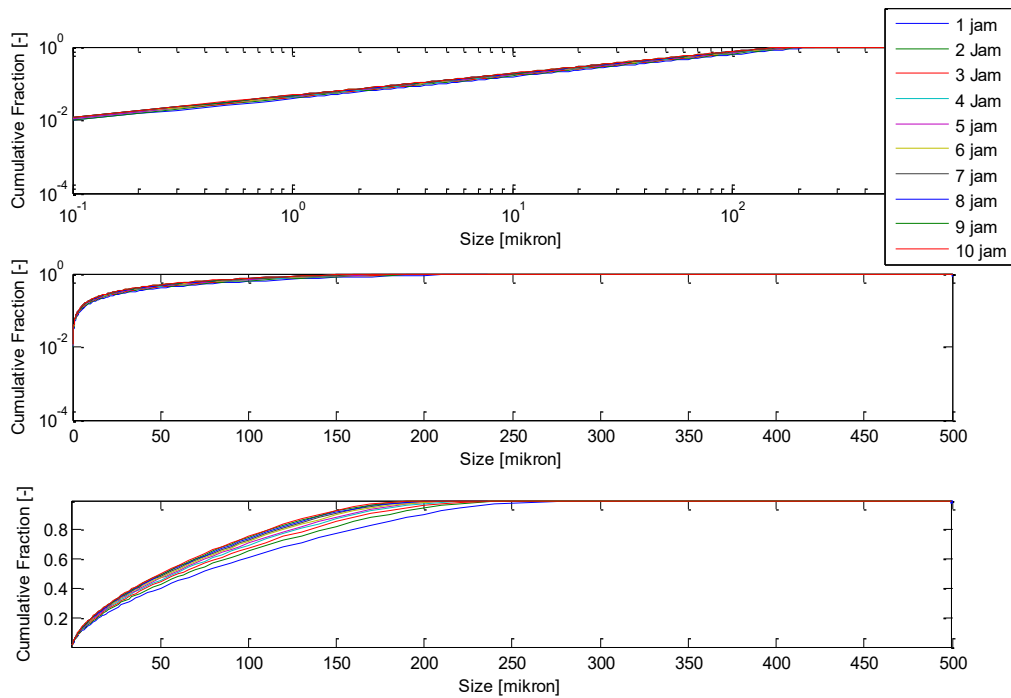
bahwa tidak ada perubahan ukuran partikel yang signifikan pada lama waktu penggilingan 8 hingga 10 jam. Sedangkan pada perlakuan B ukuran partikel tidak berubah secara signifikan sejak lama penggilingan 7 jam hingga 10 jam.

Dari permodelan dengan lama waktu penggilingan 10 jam terlihat bahwa perlakuan B memerlukan waktu yang lebih singkat untuk mendapatkan ukuran partikel kecil dibandingkan dengan perlakuan A. Hal ini disebabkan pada perlakuan B menggunakan kombinasi bola dengan diameter lebih besar yang dapat memecah bahan pada awal penggilingan lebih cepat dan jumlah bola berdiameter kecil yang lebih banyak untuk mempercepat terbentuknya partikel dengan ukuran kecil dibandingkan pada perlakuan A yang menggunakan kombinasi diameter bola lebih kecil. Sehingga jumlah bola berdiameter kecil lebih sedikit dibandingkan dengan perlakuan B.



**Gambar 6.** Simulasi penggilingan selama 10 jam dari perlakuan A





Gambar 7. Simulasi penggilingan selama 10 jam dari perlakuan B

### KESIMPULAN

Pendugaan parameter pemecahan dapat dilakukan dengan menggunakan model *back-calculation algorithm* dan menggambarkan mekanisme dari proses pemecahan cangkang rajungan dengan estimasi parameter secara berurutan  $\alpha$ ;  $\alpha$ ;  $\delta$ ;  $\gamma$ ;  $\phi = 1,1$ ;  $1,9$ ;  $1000$ ;  $0,5$ ;  $0,6$  pada perlakuan A, dan  $\alpha$ ;  $\delta$ ;  $\gamma$ ;  $\phi$  adalah  $8,8$ ;  $6,4$ ;  $1000$ ;  $0,6$ ;  $8,8$  pada perlakuan B. Perbedaan antara hasil model matematika dengan pengamatan langsung dipengaruhi bentuk partikel yang tidak beraturan. Keseragaman ukuran partikel pada perlakuan B menyebabkan model lebih sesuai. Hasil simulasi pendugaan pengecilan ukuran partikel menunjukkan bahwa perlakuan B memerlukan waktu yang lebih singkat untuk mendapatkan ukuran partikel kecil dibandingkan dengan perlakuan A.

### DAFTAR REFERENSI

Das, P. K. (2001). Use of cumulative size distribution to back-calculate the breakage parameters in batch

grinding. *Computers & Chemical Engineering*, 1235-1239.

Hosten, C. (2005). An alternative solution to the grinding equation in cumulative size distribution form. *Minerals Engineering*, 489-493.

Kusumawati. (2014). *Evaluasi Nilai Nutrisi Limbah Rajungan dan Kajian Potensi Sebagai Pakan Unggas*. Mataram: Fakultas Peternakan Universitas Mataram.

M B Hermanto, S. B. (2019). Parameter estimation for porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) chips milling by using a batch type of ball mills. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.

Multazam. (2002). *Prospek pemanfaatan cangkang rajungan (Portunus sp.) sebagai suplemen pakan ikan*. Bogor: Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Institut Pertanian Bogor.

Naoya Kotake, M. K. (2011). Influence of dry and wet grinding conditions on fineness and shape of particle size distribution of product in a ball mill.

- Advanced Powder Technology*, 86-92.
- Nurdiana, F. (2010). *Simulasi dengan Metode Monte Carlo untuk Proses Pembuatan Nano Material Menggunakan Ball Mill*. Depok: Fakultas MIPA Universitas Indonesia.
- Perikanan, K. K. (2017). *Statistika Ekspor Hasil Perikanan Indonesia*. Jakarta: Departemen Kelautan dan Perikanan.
- Purnamasari D.K, K. W. (2015). Potensi Limbah Rajungan (*Portunus pelagicus*) sebagai Pakan Itik Petelur. *Jurnal Peternakan Sriwijaya*, 11-19.
- Ulfyana, D. A. (2018). Bioceramics synthesis of hydroxyapatite from red snapper fish scales biowaste using wet chemical precipitation route. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Varga, G. G. (2019). On the reliability and comparability of laser diffraction grain size measurements of paleosols in loess records. *Sedimentary Geology*, 42-53.
- Vladimir Monov, B. S. (2012). Grinding in Ball Mills: Modeling and Process Control. *Cybernetics and Information Technologies*, 51-68.
- Wang, Q. (2019). The diffraction of Gaussian laser beam for slit. *International Journal for Light and Electron Optics*, 579-581.
- Wibisono, Y. D. (2018). Synthesis and Sinterability of Hydroxyapatite from Fishery by-product. *Journal of Korean Ceramic Society*, 570-575.
- Wibisono, Y. Y. (2020). Hybridation of nitrogen compounds and hydroxyapatite: a slowly released fertiliser for water sustainability. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Yan. Mo, X. D. (2019). Effect of ball milling treatment on the microstructures and properties cr2alc powders and hot pressed bulk ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 5140-5148.