

STUDI PENGARUH PENGGIJILAN KONDISI KERING DAN BASAH TERHADAP KINETIKA DAN KARAKTERISTIK DISTRIBUSI UKURAN BUTIR BIJIH SULFIDA KOMPLEKS GALENA SFALERIT – UJI PENDAHULUAN

Study of the Effects of Dry and Wet Grinding Conditions on the Kinetics and Particle Size Distribution Characteristics of Galena-Sphalerite Complex Sulphide Ore – Preliminary Test

INDAH PRATIWI^{1,2*} dan EDY SANWANI^{1**}

¹ Program Studi Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Perminyakan dan Pertambangan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132

² Pusat Riset Sumber Daya Geologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional
Gedung BJ Habibie, Jl. M.H. Thamrin Nomor 8, Jakarta Pusat – Indonesia 10340

Korespondensi email: dualima_april@yahoo.co.id

* Kontributor Utama ** Kontributor Anggota

ABSTRAK

Penggiliran umumnya dilakukan dalam kondisi basah, namun isu mengenai konservasi air dan biaya pengolahan air yang tinggi mendorong pengaplikasian penggiliran dalam kondisi kering. Keduanya menghasilkan produk dengan karakteristik tertentu yang mempengaruhi keberhasilan proses selanjutnya. Penggiliran bijih berukuran P₁₀₀ 6 mesh (3,36 mm) dilakukan menggunakan media *steel ball* dengan variasi kondisi penggiliran kering dan basah dengan 33,33 % *solid* selama 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 menit. Analisis distribusi ukuran butir produk penggiliran didapat dari pengayakan basah dan partikel bijih hasil pengayakan berukuran -200 mesh (-75 μ m) dianalisis menggunakan *laser diffraction particle size analyzer*. Model persamaan kinetika Alyavdin digunakan untuk mempelajari perilaku kinetika penggiliran bijih sedangkan distribusi ukuran butir dan karakteristiknya yang terdiri dari indeks keseragaman, modulus ukuran dan *fractal dimension* dipelajari menggunakan model persamaan *logistic*, Rosin-Rammler (RR) dan Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS). Pengamatan *equivalent particle size* (EPS) dan *specific surface area* (SSA) dilakukan terhadap produk variasi kondisi penggiliran berukuran -200 mesh (-75 μ m). Penggiliran dalam kondisi kering lebih efektif dalam mereduksi ukuran bijih sulfida kompleks galena-sfalerit, ditunjukkan oleh laju penggiliran tinggi dengan nilai K tertinggi sebesar 0,135/menit, % berat kumulatif lolos tinggi, modulus ukuran rendah, indeks keseragaman tinggi, partikel halus tinggi dan nilai SSA tinggi dibanding penggiliran dalam kondisi basah. Model kinetika penggiliran Alyavdin dapat menggambarkan perilaku kinetika penggiliran bijih sulfida kompleks galena sfalerit, sedangkan distribusi ukuran butir produk kedua kondisi penggiliran mengikuti model persamaan *logistic*.

Kata kunci: penggiliran kondisi kering dan basah, kinetika penggiliran, distribusi ukuran butir.

ABSTRACT

Grinding is generally carried out in wet conditions, but issues regarding water conservation and high-water treatment costs encourage the application of grinding in dry conditions. Both produce products with certain

characteristics that affect the success of the next process. Grinding of P100 6 mesh (3.36 mm) ore was performed using steel ball media with dry and wet grinding with 33.33% solids for 5, 10, 15, 20, 25, and 30 minutes. Particle size distribution of the grinding product was obtained from the wet sieving process and the -200 mesh ($-75\mu\text{m}$) ore particles were analyzed using a laser diffraction particle size analyzer. The Alyavdin grinding kinetics equation model was used to study the kinetics of ore grinding behavior and the particle size distribution and its characteristics consisting of uniformity index, size modulus and fractal dimension were studied using the logistic, Rosin-Rammler (RR) and Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS) equation model. Equivalent particle size (EPS) and specific surface area (SSA) observations were carried out on the -200 mesh ($-75\mu\text{m}$) grinding product. Grinding in dry condition is more effective in reducing the size of complex galena-sphalerite sulphide ore, indicated by high grinding rate with the highest K value of 0,135/minute, high cumulative % undersize, low size modulus, high uniformity index, high fine particle and high SSA compared to wet grinding. Alyavdin's kinetics model can describe the grinding kinetics of galena sphalerite complex sulfide ore, while the particle size distribution follows the logistic equation model.

Keywords: dry and wet grinding, grinding kinetics, particle size distribution.

PENDAHULUAN

Mineral utama penghasil logam timbal dan seng adalah galena (PbS) dan sfalerit (ZnS). Keduanya berasosiasi bersama-sama dengan mineral berharga seperti perak, tembaga dan terkadang emas serta mineral-mineral pengotor. Sumber daya logam timbal dan seng dunia berturut-turut adalah sebesar 2 miliar ton dan 1,9 miliar ton (USGS, 2022). Logam seng (Zn) dan timbal (Pb) merupakan logam dasar yang pemanfaatannya cukup besar, menempati urutan tiga dan empat besar di dunia. Menurut International Lead and Zinc Study Group, sebesar 86% logam timbal (Pb) dunia digunakan sebagai bahan baku pembuatan baterai asam timbal dan 50% logam seng (Zn) digunakan dalam industri besi dan baja sebagai bahan pelapis anti korosi.

Di Indonesia, timbal dan seng merupakan kelompok logam dasar (Badan Standardisasi Nasional, 1998) yang termasuk ke dalam kelompok bahan baku industri strategis dalam negeri (Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral, 2012). Berdasarkan laporan dari USGS dan ILZSG tahun 2020 yang telah diolah, Indonesia memenuhi 3% cadangan logam timbal dan 1% cadangan logam seng dunia (Yasin dkk., 2021). Indonesia juga merupakan negara ketiga terbesar di dunia yang memproduksi bijih timbal setelah China dan Australia. Dalam rangka pemenuhan kebutuhan kedua logam yang termasuk ke dalam bahan baku strategis dengan tingkat pemanfaatan yang sangat tinggi, penelitian dan pengembangan proses pengolahan untuk mendapatkan logam timbal dan seng sangat penting untuk dilakukan.

Peningkatan nilai ekonomi suatu mineral dilakukan melalui proses peningkatan kadar atau disebut sebagai proses konsentrasi, dimana mineral berharga dipisahkan dari mineral tidak berharga yang keberhasilannya sangat ditentukan oleh tingkat liberasi, ukuran partikel, serta karakteristik partikel mineral produk penggilingan (Chelgani dkk., 2019; Zhang dkk., 2020).

Penggilingan menjadi salah satu subjek penelitian yang banyak dilakukan. Penggilingan merupakan tahap dalam proses pengecilan ukuran (kominusi) yang memanfaatkan gabungan antara gaya tumbukan dan gaya gerus antara media penggilingan dan material penggilingan, baik dalam kondisi kering maupun basah (Wills dan Napier-Munn, 2006). Di pabrik pengolahan, penggilingan menggunakan *ball mill* banyak dipilih karena tingginya efisiensi dan kemampuannya dalam mengecilkan ukuran. Namun dibalik keunggulannya, penggilingan menggunakan *ball mill* sangat banyak mengkonsumsi energi (Wills dan Napier-Munn, 2006). Semakin halus ukuran partikel yang diinginkan, semakin lama proses penggilingan berjalan, semakin besar konsumsi energi yang digunakan serta biaya yang dikeluarkan.

