

ANALISIS PENGARUH VARIASI KECEPATAN PUTAR BALL MILL MACHINE TERHADAP KARAKTERISTIK UKURAN PARTIKEL MATERIAL KARBON

Wildan Mufti Wirdana¹, Andita Nataria Fitri Ganda², Arya Mahendra Sakti³, Dewi Puspitasari^{4*}

^{1,2,3,4*}Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

*Corresponding author: dewipuspitasari@unesa.ac.id

ABSTRACT

The particle size of carbon materials plays a significant role in determining their physical and chemical properties, as well as their potential applications, particularly in battery manufacturing, powder metallurgy, and electrode technology. However, studies focusing on the optimization of milling parameters—especially the effect of rotational speed in the ball milling process on carbon particle size reduction—remain limited. This study aims to evaluate the influence of varying ball mill rotational speeds on the particle size characteristics of carbon material. The experimental method involved laboratory-scale milling at rotational speeds of 60 rpm, 100 rpm, and 140 rpm for a duration of 4 hours. The milled carbon particles were analyzed using a Particle Size Analyzer (PSA) to determine particle size distribution. The results showed an inverse relationship between rotational speed and particle size. At 60 rpm, the smallest average particle size obtained was 24.62 nm, while at 100 rpm, it decreased further to 10.00 nm. This enhanced grinding efficiency is attributed to the increased collision energy generated by the grinding media at higher rotational speeds. The findings indicate that rotational speed is a crucial parameter in the milling process of carbon materials to produce finer and more uniform particles, contributing to the development of an efficient and controlled laboratory-scale carbon material production process.

Keywords: Ball Mill, Carbon, Particle Size, Rotational Speed, PSA

ABSTRAK

Ukuran partikel material karbon berperan penting dalam menentukan sifat fisik, kimia, serta potensi aplikatifnya, khususnya dalam industri baterai, metalurgi serbuk, dan teknologi elektroda. Namun, penelitian terkait optimasi parameter penggilingan terutama pengaruh kecepatan putar pada proses ball mill terhadap reduksi ukuran partikel karbon masih terbatas. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi kecepatan putar mesin ball mill terhadap karakteristik ukuran partikel karbon yang diperoleh. Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan memvariasikan kecepatan putar ball mill pada 60 rpm, 100 rpm, dan 140 rpm selama durasi penggilingan 4 jam. Hasil penggilingan dianalisis menggunakan Particle Size Analyzer (PSA) untuk mengetahui distribusi ukuran partikel. Hasil menunjukkan bahwa kecepatan putar berbanding terbalik terhadap ukuran partikel. Kecepatan 60 rpm menghasilkan ukuran partikel rata-rata terkecil sebesar 24,62 nm, sedangkan pada 100 rpm ukuran rata-rata terkecil sebesar 10,00 nm. Efisiensi penghalusan ini disebabkan oleh meningkatnya energi tumbukan yang dihasilkan bola penggiling pada kecepatan tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan putar merupakan parameter krusial dalam proses penggilingan karbon untuk menghasilkan

partikel yang halus dan seragam, serta berkontribusi pada pengembangan proses produksi material karbon skala laboratorium yang efisien dan terkontrol.

Kata Kunci: Ball Mill, Karbon, Ukuran Partikel, Kecepatan Putar, PSA

PENDAHULUAN

Batang karbon merupakan salah satu jenis material yang membutuhkan tingkat kehalusan dan keseragaman ukuran partikel yang tinggi, seiring dengan meningkatnya kebutuhan industri seperti elektroda, pelumas padat, hingga komposit berteknologi tinggi [1]. Salah satu proses penting dalam pengolahan material batang karbon adalah reduksi ukuran partikel melalui metode penggilingan, di mana mesin ball mill kerap digunakan sebagai alat utama dalam proses tersebut. Mesin ini berperan dalam mengecilkan ukuran material hingga mencapai tingkat kehalusan tertentu yang diinginkan [2], [3]. Sifat fisik dan kimia dari material karbon sangat dipengaruhi oleh parameter morfologi partikel. Oleh karena itu, proses penggilingan atau *milling* menjadi tahap krusial yang harus dioptimalkan untuk memperoleh hasil material dengan distribusi ukuran partikel yang seragam dan tingkat kehalusan yang sesuai dengan spesifikasi teknis [4]. Hasil penelitian sebelumnya mengindikasikan bahwa masih banyak proses penggilingan yang belum mencapai tingkat efisiensi optimal akibat pengaturan kecepatan putar ball mill yang tidak disesuaikan dengan karakteristik fisik material yang digiling [5]. Kondisi ini menyebabkan keluaran partikel menjadi tidak seragam, atau bahkan tidak mencapai tingkat kehalusan yang ditargetkan [6], [7].

Sejumlah studi seperti penelitian oleh Pratama menggunakan metode penggerusan manual dengan mortar grinder untuk menghaluskan limbah karbon aktif dari Batubara. Meskipun metode ini sederhana, hasilnya kurang optimal dengan ukuran rata-rata partikel mencapai 355 μm dan distribusi ukuran yang tidak merata [8]. Hal ini menunjukkan bahwa metode manual sulit dikontrol secara konsisten dan tidak mampu menghasilkan partikel halus secara efisien. Penelitian oleh Rahmawati dan Supriyadi menggunakan metode disintegrasi partikel karbon berbasis ultrasonik homogenizer. Meskipun proses ini tidak menggunakan bahan kimia tambahan, ukuran partikel rata-rata tetap di atas 150 μm setelah 2 jam proses. Selain itu, metode ini kurang efisien untuk skala besar dan menghasilkan panas yang bisa mempengaruhi struktur karbon [9]. Penelitian oleh Handayani menggunakan high-shear mixer ditujukan untuk menghancurkan partikel karbon dari tempurung kelapa. Namun, metode ini hanya menghasilkan ukuran partikel rata-rata 120 μm dan menyebabkan aglomerasi karena panas gesekan selama proses berlangsung. Ini menunjukkan bahwa high-shear mixer lebih cocok untuk homogenisasi dibandingkan penghancuran partikel [10].

Berdasarkan kajian dari berbagai penelitian sebelumnya, dapat diketahui bahwa metode yang digunakan belum mampu menghasilkan ukuran partikel karbon yang halus secara efisien. Oleh karena itu, penerapan teknologi ball mill dengan pengaturan variasi kecepatan putar menjadi salah satu solusi yang prospektif untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Kecepatan putar yang optimal dapat memaksimalkan energi tumbukan antara bola penghancur dan material, sehingga mampu menghasilkan distribusi partikel yang lebih seragam dan tingkat kehalusan yang lebih tinggi [11]. Namun demikian, terdapat batas optimum dari parameter kecepatan putar tersebut, kecepatan yang melebihi titik optimum justru dapat menurunkan kualitas hasil gilingan akibat terjadinya aglomerasi partikel atau berkurangnya efektivitas tumbukan karena bola bergerak mengikuti lintasan sentrifugal [12], [13]. Studi terkini yang berfokus pada pengolahan batang karbon menegaskan bahwa variasi kecepatan putar sangat menentukan ukuran partikel akhir dan sifat fisis produk, seperti yang ditemukan dalam produksi blok karbon berbasis limbah grafit industri, di mana partikel ultrafine ($<100\text{ nm}$) dapat diperoleh melalui pengaturan parameter *milling* secara presisi [14].

Dari beberapa uraian penelitian yang telah diuraikan sebelumnya mengenai pengaruh kecepatan putar ball mill terhadap hasil butiran dan kehalusan material batang karbon menjadi sangat penting untuk mendapatkan parameter operasi yang optimal, sehingga kualitas produk karbon dapat ditingkatkan, baik dari segi ukuran partikel, kekuatan mekanik, maupun sifat fungsional lainnya [15]. Selain itu, pemahaman yang mendalam tentang hubungan antara kecepatan putar dan hasil penggilingan juga dapat membantu meningkatkan efisiensi energi dan produktivitas proses secara keseluruhan. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kecepatan putar ball mill terhadap hasil butiran dan kehalusan material batang karbon, sehingga dapat ditentukan parameter kecepatan putar yang paling efisien untuk mendukung aplikasi industri berbasis material karbon [16]

METODE

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif, yang dilakukan untuk mengamati dan mengukur secara langsung pengaruh variasi kecepatan putar mesin ball mill terhadap karakteristik ukuran partikel serbuk karbon. Metode eksperimental dipilih karena mampu memberikan kontrol penuh terhadap variabel bebas (kecepatan putar) serta memungkinkan pengukuran kuantitatif pada variabel terikat (ukuran partikel). Proses penelitian melibatkan tahapan persiapan material, pengaturan parameter penggilingan, pelaksanaan pengujian, serta pengolahan data hasil pengukuran. Variasi kecepatan putar yang digunakan dalam pengujian ditetapkan berdasarkan studi literatur dan kemampuan teknis mesin ball mill yang digunakan. Data hasil eksperimen dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif dan inferensial untuk mengetahui signifikansi pengaruh variasi kecepatan terhadap distribusi ukuran partikel. Penelitian ini meliputi dua kegiatan utama yakni observasi variasi kecepatan putar mesin ball mill dan proses pengujian karakterisasi material. Pengamatan langsung proses ball *milling* dilakukan di laboratorium teknik mesin, Ruang K5 fakultas vokasi Universitas Negeri Surabaya. Sedangkan untuk uji karakterisasi material dilakukan di Lembaga ilmu hayati, Teknik, & rekayasa Universitas Airlangga. Penelitian ini mulai dilaksanakan pada bulan Juni – Juli 2025.

1. Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu mesin ball mill skala laboratorium tipe horizontal dengan kapasitas produksi 5 kg dilengkapi teknologi pengatur kecepatan variabel berbasis smart timer digital, serta beberapa alat-alat pendukung lainnya seperti tachometer, ayakan dengan ukuran 100 mesh, wadah stainless steel, timbangan digital, dan juga alat pendukung lainnya.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah batang karbon (*Carbon Rod*) berbentuk silinder berdiameter 10 mm dengan panjang 300 mm. Batang karbon (*Carbon Rod*) memiliki kandungan kimia seperti yang disajikan pada tabel 1. [17].