Penggilingan umumnya berlangsung dalam kondisi basah (*wet grinding*). Penggilingan dalam kondisi kering (*dry grinding*) biasanya hanya dilakukan untuk industri tertentu yang mengharuskan material diproses secara kering (Jankovic dkk., 2015), misalnya industri semen. Namun berbagai isu mengenai kelangkaan air, perlindungan lingkungan (konservasi sumber daya air) dan tingginya biaya pengolahan air

menjadi suatu tantangan besar bagi industri pertambangan dan pengolahan mineral, terutama yang terletak di negara beriklim kering dan gersang (Chelgani *dkk.*, 2019). Penggilingan kering juga menjadi pilihan karena beberapa material dapat berubah sifat fisik dan kimianya apabila digerus bersama dengan air. Korosi akan terjadi apabila media berbahan besi kontak dengan air (*wet grinding*) atau kontak dengan mineral yang memiliki sifat elektrokimia aktif seperti mineral sulfida (Tanhua *dkk.*, 2022). Penggilingan kering dapat mengurangi efek korosi yang disebabkan oleh adanya air, yang berdampak pada berkurangnya tingkat penggantian dan konsumsi media penggilingan.

Hal-hal tersebut mendorong banyaknya riset mengenai optimalisasi metode penggilingan untuk menghasilkan teknologi dan strategi penghematan energi. Penelitian ini akan mengamati pengaruh kondisi penggilingan kering (*dry grinding*) dan basah (*wet grinding*) terhadap kinetika penggilingan dan karakteristik distribusi ukuran butir partikel bijih sulfida kompleks galena-sfalerit.

METODE

Sampel bijih sulfida kompleks galena-sfalerit yang berasal dari Kabupaten Bogor berukuran 15-25cm dikecilkan ukurannya menggunakan *jaw crusher* dan *double roll crusher* hingga mencapai P_{100} 6 mesh (3,36mm). Sebagian kecil sampel digerus menggunakan mortar agate hingga mencapai P_{100} 200 mesh (75 μ m) untuk dikarakterisasi komposisi kimianya menggunakan XRF yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Analisis XRF menunjukkan kadar unsur-unsur penyusun sampel bijih berupa senyawa oksida yang terkandung dalam sampel bijih. Berdasarkan analisis tersebut, sampel bijih mengandung mineral berharga yaitu 7,5% senyawa ZnO, 2,5% senyawa PbO dan penyusun terbesar yaitu mineral pengotor berupa senyawa SiO₂ sebesar 52,5%.

Percobaan penggilingan dilakukan menggunakan media *steel ball* dengan spesifikasi dan kondisi operasi seperti pada Tabel 2. dalam kondisi kering dan basah dengan % solid sebesar 33,33%.

Tabel 1. Komposisi kimia bijih sulfida kompleks galena-sfalerit

No.	Oksida	Kadar (%)
1	Al ₂ O ₃	4,9
2	CaO	1,1
3	CdO	0,1
4	CuO	0,3
5	Fe ₂ O ₃	9,6
6	K ₂ O	0,5
7	MgO	2,5
8	MnO	0,9
9	P ₂ O ₅	1,1
10	PbO	2,5
11	SiO ₂	52,6
12	SO ₃	16,1
13	Ta ₂ O ₅	0,1
14	TiO ₂	0,1
15	ZnO	7,5
Total Oksida		99,9

Tabel 2. Spesifikasi dan kondisi operasi alat penggilingan

<i>Grinding jar</i>	Diameter, cm	19,33
	Panjang, cm	20,01
	Volume, cm ³	5868,97
	Kecepatan operasi, N (rpm)	100,58
	Kecepatan kritis, N _c 80% (rpm)	80,5
<i>Grinding ball</i>	Diameter, mm	17, 18, 19, 30
	Jumlah	29, 56, 20, 31
	Berat, gr	584; 1332,2; 561,1; 3391,1
	Berat total, gr	5868,9
	Massa Jenis, gr/cm ³	7,38
	Berat bijih, gr	586,9
Mill Charge, %		38,05
Rasio bijih : grinding media		1:10

Distribusi ukuran butir produk penggilingan didapatkan dari pengayakan basah dan partikel bijih hasil pengayakan berukuran -200 mesh (-75 μ m) dianalisis menggunakan *laser diffraction particle size analyzer*. Selanjutnya kedua data distribusi ukuran tersebut digabungkan menjadi 1 (satu). Karena terdapat perbedaan metode pengukuran, data distribusi ukuran butir hasil pengukuran dengan *laser diffraction particle size analyzer* harus dikonversi terlebih dahulu. Nilai konversi perubahan metode pengukuran dari pengayakan menggunakan ayakan ke pengukuran menggunakan *laser diffraction particle size analyzer* adalah sebesar 1,5 (Wills dan Napier-Munn, 2006). Distribusi ukuran bijih produk penggilingan kondisi kering dan

basah tiap variasi waktu yang telah digabungkan berturut-turut ditunjukkan oleh Gambar 1 dan 2.

Perilaku kinetika penggilingan sampel bijih digambarkan oleh model persamaan kinetika Alyavdin seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan 1.

$$R = R_0 e^{-Kt^M} \quad (1)$$

Dimana R adalah % berat kumulatif tertahan saringan ukuran x, R_0 % berat kumulatif tertahan saringan ukuran x pada waktu 0 menit, K adalah konstanta laju penggilingan (*grinding rate*) dan M adalah konstanta waktu yang bergantung pada sifat bijih dan kondisi penggilingan (Harris, 1973).

Distribusi ukuran butir dan karakteristiknya yang terdiri dari indeks keseragaman, modulus ukuran dan *fractal dimension* dipelajari menggunakan model persamaan *logistic*, Rosin-Rammler (RR) dan Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS), yang berturut-turut dapat dilihat pada Persamaan (2), (3) dan (4) di bawah ini.

$$P = \frac{100}{1 + \left(\frac{x_{50}}{x}\right)^\Lambda} \quad (2)$$

$$P = 100 - 100 \cdot \exp \left[- \left(\frac{x}{x'} \right)^n \right] \quad (3)$$

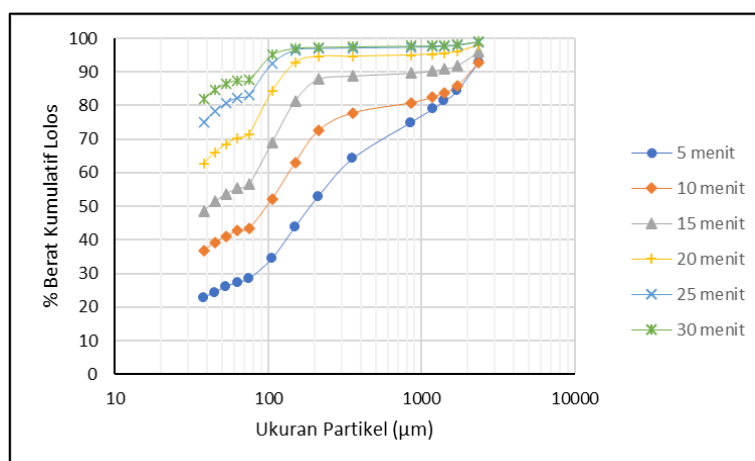
$$P = 100 \left(\frac{x}{k} \right)^m \quad (4)$$

Dimana P adalah % berat kumulatif lolos, x adalah fraksi ukuran ayakan, x_{50} (ukuran partikel lolos 50%), x' (ukuran partikel lolos 63,2%) dan k merupakan modulus ukuran, serta Λ , n dan m adalah indeks keseragaman distribusi ukuran butir dari tiap model persamaan distribusi ukuran butir. Pengamatan *equivalent particle size* (EPS) dan *specific surface area* (SSA) dilakukan terhadap produk variasi kondisi penggilingan berukuran -200 mesh ($-75\mu\text{m}$) yang merupakan hasil pengukuran dari *laser diffraction particle size analyzer*.