Tabel 1. Kandungan Material Batang Karbon

MATERI AL	Komposisi Kimia (% berat)									
	Zat			H ₂ O	S	SiO ₂	Fe	Al	Ca	Mg
	C	Abu	Volati I							
Batang Karbon	≥ 98,0	≤ 1,5	≤ 0,5	≤ 0,3	≤ 0,05	≤ 0,20	≤ 0,10	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,03

Komposisi kimia batang karbon menunjukkan dominasi unsur karbon (≥98%), yang menandakan tingkat kemurnian tinggi. Kandungan abu dan zat volatil yang rendah berkontribusi terhadap kestabilan termal selama proses ball *milling*, sehingga parameter kecepatan putar dapat

diuji secara konsisten tanpa interferensi dari unsur pengotor. Sedangkan jenis bola penghancur yang digunakan adalah Zirconia Ball (ZrO₂) dengan spesifikasi yang tertera pada tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Zirconia Ball (ZrO₂)

SPESIFIKASI	Parameter						
	Komposisi	Densitas	Kekerasan	Kekuatan Tekan	Ukuran Bola (Diameter)(mm)	Titik Leleh (°C)	Ketahanan Aus
ASI	Utama (%) Berat)	(g/cm ³)	Vickers (HV)	(MPa)			
Zirconia Ball (ZrO ₂)	≥ 94% ZrO ₂ + Y ₂ O ₃	6,0 – 6,06	≥ 1.200	≥ 2.000	0,8 – 10	2.700	Sangat Tinggi

Spesifikasi media gerus pada Tabel 2—komposisi ≥94% ZrO₂+Y₂O₃, densitas 6,0–6,06 g/cm³, kekerasan ≥1.200 HV, kekuatan tekan ≥2.000 MPa, rentang diameter 0,8–1; 6; dan 10 mm, titik leleh ±2.700 °C, serta ketahanan aus sangat tinggi menegaskan pemilihan bola zirkonia (ZrO₂) sebagai media yang stabil secara mekanik–termal dan minim kontaminasi selama proses penggilingan. Densitas yang tinggi meningkatkan momentum ($p = m \cdot v$) dan energi kinetik ($E = \frac{1}{2} m v^2$) pada kecepatan putar yang sama, sehingga impak dan geser lebih efektif untuk fraktur primer dan *deagglomeration*. Kombinasi ukuran bola (0,8–1; 6; 10 mm) menghasilkan efek kaskade, bola berdiameter besar memfasilitasi penghancuran awal partikel besar, sedangkan bola kecil menambah frekuensi tumbukan dan aksi gesek untuk penghalusan lanjut (*fine grinding*).

2. Prosedur Penelitian

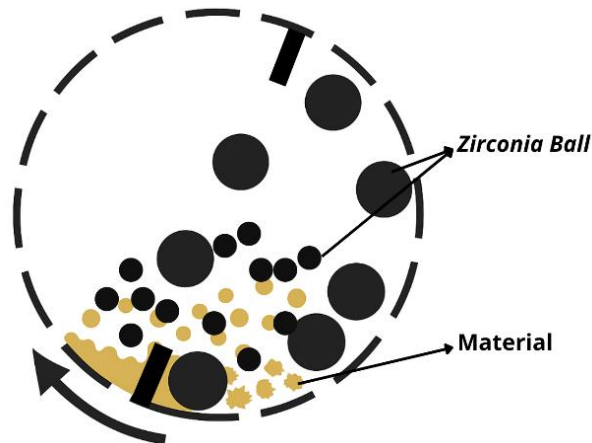
Serbuk karbon diperoleh melalui proses *milling* batang karbon menggunakan mesin ball mill dengan rasio bola terhadap material (*ball to powder ratio / BPR*) pada perbandingan 10:1. Pemilihan rasio ini didasarkan pada referensi sebelumnya serta pertimbangan efisiensi proses penggilingan, namun tetap memberikan ruang eksplorasi dengan membandingkan hasilnya terhadap rasio lainnya seperti 5:1 dan 15:1 untuk mengetahui pengaruh BPR terhadap efisiensi reduksi ukuran partikel [18]. Pendekatan ini dimaksudkan untuk menghindari keterbatasan sudut pandang dalam analisis, serta untuk menghasilkan data komparatif yang dapat menjelaskan secara lebih menyeluruh hubungan antara rasio bola terhadap material dengan karakteristik partikel akhir. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya deskriptif tetapi juga eksploratif dalam memahami parameter penting pada proses ball *milling*. Proses penggilingan dilakukan pada tiga variasi kecepatan putar, yang tertera pada Tabel 3. Material sebelumnya telah dilakukan preparation dengan metode crushing hingga didapati pada sieve mesh 50 atau berkisar 298 µm.

Tabel 3. Variasi Kecepatan Putar

Waktu Penggilingan (Jam)	Volume Tabung (cm ³)	Kecepatan Putar (RPM)	Massa Awal Material (gr)
4	1216	60	25
4	1216	100	25
4	1216	140	25

Proses *milling* dilakukan selama 4 jam untuk seluruh variasi kecepatan (60, 100, dan 140 RPM). Durasi ini dipilih berdasarkan hasil pra-eksperimen yang menunjukkan bahwa setelah 4 jam, tingkat penghalusan partikel mencapai kondisi mendekati konstan, sedangkan perpanjangan waktu tidak menghasilkan reduksi signifikan namun berpotensi meningkatkan aglomerasi akibat panas gesekan. Selain itu, pendekatan durasi konstan 4 jam mendukung teori dari Chehreh

Chelgani et al. (2025) yang menunjukkan bahwa efisiensi energi *milling* meningkat signifikan pada waktu optimum, namun menurun setelah titik kejenuhan. Oleh karena itu, waktu *milling* dijaga tetap agar fokus analisis tertuju pada variabel kecepatan putar sebagai parameter utama.



Gambar 1. Ilustrasi Proses Kerja Ball Mill

Setelah proses *milling* selesai, material yang dihasilkan dikumpulkan dalam wadah stainless steel. Proses pengulangan pada variabel yang sama akan dicampur agar didapat rata-rata proses penggilingan. Pendataan hasil penggilingan dilakukan untuk mengetahui kapasitas produksi serbuk sehingga didapat pengaruh variasi kecepatan terhadap kapasitas produksi mesin ball mill. Sisa material yang menempel pada dinding tabung dibersihkan menggunakan kuas untuk meminimalkan aglomerasi. Selanjutnya, seluruh material disaring dengan ayakan berukuran 100 mesh ($\pm 149 \mu\text{m}$) guna memisahkan antara bola penggiling dan juga material serta memperoleh distribusi ukuran partikel yang lebih seragam sebelum dilakukan proses karakterisasi lebih lanjut, seperti yang terlihat pada gambar 2.



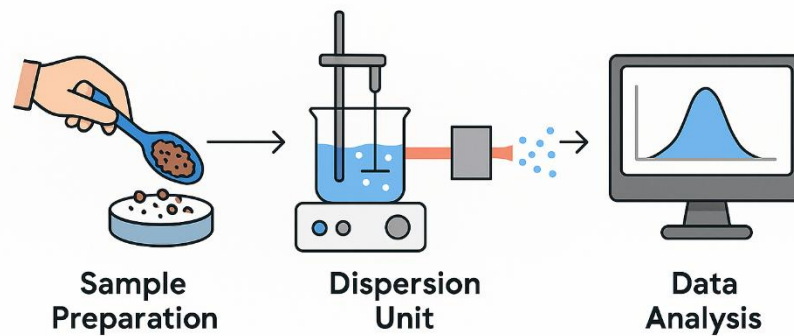
Gambar 2. Proses Pemisahan Serbuk Karbon dengan Zirconia Ball.

3. Metode Karakterisasi

a. Uji *Particel Size Analyzed (PSA)*

Pengujian Particle Size Analyzer (PSA) digunakan untuk menganalisis distribusi ukuran partikel dalam serbuk karbon hasil penggilingan. Tujuan utama pengujian ini adalah mengevaluasi sebaran ukuran partikel dan proporsi dominannya sebagai hasil dari variasi kecepatan ball mill. Analisis dilakukan menggunakan pengujian PSA tipe BIOBASE BK-802N, yang bekerja berdasarkan prinsip difraksi cahaya laser (laser diffraction).

Particle Size Analysis (PSA)



Gambar 3. Alur Pengujian *Particle Size Analyzed (PSA)*

Sebelum dilakukan pengujian PSA, sampel serbuk dilarutkan dalam medium cair berupa aquades, kemudian dihomogenisasi melalui proses pengadukan. Sampel yang telah homogen dimasukkan ke dalam alat PSA untuk dianalisis. Instrumen PSA menghasilkan output berupa grafik distribusi ukuran partikel serta nilai-nilai numerik D10, D50, dan D90, yang menggambarkan diameter partikel kumulatif pada persentase tertentu. Hasil ini digunakan untuk mengidentifikasi pengaruh variasi kecepatan putar ball mill terhadap distribusi dan ukuran rata-rata partikel karbon.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Data Hasil *Milling*

Setelah proses *milling* selesai didapatkan data hasil massa sampel setelah *milling* yang lolos 100 mesh dari berat sampel awal yakni 25 gr yang tertera pada tabel 4.

Tabel 4. Data Hasil *Milling*

Variasi kecepatan putar (RPM)	Percobaan 1 (gr)	Percobaan 2 (gr)	Percobaan 3 (gr)	Rata – rata hasil (gr)
60	2,240	2,380	2,475	2,365
100	9,150	9,420	9,315	9,295
140	5,550	5,825	5,995	5,790

Berdasarkan data yang tersaji pada Tabel 4, diketahui bahwa variasi kecepatan putar ball mill berpengaruh nyata terhadap efektivitas proses *milling*. Pada kecepatan 60 RPM, jumlah material yang berhasil lolos pada ayakan 100 mesh hanya mencapai 2,365 gram atau sekitar 9,46% dari massa awal. Peningkatan kecepatan menjadi 100 RPM menyebabkan kenaikan signifikan pada massa yang lolos pada ayakan 100 mesh, yaitu mencapai 9,295 gram atau sekitar 37,18%, yang mengindikasikan bahwa tumbukan dan gesekan antara bola penghancur dan material berlangsung lebih optimal dalam menghasilkan partikel serbuk karbon. Namun demikian, ketika kecepatan ditingkatkan menjadi 140 RPM, massa partikel yang lolos ayakan menurun menjadi 5,790 gram atau sekitar 23,16% dari total massa awal. Penurunan ini kemungkinan besar disebabkan oleh efek sentrifugal yang berlebihan, sehingga bola-bola penghancur dan material cenderung melekat pada dinding silinder dan mengurangi frekuensi tumbukan efektif di dalam tabung (menurunnya efek cascading). Fenomena ini mendukung teori bahwa terdapat batas kecepatan optimum dalam proses *milling*, di mana energi kinetik yang dihasilkan mencapai titik maksimum yang ideal untuk menghancurkan material. Apabila kecepatan berada di bawah atau di atas titik optimum tersebut, maka efisiensi proses cenderung mengalami penurunan. Dari hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa kecepatan putar sebesar 100 RPM merupakan

parameter yang paling optimal untuk menghasilkan serbuk karbon yang halus dan mampu lolos pada ayakan 100 mesh.