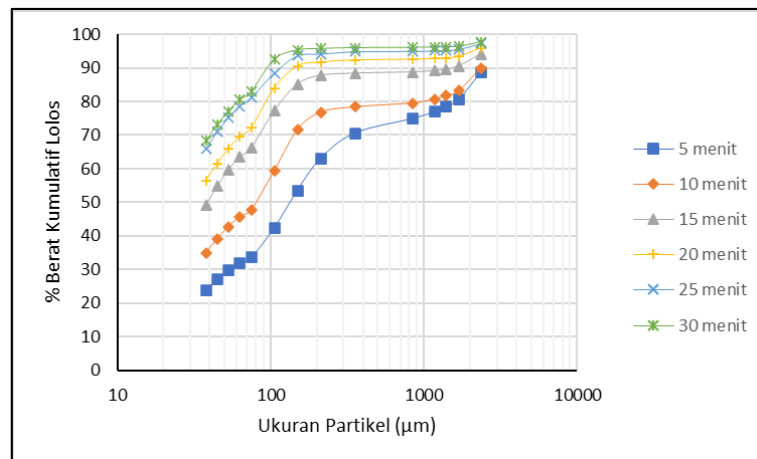
Model Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS) setara dengan nilai distribusi *fractal* (Turcotte, 1986). Konstanta yang didapat dari model GGS dapat digunakan untuk menghitung *fractal dimension* dengan menggunakan Persamaan (5) berikut.

$$D = 3 - m \quad (5)$$

Semakin tinggi nilai *fractal dimension*, semakin sulit suatu partikel dihaluskan. Pada tahap awal penggilingan, pemecahan (*breakage*) partikel utamanya disebabkan oleh peningkatan retakan struktur bijih oleh tekanan dari luar berupa gaya tumbukan (*collision*), ekstrusi dan gaya geser (*shear action*). Karena itu, pengecilan ukuran di tahap awal penggilingan didominasi oleh kominusi volume bijih.



Gambar 1. Distribusi ukuran butir produk penggilingan kering pada waktu 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 menit.



Gambar 2. Distribusi ukuran butir produk penggilingan basah pada waktu 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 menit.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Penggilingan Kondisi Kering dan Basah terhadap Distribusi Ukuran Butir Produk Penggilingan

Berdasarkan Gambar 3, dapat dilihat bahwa ukuran partikel bijih sulfida kompleks galena-sfalerit semakin berkurang seiring dengan meningkatnya waktu penggilingan, terlihat dari kenaikan % berat kumulatif lolos dari tiap kurva waktu penggilingan. Di menit 5, 10, dan 15 menit, penggilingan kondisi kering menghasilkan produk partikel kasar lebih tinggi dan produk partikel halus lebih rendah dibandingkan produk penggilingan kondisi basah. Namun setelah penggilingan selama 20 menit, jumlah produk partikel halus penggilingan kondisi kering mulai meningkat, hingga pada penggilingan selama 25 dan 30 menit kurva distribusi ukuran butir produk penggilingan kondisi kering seluruhnya berada di atas kurva distribusi ukuran butir produk penggilingan kondisi basah.

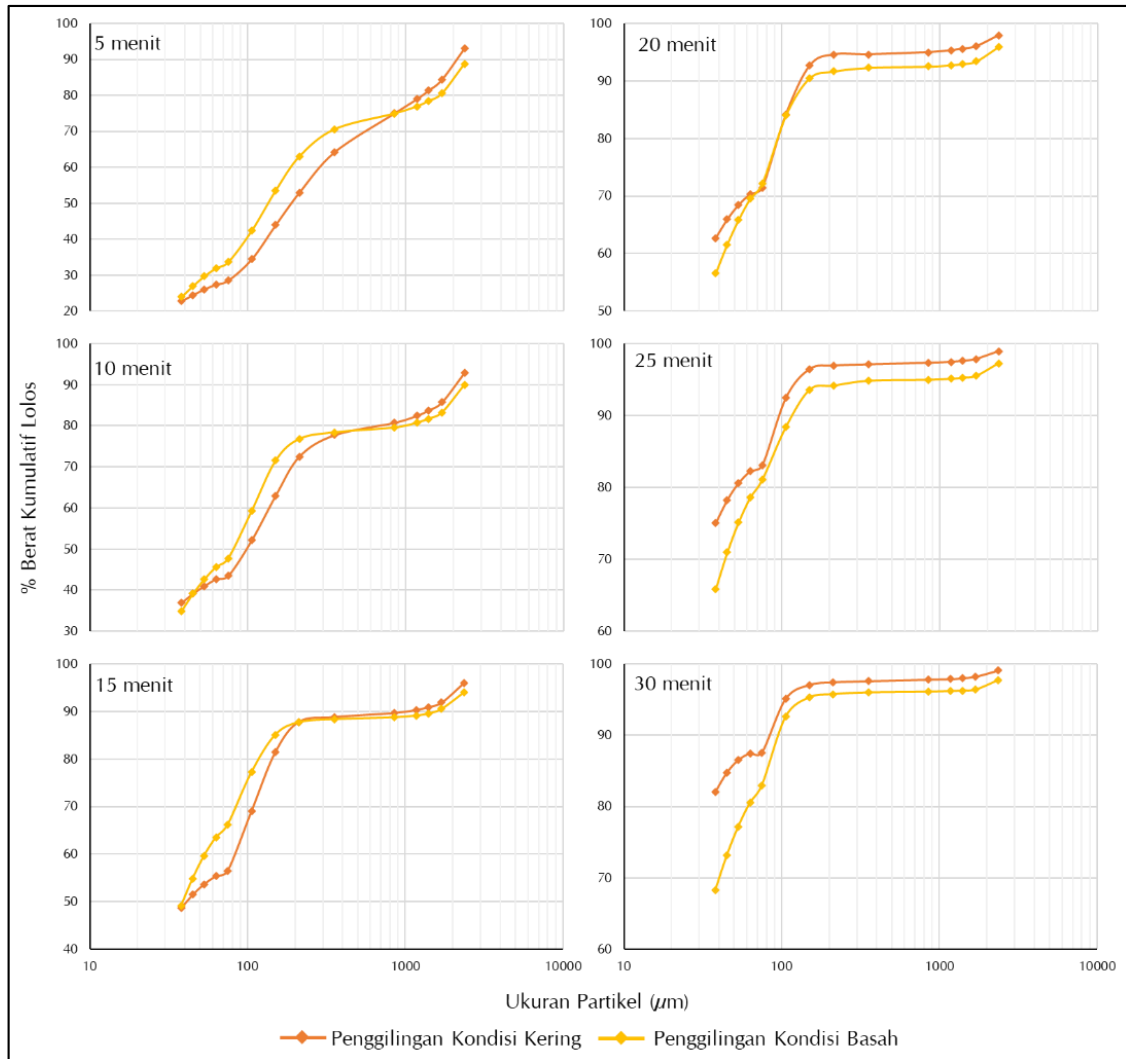
Penggilingan kering menghasilkan % berat kumulatif lolos lebih tinggi dibandingkan penggilingan basah, namun perbedaannya tidak terlalu signifikan. Setelah penggilingan selama 30 menit, penggilingan kering mampu menghasilkan produk dengan nilai % berat kumulatif lolos 8 mesh ($2360\mu\text{m}$) tertinggi, yaitu sebesar 99,06%, sedangkan penggilingan basah sebesar 97,72%. Begitu pula untuk nilai % berat kumulatif lolos 200 mesh ($75\mu\text{m}$),

setelah penggilingan selama 30 menit, penggilingan kering menghasilkan produk dengan nilai % berat kumulatif lolos 200 mesh ($75\mu\text{m}$) sebesar 87,56%, sedangkan penggilingan basah sebesar 82,99%.

Hal ini sesuai dengan penjelasan mengenai pengaruh kondisi penggilingan kering dan basah terhadap kinetika penggilingan bijih sulfida kompleks galena sfalerit, dimana penggilingan basah memiliki tingkat penggilingan yang lebih rendah dibandingkan penggilingan kering sehingga mempengaruhi distribusi ukuran butir produk yang dihasilkan. Hal ini disebabkan karena partikel halus hasil penggilingan basah melapisi permukaan partikel yang lebih besar, menyebabkan terjadinya efek bantalan dan menghambat proses pemecahan, keberadaan partikel halus juga meningkatkan viskositas *pulp*, sehingga pergerakan media dan bijih dalam *mill* terhambat (Bu dkk., 2019).

Pengaruh Penggilingan Kondisi Kering dan Basah terhadap *Equivalent Particle Size* (EPS) dan *Specific Surface Area* (SSA) Partikel Halus (-200 mesh)

Ukuran partikel ekuivalen atau *equivalent particle size* (EPS) dan *specific surface area* (SSA) bijih sulfida kompleks galena sfalerit produk variasi kondisi dan waktu penggilingan untuk partikel halus (-200 mesh) ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 3. Kurva distribusi ukuran butir produk penggilingan kondisi kering dan basah waktu 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 menit.

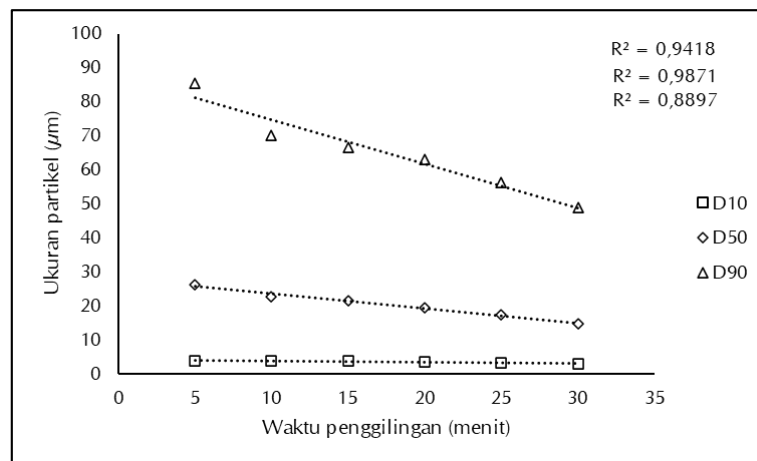
Tabel 3. *Equivalent particle size* (EPS) D₁₀, D₅₀, D₉₀ dan *specific surface area* (SSA) bijih sulfida kompleks galena-sfalerit tiap kondisi dan waktu penggilingan

Kondisi Penggilingan	Waktu Penggilingan	SSA (m ² /g)	EPS (μm)		
			D10	D50	D90
Penggilingan Kering	5	0,68	3,73	26,21	85,38
	10	0,71	3,77	22,73	69,99
	15	0,73	3,65	21,50	66,64
	20	0,78	3,44	19,36	63,14
	25	0,83	3,22	17,34	56,32
	30	0,93	2,89	14,70	48,90
Penggilingan Basah	5	0,43	7,08	40,01	89,17
	10	0,45	6,59	37,80	86,73
	15	0,47	6,31	36,75	84,56
	20	0,55	5,00	30,56	83,35
	25	0,57	4,90	27,90	77,60
	30	0,67	4,01	25,21	76,10

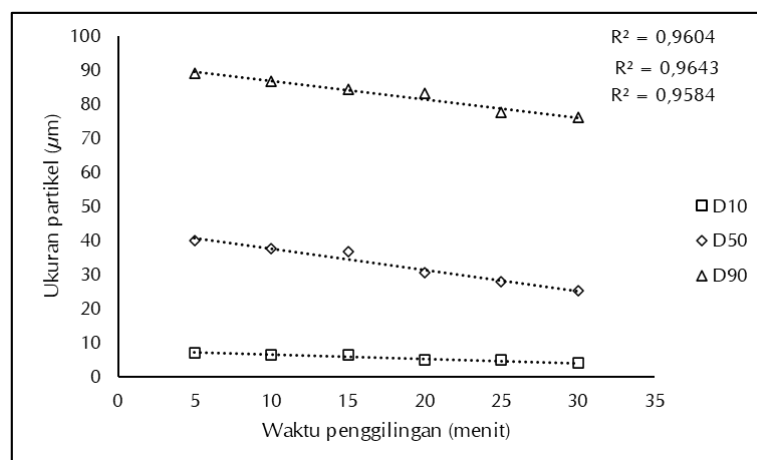
Dalam penelitian ini nilai EPS yang digunakan adalah D_{10} , D_{50} , dan D_{90} didapat dari perhitungan *software* pada alat *laser diffraction particle size analyzer* terhadap partikel bijih sulfida kompleks galena-sfalerit fraksi halus (-200 mesh). Berdasarkan data tersebut, produk dari tiap kondisi penggilingan memiliki nilai EPS yang menurun dan nilai SSA yang meningkat seiring dengan bertambahnya waktu penggilingan. Hal ini sesuai dengan penjelasan Petrakis dkk. (2019) yaitu seiring dengan meningkatnya waktu *grinding*, nilai EPS akan semakin menurun. Nilai EPS D_{10} , D_{50} , dan D_{90} produk dari penggilingan kering lebih rendah dibandingkan produk penggilingan basah, yang dikonfirmasi oleh nilai SSA, dimana penggilingan kering menghasilkan nilai SSA

lebih tinggi dibandingkan penggilingan basah yang dipengaruhi oleh jumlah partikel halus yang dihasilkan oleh tiap kondisi penggilingan, dimana semakin halus partikel yang dihasilkan, maka SSA akan semakin tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa penggilingan kering menghasilkan partikel yang lebih halus (-200 mesh) dibandingkan penggilingan basah.

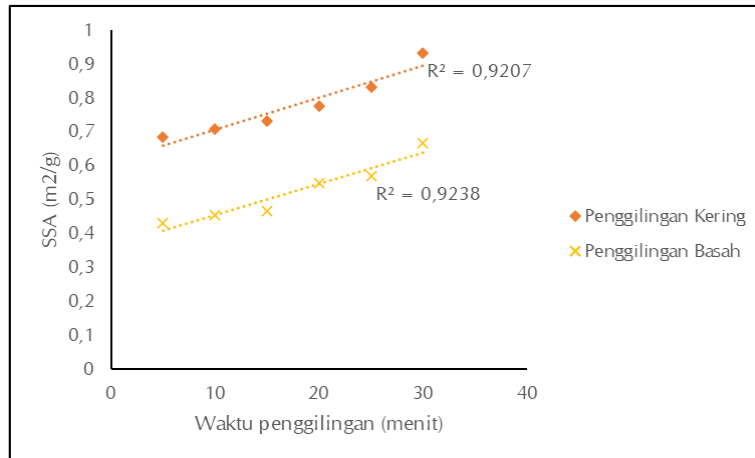
Gambar 4 dan 5 menunjukkan grafik hubungan antara EPS terhadap waktu penggilingan kering dan basah secara kuantitatif, sedangkan grafik hubungan antara SSA dan waktu penggilingan ditunjukkan oleh Gambar 6. Berdasarkan kurva, terlihat bahwa nilai R^2 yang tinggi menunjukkan EPS dan SSA proporsional terhadap waktu penggilingan.