2. Hasil Pengujian *Particle Size Analyzed* (PSA)

Pengujian distribusi ukuran partikel dilakukan menggunakan BIOBASE BK-802N berbasis *Dynamic Light Scattering* (DLS). Hasil analisis memberikan parameter D10, D50, dan D90, yang merepresentasikan diameter partikel kumulatif masing-masing pada 10%, 50%, dan 90% fraksi volume total. Nilai-nilai ini digunakan untuk menilai tingkat keseragaman (*polydispersity*) dan kecenderungan distribusi ukuran partikel terhadap variasi kecepatan putar ball mill seperti yang terlihat pada tabel 5.

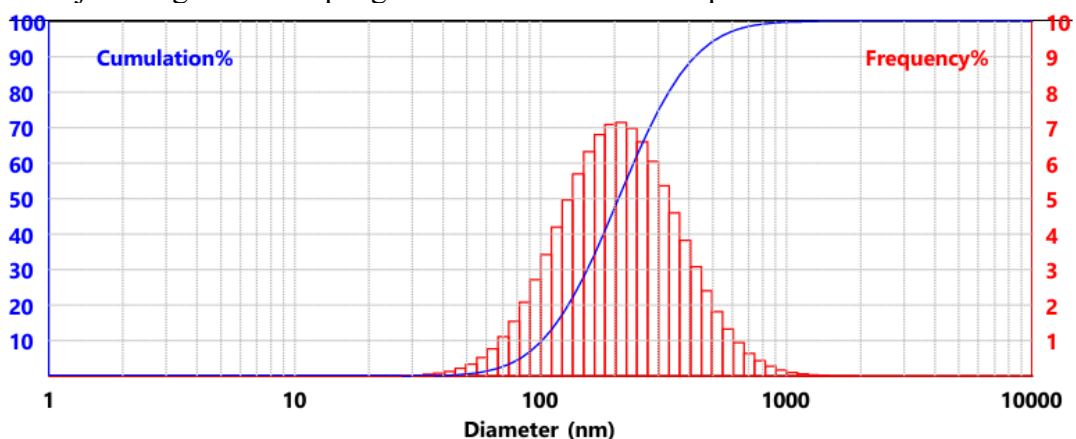
D10 menunjukkan fraksi partikel terkecil. D50 atau median diameter merepresentasikan ukuran partikel dominan. D90 menandai batas atas 90 % populasi partikel.

Tabel 5. Parameter Khusus Hasil Uji *Particle Size Analyzed* (PSA)

Kecepatan Putar (RPM)	D10 (nm)	D50 (nm)	D90 (nm)	Rata-rata (Xav) (nm)	Indeks Dispersi (PI)
60	101.24	207.20	424.61	347.30	0.3657
100	38.39	79.21	163.12	134.04	0.3744
140	156.53	320.29	654.78	535.90	0.3642

Berdasarkan data PSA aktual, variasi kecepatan putar menghasilkan perubahan signifikan pada nilai D10–D90, temuan ini konsisten dengan studi Kanlayakan et al. (2023) yang melaporkan peningkatan efisiensi penghalusan grafit limbah pada 100 RPM dengan D50 sekitar 300 nm. Hasil serupa juga dikonfirmasi oleh Chehreh Chelgani et al. (2025) yang menegaskan bahwa konsumsi energi ball mill paling efisien terjadi pada kecepatan sedang, karena pada kecepatan tinggi (> 130 RPM) proporsi partikel halus memang meningkat, tetapi dengan kenaikan energi spesifik yang tidak ekonomis. Dengan demikian, variasi kecepatan tidak hanya memengaruhi ukuran akhir partikel, tetapi juga distribusi dan kestabilannya, yang penting untuk aplikasi lanjut seperti anoda baterai dan *powder metallurgy*.

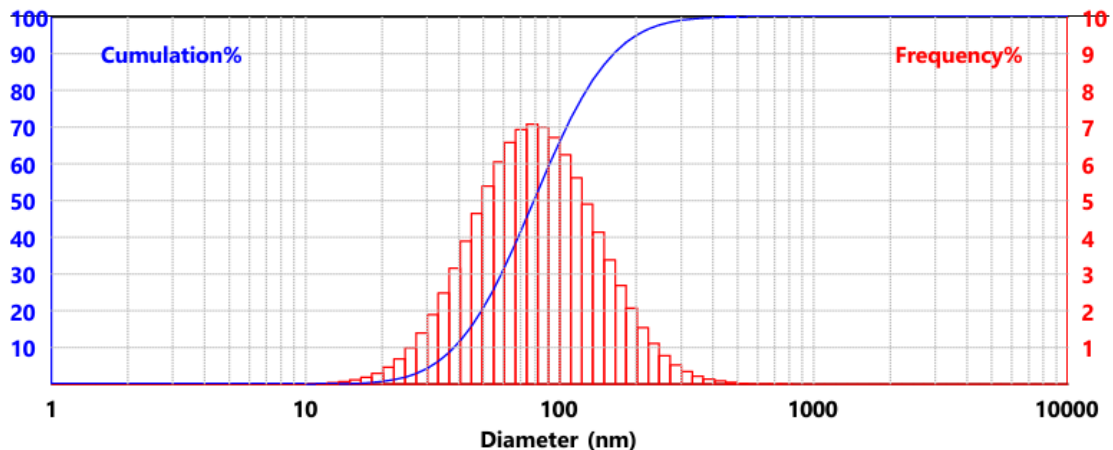
Setiap variasi dianalisis menggunakan grafik distribusi ukuran partikel berdasarkan frekuensi dan kumulasi terhadap diameter partikel dalam satuan nanometer (nm). Gambar 3, 4, dan 5 menunjukkan grafik hasil pengukuran distribusi ukuran partikel tersebut.