Gambar 4. Grafik antara EPS terhadap waktu penggilingan fraksi halus (-200 mesh) Produk penggilingan kering



Gambar 5. Grafik antara EPS terhadap waktu penggilingan fraksi halus (-200 mesh) Produk penggilingan basah



Gambar 6. Grafik antara SSA terhadap waktu penggilingan fraksi halus (-200 mesh) Produk tiap kondisi penggilingan

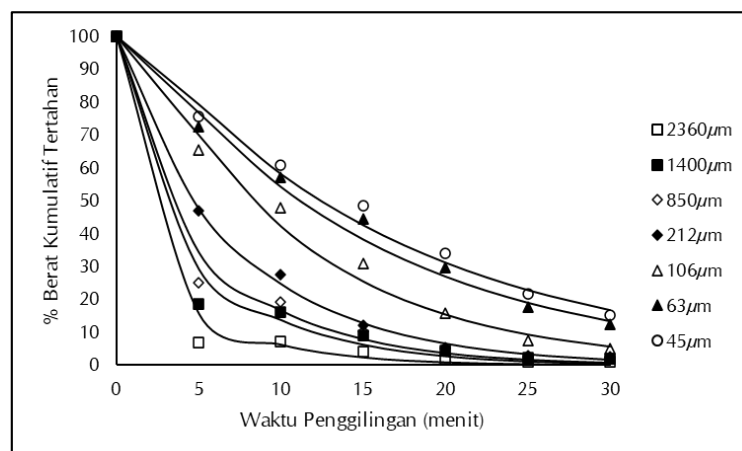
Kinetika Penggilingan

Dengan memplot nilai % berat kumulatif tertahan tiap fraksi ukuran terhadap waktu penggilingan, nilai konstanta K dan M dalam model persamaan Alyavdin dapat ditentukan.

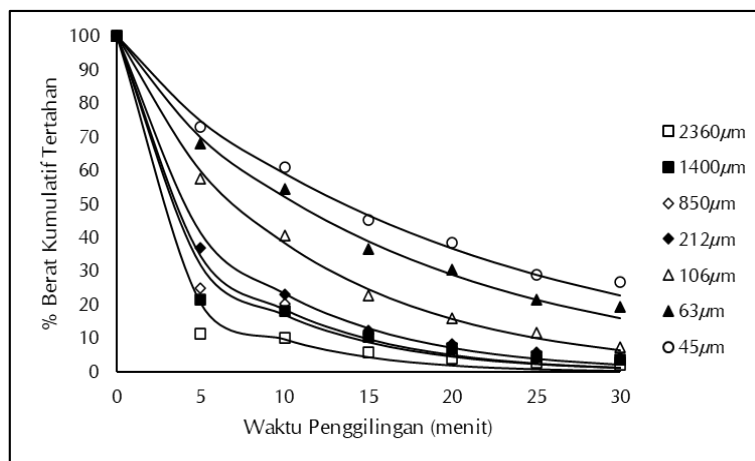
Konstanta K dan M masing-masing kondisi *penggilingan* dapat dilihat pada Tabel 4. Kurva *fitting* antara data percobaan dan model persamaan kinetika Alyavdin dari penggilingan kondisi kering dan basah berturut-turut ditunjukkan oleh Gambar 7 dan 8.

Tabel 4. Parameter kinetika penggilingan dalam kondisi kering dan basah

Penggilingan Kering							
Ukuran Partikel (μm)	2360	1400	850	212	106	63	45
K (/menit)	0,1350	0,1220	0,1230	0,1290	0,1030	0,0690	0,0620
M	1,10419	1,06893	1,05204	1,00232	0,99412	1,00187	1,00097
R ²	0,8201	0,8766	0,9172	0,9967	0,9796	0,9855	0,9848
Penggilingan Basah							
K (/menit)	0,1080	0,0990	0,1000	0,1010	0,0850	0,0560	0,0450
M	1,10735	1,08041	1,06875	1,04181	1,01339	1,01257	1,01341
R ²	0,7872	0,8441	0,8710	0,9410	0,9926	0,9885	0,9886



Gambar 7. Kurva *fitting* antara data percobaan dan persamaan kinetika alyavdin produk penggilingan kering



Gambar 8. Kurva *fitting* antara data percobaan dan persamaan kinetika alyavdin produk penggilingan basah

Dapat dilihat bahwa persamaan kinetika penggilingan Alyavdin cukup bisa menggambarkan tentang perilaku kinetika penggilingan bijih sulfida kompleks galena-sfalerit pada tiap kondisi penggilingan. Seiring dengan meningkatnya waktu penggilingan, *trend* mengalami penurunan yang lebih curam pada partikel berukuran besar dibandingkan partikel berukuran kecil. Hal ini menunjukkan bahwa efektifitas penggilingan lebih besar terjadi pada partikel kasar dibandingkan dengan partikel halus. Nilai K dari tiap kondisi penggilingan meningkat pada partikel berukuran lebih besar, kemudian menurun pada partikel berukuran lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa penggilingan lebih sulit dilakukan terhadap partikel berukuran halus.

Pengaruh Penggilingan Kondisi Kering dan Basah terhadap Kinetika Penggilingan

Pengaruh penggilingan kondisi kering dan basah terhadap kinetika penggilingan digambarkan oleh Gambar 9. Terlihat bahwa penggilingan kering memiliki tingkat laju penggilingan yang lebih tinggi dibandingkan penggilingan basah, hal ini menunjukkan bahwa penggilingan basah membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan penggilingan kering untuk mencapai produk dengan ukuran yang sama (Peltoniemi *dkk.*, 2020). Penggilingan kering mencapai nilai K tertinggi sebesar 0,135/menit, sedangkan penggilingan basah mencapai nilai K tertinggi sebesar 0,108/menit. Hal ini dapat disebabkan oleh meningkatnya kekentalan *slurry* bijih

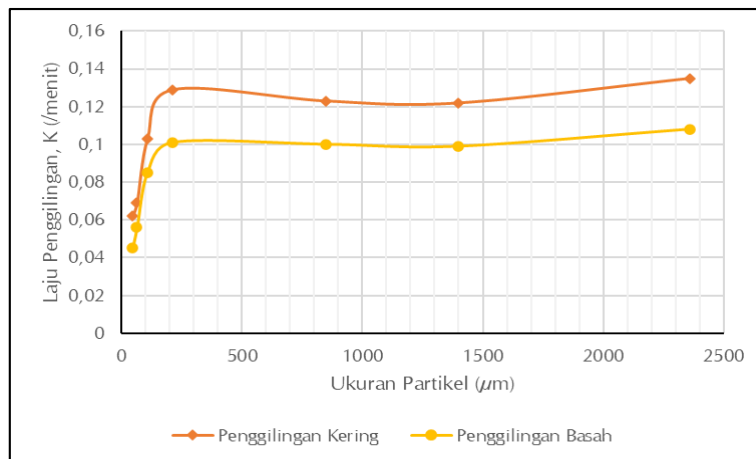
sulfida kompleks galena-sfalerit, akibat bertambahnya jumlah partikel halus yang dihasilkan seiring dengan peningkatan waktu penggilingan. Kekentalan *slurry* menghambat pergerakan media penggilingan dalam *mill*, menyebabkan penurunan kekuatan *impact* dan *attrition* media terhadap bijih.

Model Distribusi Ukuran Butir Bijih Sulfida Kompleks Galena-Sfalerit Produk Variasi Kondisi Penggilingan

Model distribusi ukuran butir bijih sulfida kompleks galena-sfalerit yang digunakan dalam penelitian ini adalah distribusi *logistic*, Rosin-Rammler (RR) dan Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS). Konstanta modulus ukuran dan indeks keseragaman tiap model persamaan distribusi ukuran butir dapat dilihat pada Tabel 5 dan 6, sedangkan *fitting* distribusi ukuran butir bijih sulfida kompleks galena-sfalerit hasil percobaan dengan model persamaan yang digunakan dapat dilihat berturut-turut pada Gambar 10 dan 11.

Berdasarkan *fitting* data percobaan dengan beberapa model persamaan distribusi ukuran butir yang telah dibahas sebelumnya, distribusi ukuran butir dari variasi kondisi penggilingan memiliki kecocokan cukup baik terhadap seluruh model persamaan dengan nilai R^2 sekitar 0,8 hingga 0,9. Dari grafik *fitting* distribusi ukuran butir antara data percobaan dan ketiga model persamaan serta nilai koefisien korelasi R^2 , distribusi ukuran butir bijih sulfida kompleks galena-sfalerit produk

penggilingan kering dan basah memiliki kecocokan paling tinggi dengan model persamaan *logistic*.



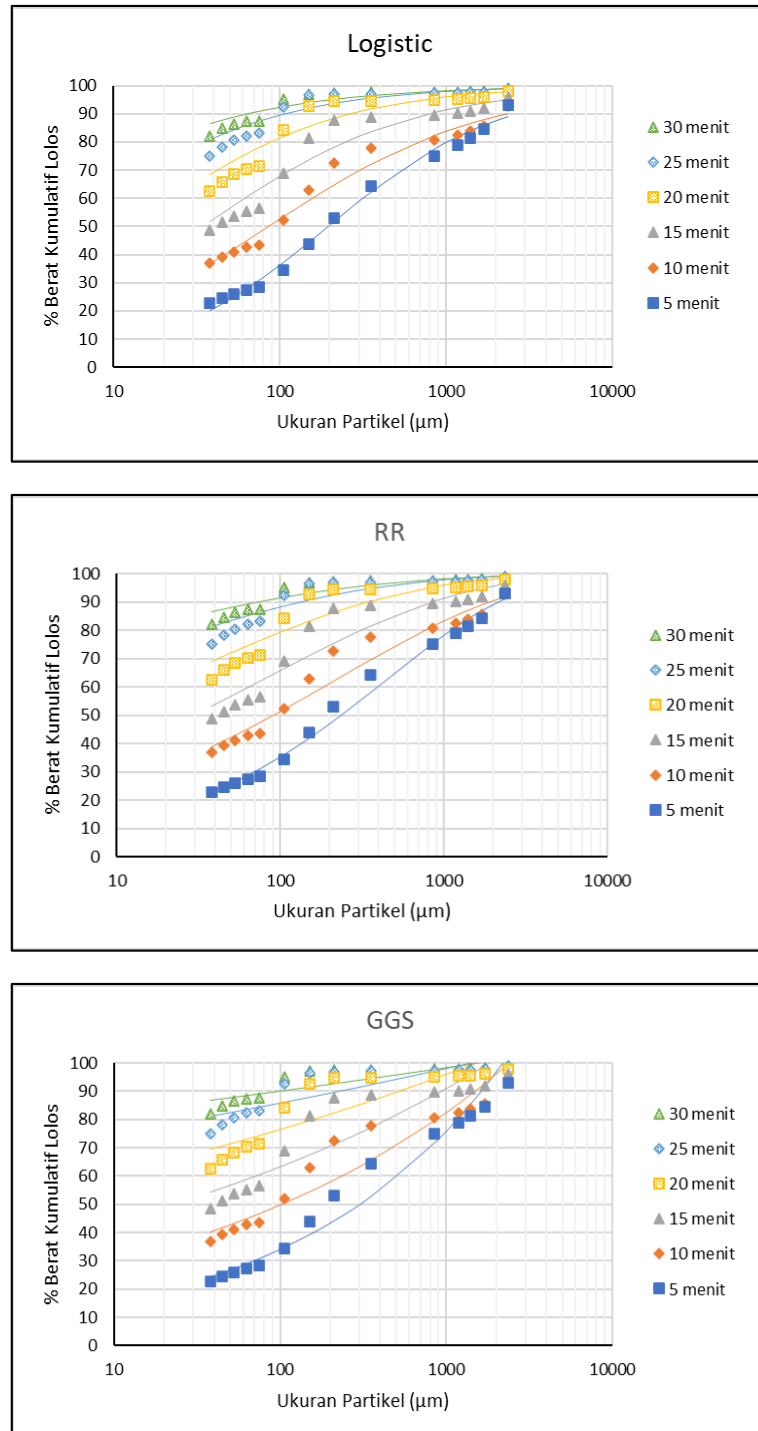
Gambar 9. Kurva laju penggilingan terhadap ukuran partikel penggilingan kondisi kering dan basah

Tabel 5. Parameter modulus ukuran dan indeks keseragaman produk penggilingan kering untuk model persamaan *logistic*, Rosin-Rammler (RR), dan Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS)

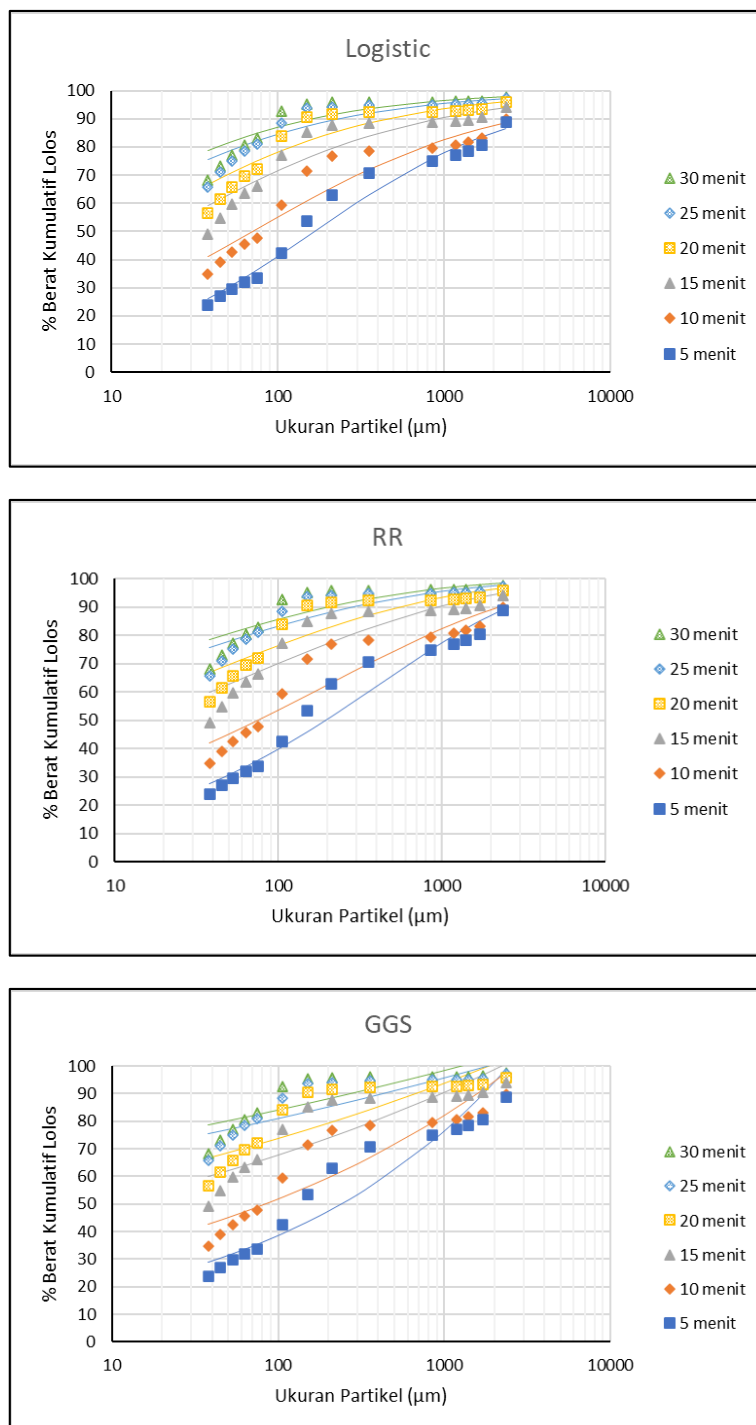
Model	Parameter	Waktu Penggilingan (menit)					
		5	10	15	20	25	30
<i>Logistic</i>	x_{50} (μm)	195,05	84,83	34,52	13,20	5,20	2,20
	Λ	0,8358	0,6675	0,7006	0,7264	0,7227	0,6502
	R^2	0,9792	0,9585	0,9129	0,8733	0,86	0,8582
RR	x' (μm)	462,39	229,46	82,36	22,43	5,02	1,34
	n	0,5467	0,3955	0,3553	0,3046	0,2532	0,2094
	R^2	0,9886	0,9505	0,8872	0,8392	0,8239	0,8244
GGS	k (μm)	2202,78	2410,97	1821,61	1514,13	1423,34	1579,19
	m	0,3493	0,219	0,1578	0,0988	0,0574	0,0383
	R^2	0,9668	0,9119	0,8262	0,7625	0,7291	0,7271