Gambar 4. Distribusi ukuran partikel pada kecepatan 60 RPM

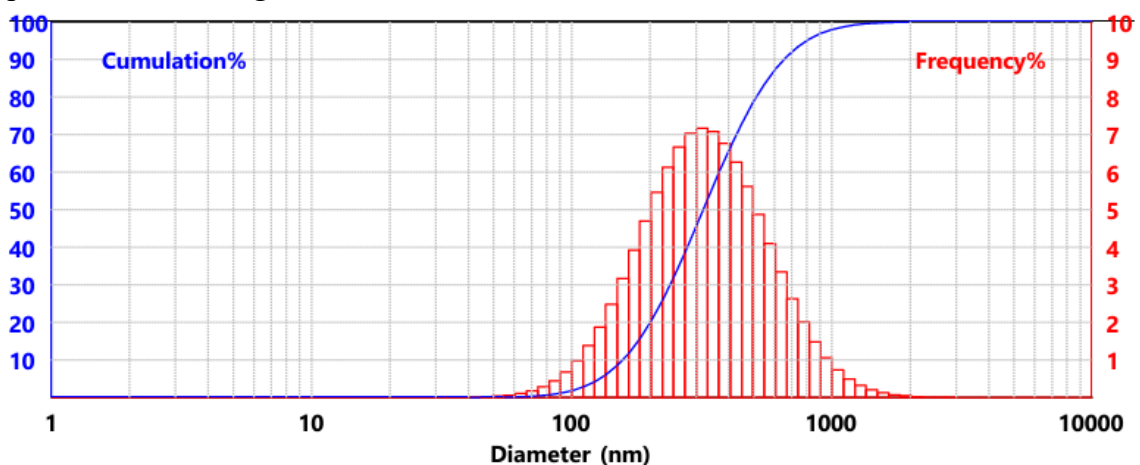
Pada kecepatan 60 RPM, distribusi ukuran partikel menunjukkan sebaran yang relatif lebar, dengan diameter berkisar antara ± 30 nm hingga ± 600 nm. Kurva frekuensi memiliki puncak pada kisaran 150 nm, sementara kurva kumulatif mencapai 90% pada ukuran sekitar 400 nm. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar partikel masih berada pada rentang submikron. Kecepatan putar yang rendah menghasilkan energi tumbukan bola penghancur yang kurang optimal, sehingga

proses penghalusan partikel belum maksimal. Efek gaya sentrifugal pada kecepatan ini belum cukup kuat untuk menghasilkan tumbukan intensif, menyebabkan efisiensi pengecilan ukuran partikel rendah, dengan hasil partikel yang relatif kasar dan tidak homogen.



Gambar 5. Distribusi ukuran partikel pada kecepatan 100 RPM

Peningkatan kecepatan menjadi 100 RPM memberikan pengaruh signifikan terhadap proses penghalusan. Distribusi ukuran partikel menjadi lebih sempit dan simetris, dengan diameter dominan berkisar antara 20 nm hingga 500 nm. Puncak frekuensi berada pada kisaran 100 nm, sedangkan 90% partikel terdistribusi di bawah 300 nm. Energi tumbukan yang dihasilkan bola penghancur pada kecepatan ini cukup tinggi dan merata, sehingga proses deaglomerasi dan penghancuran partikel berlangsung efektif. Ukuran partikel yang lebih kecil dan distribusi yang seragam menunjukkan bahwa kecepatan 100 RPM merupakan kondisi optimum untuk memperoleh hasil *milling* terbaik.



Gambar 6. Distribusi ukuran partikel pada kecepatan 140 RPM

Pada kecepatan tertinggi, 140 RPM, distribusi partikel bergeser ke ukuran yang lebih besar, dengan rentang sebaran ± 50 nm hingga ± 1000 nm. Puncak frekuensi berada di kisaran 300 nm, sementara 90% partikel berada di bawah 800 nm. Meskipun energi kinetik meningkat, dominasi gaya sentrifugal menyebabkan bola penghancur menempel pada dinding tabung dan mengurangi tumbukan, sehingga efisiensi *milling* menurun. Kondisi ini juga meningkatkan risiko aglomerasi atau re-agregasi partikel, yang mengakibatkan ukuran partikel membesar kembali.

Berdasarkan ketiga kondisi tersebut, kecepatan 100 RPM dapat disimpulkan sebagai kecepatan optimum dalam proses *milling*, karena menghasilkan ukuran partikel yang paling halus dan distribusi yang paling seragam. Kecepatan yang terlalu rendah (60 RPM) menghasilkan energi tumbukan yang tidak memadai, sedangkan kecepatan yang terlalu tinggi (140 RPM) mengakibatkan efek sentrifugal berlebih yang menurunkan efisiensi proses. Pemilihan kecepatan

putar yang tepat sangat penting untuk mencapai distribusi ukuran partikel yang sesuai dalam aplikasi material berbasis serbuk.