Tabel 6. Parameter modulus ukuran dan indeks keseragaman produk penggilingan basah untuk model persamaan *logistic*, Rosin-Rammler (RR), dan Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS)

Model	Parameter	Waktu Penggilingan (menit)					
		5	10	15	20	25	30
<i>Logistic</i>	x_{50} (μm)	165,64	69,79	19,46	11,95	5,69	4,50
	Λ	0,7022	0,5812	0,5659	0,6003	0,5948	0,6166
	R^2	0,9663	0,9052	0,8658	0,8433	0,8457	0,8014
RR	x' (μm)	426,480	210,379	52,709	26,580	9,135	6,306
	n	0,4662	0,3525	0,2878	0,2769	0,2428	0,2404
	R^2	0,9488	0,8781	0,8276	0,8042	0,8043	0,7605
GGS	k (μm)	2424,61	2655,90	2194,07	1844,31	1772,69	1281,03
	m	0,2995	0,1999	0,1263	0,1042	0,0732	0,0688
	R^2	0,908	0,8264	0,7522	0,7249	0,7067	0,6677



Gambar 10. Grafik *fitting* antara model distribusi ukuran butir *logistic*, Rosin-Rammler (RR), dan Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS) dan data percobaan produk penggilingan kering

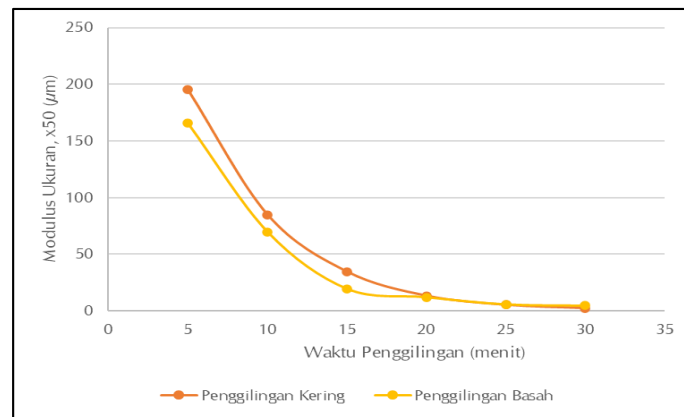


Gambar 11. Grafik *fitting* antara model distribusi ukuran butir *logistic*, Rosin-Rammler (RR), dan Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS) dan data percobaan produk penggilingan basah

Pengaruh Penggilingan Kondisi Kering dan Basah terhadap Modulus Ukuran Biji

Untuk mengamati pengaruh variasi kondisi penggilingan terhadap modulus ukuran,

dilakukan *plotting* antara nilai modulus ukuran x' dari persamaan *logistic*, yang menunjukkan nilai tengah atau median dari distribusi ukuran produk penggilingan terhadap waktu penggilingan yang dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik hubungan antara modulus ukuran x_{50} dari persamaan distribusi ukuran butir *logistic* dan waktu penggilingan tiap kondisi penggilingan

Berdasarkan Gambar 12 dapat dilihat bahwa semakin lama waktu penggilingan maka modulus ukuran dari produk yang dihasilkan akan semakin menurun. Di menit 5, 10, dan 15 menit, penurunan modulus ukuran terlihat tinggi, namun mulai menit 20, 25 dan 30, penurunan modulus ukuran tidak signifikan. Pada menit ke 5, 10, dan 15, penggilingan kering menghasilkan produk dengan modulus ukuran lebih tinggi dibanding penggilingan basah, namun setelah 20, 25, dan 30 menit, terjadi hal sebaliknya, dimana penggilingan basah menghasilkan produk dengan modulus ukuran sedikit lebih tinggi dari penggilingan kering.

Pengaruh Penggilingan Kondisi Kering dan Basah terhadap Indeks Keseragaman Biji

Untuk mengamati pengaruh kondisi penggilingan terhadap indeks keseragaman ukuran biji produk penggilingan, dilakukan *plotting* antara nilai indeks keseragaman Λ dari persamaan *logistic* terhadap waktu penggilingan yang dapat dilihat pada Gambar 13.

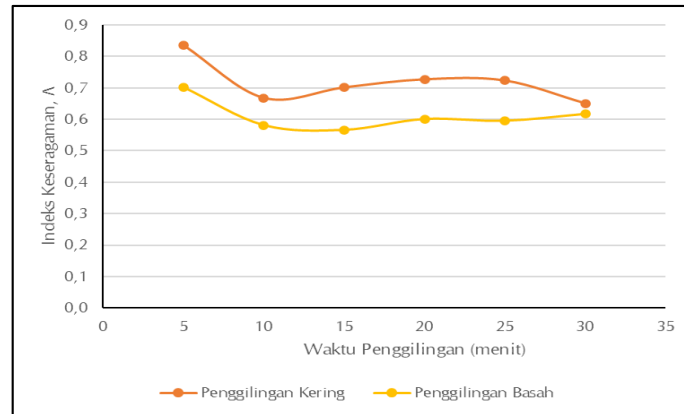
Berdasarkan Gambar 13 dapat dilihat pengaruh kondisi penggilingan dalam kondisi kering memiliki nilai indeks keseragaman yang lebih tinggi dibandingkan dalam kondisi basah. Seiring dengan meningkatnya waktu penggilingan, indeks keseragaman dari masing-masing kondisi terlihat bervariasi. Pada kondisi penggilingan kering indeks keseragaman menurun dari menit ke 5 dan 10 menit, selanjutnya meningkat pada menit ke 15 dan 20 menit, dan menurun kembali pada menit ke 25 dan 30. Sedangkan pada kondisi

penggilingan basah, nilai indeks keseragaman menurun pada menit ke 5 dan 10, selanjutnya meningkat secara perlahan pada menit ke 15 hingga 30 menit.

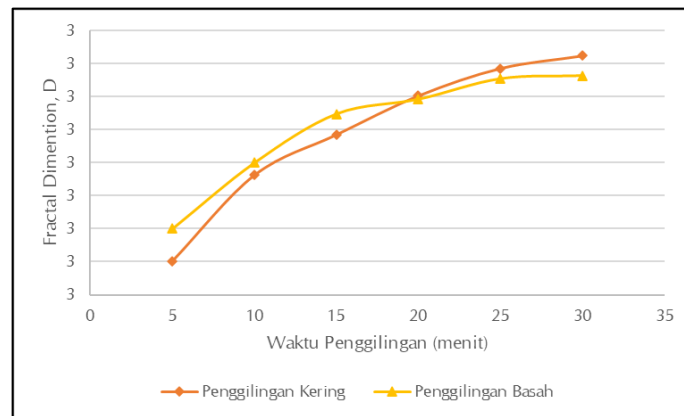
Pengaruh Penggilingan Kondisi Kering dan Basah terhadap *Fractal Dimension* Biji

Nilai *fractal dimension* ditentukan berdasarkan Persamaan (5) yang menunjukkan tingkat kekuatan suatu partikel untuk dihaluskan. Notasi m didapat dari persamaan distribusi ukuran butir Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS). Gambar 14 menunjukkan bahwa kedua kondisi penggilingan memiliki nilai *fractal dimension* yang semakin meningkat seiring dengan peningkatan waktu penggilingan. Semakin tinggi nilai *fractal dimension*, menunjukkan semakin sulit partikel biji dihaluskan. Hal ini disebabkan oleh proses pengecilan ukuran biji semakin didominasi oleh komposisi permukaan, dimana penggilingan hanya terjadi pada permukaan partikel (Liu, Li dan Song, 2018).

Berdasarkan Gambar 14 dapat dilihat bahwa pada menit ke 5, 10, dan 15 menit, penggilingan kering memiliki nilai *fractal dimension* lebih rendah dari penggilingan basah, selanjutnya di menit ke 20, 25, dan 30 menit, nilai *fractal dimension* penggilingan kering lebih tinggi dari penggilingan basah. Hal ini menunjukkan bahwa di menit ke 5, 10 dan 15 menit, penggilingan kering memiliki kemampuan lebih tinggi dalam menggerus partikel, sedangkan pada menit ke 20, 25 dan 30 menit, penggilingan basah memiliki kemampuan lebih tinggi dalam menggerus partikel biji.



Gambar 13. Grafik hubungan antara modulus ukuran Λ persamaan distribusi ukuran butir *logistic* dan waktu penggilingan tiap kondisi penggilingan



Gambar 14. Grafik hubungan antara *fractal dimension* dan waktu penggilingan tiap kondisi penggilingan

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan percobaan dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggilingan dalam kondisi kering lebih efektif dalam mereduksi ukuran partikel bijih sulfida kompleks galena-sfalerit yang ditunjukkan oleh laju penggilingan tinggi, % berat kumulatif lolos tinggi, indeks keseragaman yang tinggi dan *fractal dimension* yang rendah dibandingkan penggilingan dalam kondisi basah.
2. Penggilingan dalam kondisi kering menghasilkan lebih banyak partikel halus (< 200 mesh), yang ditunjukkan oleh nilai EPS yang rendah dan SSA yang tinggi.
3. Perilaku kinetika penggilingan bijih sulfida kompleks galena-sfalerit baik dalam kondisi

kering maupun basah dapat digambarkan dengan baik oleh persamaan Alyavdin.

4. Distribusi ukuran butir bijih sulfida kompleks galena-sfalerit produk penggilingan kondisi kering maupun basah mengikuti model persamaan *logistic*.

Adapun beberapa saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya adalah melakukan penelitian dengan satu ukuran media penggilingan terhadap fraksi ukuran tertentu, variasi *mill charge* dan variasi persen solid menggunakan tipe media penggilingan yang berbeda dalam kondisi kering dan basah untuk mendapatkan hasil optimum dari proses penggilingan dan pengaruhnya terhadap karakteristik kinetika penggilingan dan karakteristik distribusi ukuran bijih sulfida kompleks galena-sfalerit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Atas terselesaikannya paper ini, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada Ditjen Diktiristik atas beasiswa sains Tekdikti tahun 2018, BRIN atas izin belajar yang telah diberikan kepada penulis, serta dukungan oleh fasilitas riset, dan dukungan ilmiah serta teknis dari Laboratorium Karakterisasi Lanjut Bandung dan Serpong di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional (1998) *SNI 13-4726-1998: Klasifikasi sumberdaya mineral dan cadangan*. Jakarta.
- Bu, X., Chen, Y., Ma, G., Sun, Y., Ni, C. dan Xie, G. (2019) "Differences in dry and wet grinding with a high solid concentration of coking coal using a laboratory conical ball mill: Breakage rate, morphological characterization, and induction time," *Advanced Powder Technology*, 30(11), hal. 2703–2711. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.08.016>.
- Chelgani, S.C., Parian, M., Parapari, P.S., Ghorbani, Y. dan Rosenkranz, J. (2019) "A comparative study on the effects of dry and wet grinding on mineral flotation separation—a review," *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), hal. 5004–5011. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.053>.
- Harris, C.C. (1973) "The Alyavdin-Weibull plot of grinding data and the order of kinetics," *Powder Technology*, 7(2), hal. 123–127. Tersedia pada: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(73\)80016-6](https://doi.org/10.1016/0032-5910(73)80016-6).
- Jankovic, A., Suthers, S., Wills, T. dan Valery, W. (2015) "Evaluation of dry grinding using HPGR in closed circuit with an air classifier," *Minerals Engineering*, 71, hal. 133–138. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.10.023>.
- Liu, S., Li, Q. dan Song, J. (2018) "Study on the grinding kinetics of copper tailing powder," *Powder Technology*, 330, hal. 105–113. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.025>.
- Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (2012) *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2012 tentang Peningkatan nilai tambah mineral melalui kegiatan pengolahan dan pemurnian mineral*. Indonesia.
- Peltoniemi, M., Kallio, R., Tanhua, A., Luukkanen, S. dan Perämäki, P. (2020) "Mineralogical and surface chemical characterization of flotation feed and products after wet and dry grinding," *Minerals Engineering*, 156, hal. 106500. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106500>.
- Petrakis, E., Karmali, V., Bartzas, G. dan Komnitsas, K. (2019) "Grinding kinetics of slag and effect of final particle size on the compressive strength of alkali activated materials," *Minerals*, 9(11), hal. 714. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/min9110714>.
- Tanhua, A., Peltoniemi, M., Kallio, R., Peräniemi, S. dan Luukkanen, S. (2022) "The effects of dry grinding and chemical conditioning during grinding on the flotation response of a Cu-Zn sulphide ore and a spodumene pegmatite silicate ore," *Minerals Engineering*, 189, hal. 107865. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107865>.
- Turcotte, D.L. (1986) "Fractals and fragmentation," *Journal of Geophysical Research*, 91(B2), hal. 1921. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1029/JB091iB02p01921>.
- USGS (2022) *Mineral commodity summaries 2022*. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3133/mcs2022>.
- Wills, B.A. dan Napier-Munn, T. (2006) *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 7 ed. Butterworth-Heinemann.
- Yasin, C.M., Wardhana, A.I., Asdriargo, A., Ramanda, Y., Praditya, A. dan Ferlianta, W. (2021) *Peluang investasi timbal dan seng Indonesia*. Jakarta: Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara – Kementerian ESDM.
- Zhang, X., Han, Y., Gao, P., Li, Y. dan Sun, Y. (2020) "Effects of particle size and ferric hydroxide complex produced by different grinding media on the flotation kinetics of pyrite," *Powder Technology*, 360, hal. 1028–1036. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.014>.