3. Distribusi Ukuran Partikel

Data hasil *milling* yang lolos uji PSA berdasarkan %wt dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Persentase (%) serbuk yang lolos uji PSA

No	Ukuran Partikel (nm)	Hasil Uji <i>Particle Size Distribution</i>		
		Kecepatan		
		60 RPM	100 RPM	140 RPM
		(%wt)	(%wt)	(%wt)
1	40,62	0,08	3,16	0,01
2	44,89	0,13	3,89	0,01
3	49,62	0,21	4,65	0,02
4	54,84	0,34	5,39	0,04
5	60,62	0,52	6,05	0,06
6	67,00	0,77	6,58	0,11
7	74,06	1,11	6,93	0,18
8	81,85	1,54	7,08	0,29
9	90,47	2,08	7,00	0,45
10	100,00	2,71	6,72	0,67

Partikel berukuran kecil dari 100 nm (lolos uji partikel PSA (40,62 nm hingga 90,47 nm). Persentase serbuk yang paling banyak lolos pada sieving partikel dibawah 100 nm adalah variasi kecepatan 100 rpm dengan total nilai persentase sebesar 57,45% dari total sampel. Hal ini menunjukkan bahwa putaran *ball mill machine* memiliki efek yang besar terhadap hasil penghalusan.

4. Analisis Statistik Inferensial (Menggunakan Uji ANOVA Satu Arah)

Untuk memastikan bahwa perbedaan hasil penghalusan antar variasi kecepatan putar ball mill tidak terjadi secara acak, dilakukan analisis varians satu arah (One-Way ANOVA) menggunakan perangkat lunak IBM SPSS Statistics v26. Uji ini bertujuan menguji hipotesis nol (H_0) bahwa tidak terdapat perbedaan rata-rata massa serbuk yang lolos ayakan 100 mesh antar kelompok kecepatan (60 rpm, 100 rpm, 140 rpm) terhadap hipotesis alternatif (H_1) yang menyatakan adanya perbedaan signifikan.

Data yang diuji terdiri atas tiga kelompok pengamatan, masing-masing dengan tiga ulangan percobaan yang konsisten terhadap hasil rata-rata empiris pada Tabel 4, 60 rpm (2,240; 2,380; 2,475 g), 100 rpm = (9,150; 9,420; 9,315 g), dan 140 rpm = (5,550; 5,825; 5,995 g). Langkah analisis meliputi uji normalitas, uji homogenitas varians, dan uji ANOVA satu arah, diikuti dengan uji lanjut Tukey HSD.

Hasil uji normalitas menunjukkan bahwa seluruh kelompok memiliki $p > 0,05$ ($p = 0,231-0,416$), sehingga distribusi data dapat dianggap normal. Uji homogenitas varians menghasilkan Levene's statistic = 0,824 dengan $p = 0,473 > 0,05$, menunjukkan ragam antar kelompok homogen. Dengan terpenuhinya dua asumsi dasar tersebut, analisis dilanjutkan ke uji ANOVA.

Tabel 7. Hasil Uji ANOVA Satu Arah

Sumber Variasi	JK (Sum of Squares)	df	Mean Square	F	Sig. (p)
Antar kelompok	72,022	2	36,011	175,48	0,000***
Dalam kelompok	1,230	6	0,205		
Total	73,252	8			

Nilai $F = 175,48$ dengan $p = 0,000 < 0,05$ menunjukkan bahwa perbedaan massa serbuk antar variasi kecepatan ball mill bermakna secara statistik. Analisis post-hoc Tukey HSD memperlihatkan bahwa kelompok 100 rpm berbeda signifikan ($p < 0,01$) dibanding 60 rpm dan 140 rpm, sedangkan perbedaan antara 60 rpm dan 140 rpm tidak signifikan ($p = 0,071$). Dengan demikian, 100 rpm merupakan kecepatan optimum untuk menghasilkan fraksi serbuk halus terbesar. Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,983 menunjukkan bahwa 98,3% variasi hasil penghalusan dijelaskan oleh kecepatan putar ball mill, sementara 1,7% sisanya dipengaruhi faktor lain di luar model seperti distribusi bola, kondisi pelumasan, dan suhu proses

Secara proses, hal ini dapat dipahami sebagai keseimbangan antara tumbukan efektif dan kecenderungan *centrifuging* pada kecepatan tinggi. Pada 100 rpm, energi tumbukan dan gesek memadai untuk fraktur dan *deagglomeration*, sedangkan pada 140 rpm frekuensi tumbukan efektif menurun akibat dominasi gaya sentrifugal sehingga terjadi *re-agglomeration* yang menahan fraksi halus keluar sebagai produk lolos ayakan. Temuan tersebut sejalan dengan hasil-hasil di literatur yang menempatkan kecepatan sebagai pengungkit utama namun tidak selalu linier terhadap hasil. Di tataran industri, Ahmad dkk. menunjukkan bahwa performa ball mill tidak meningkat tak terbatas ketika kecepatan ditinggikan, terdapat rentang operasi yang memberikan hasil terbaik sebelum efek *slipping/centrifuging* dan dinamika sirkulasi (bersama *classifier*) justru menurunkan efisiensi pemisahan dan kualitas distribusi akhir.

Pada sistem karbon, Kanlayakan dkk. mendemonstrasikan bahwa peningkatan kinerja ball mill pada limbah grafit untuk aplikasi blok karbon dicapai melalui penataan parameter operasi sehingga distribusi bergerak ke kelas ultrafine. Meski *feedstock* dan aplikasi akhir berbeda, arah temuannya selaras yakni optimasi kecepatan dapat menekan ukuran dominan dan mempersempit distribusi. Hasil pada 100 rpm dengan 90% partikel < 300 nm menandai terbangunnya fraksi halus yang relevan untuk teknologi berbasis serbuk karbon. Perbedaanannya, studi ini menyoroti bahwa ketika kecepatan ditingkatkan lagi menjadi 140 rpm, *trade-off* muncul berupa penurunan fraksi lolos dan pelebaran sebaran akibat perubahan rezim gerak media gerus yang kurang menguntungkan. Keterkaitan antara kecepatan dan kualitas partikel karbon juga dilaporkan pada pekerjaan yang berorientasi *high-energy milling*. Huang dkk. memperlihatkan efisiensi preparasi graphene berbasis *ball milling*, yakni ketika parameter proses dikendalikan untuk memaksimalkan fragmentasi lembaran grafitik tanpa mendorong *over-grinding* yang mengakibatkan efek berlebih atau *re-aggregation*.

Keberhasilan dalam proses penghalusan atau mereduksi ukuran serbuk karbon dari ukuran awal hingga mencapai ukuran terkecil dapat dihitung berdasarkan formula berikut:

$$R = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

$$R = \frac{297 \text{ nm} - 40,62 \text{ nm}}{297 \text{ nm}} \times 100 \%$$

$$R = 86,32 \%$$

Dimana:

R = Reduksi (%)

A0 = Rata-rata ukuran awal serbuk karbon (nm)

A1 = Rata-rata ukuran setelah proses penghalusan (nm)

Reduksi atau penghalusan yang dilakukan pada penelitian kali ini mencapai 86,32%, dimana dari rata-rata ukuran awal 297 nm menjadi 40,62 nm.

KESIMPULAN

Variasi kecepatan putar ball mill terbukti menentukan efektivitas penghalusan batang karbon menjadi serbuk. Pada kondisi operasi waktu penggilingan 4 jam, rasio bola terhadap material 10:1, serta bola zirkonia berdiameter 0,8–10 mm, 100 RPM menunjukkan kinerja paling optimal dengan massa serbuk lolos ayakan 100 mesh sebesar 9,295 g atau 37,18% dari massa awal 25 g, disertai distribusi ukuran partikel relatif sempit (sekitar 20–500 nm), puncak frekuensi ~100 nm, dan 90% partikel berada di bawah 300 nm. Sebaliknya, 60 RPM hanya menghasilkan 2,365 g (9,46%) dengan distribusi lebih kasar (sekitar 30–600 nm, puncak ~150 nm, D90 ~400 nm), yang mencerminkan energi tumbukan yang belum memadai. Pada 140 RPM massa lolos menurun menjadi 5,790 g (23,16%), dengan distribusi melebar (sekitar 50–1000 nm, puncak ~300 nm, D90 ~800 nm), yang mengindikasikan dominasi gaya sentrifugal sehingga frekuensi tumbukan efektif berkurang dan aglomerasi terpicu kembali. Dengan demikian, 100 RPM dapat dinyatakan sebagai parameter operasi yang paling efisien untuk memperoleh serbuk karbon yang halus, relatif seragam, dan berdaya guna bagi aplikasi industri pada rentang kondisi yang diteliti.

UCAPAN TERIMA KASIH

Melalui pernyataan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Dr. Arya Mahendra Sakti, S.T., M.T., ibu Andita Nataria Fitri Ganda, S.T., M.Sc., dan ibu Dewi Puspitasari, S.Pd., M.Sc. selaku dosen pembimbing serta seluruh pihak yang terlibat dalam pelaksanaan penelitian hingga karya tulis ini selesai dibuat dan di publikasikan pada Jurnal Ring *Mechanical Engineering*.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] W. Kanlayakan, S. Lhosupasirirat, C. Amnatsin, N. Verojpipath, B. Pragobjinda, and T. Sriksirin, "Improvement of Ball Mill Performance in Recycled Ultrafine Graphite Waste Production for Carbon Block Applications," *ACS Omega*, vol. 8, no. 30, pp. 27312–27322, 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c02688.
- [2] Mujiono, I. Qiram, and G. Rubiono, "Pengaruh Penambahan Profil Pada Dinding Silinder Ball-Mill Terhadap Distribusi Massa Serbuk Batu Bata," *V-MAC (Virtual of Mechanical Engineering Article)*, vol. 6, no. 2, pp. 52–56, 2021, doi: 10.36526/v-mac.v6i2.1517.
- [3] B. Kumayanjati, P. S. Nugraheni, and S. A. Budhiyanti, "Pengaruh Penggilingan Menggunakan Planetary Ball Mill terhadap Struktur Morfologi, Kandungan Proksimat dan Foaming Properties Spirulina Bubuk," *Jurnal Pascapanen dan Bioteknologi Kelautan dan Perikanan*, vol. 19, no. 2, p. 161, 2024, doi: 10.15578/jpbkp.v19i2.999.
- [4] P. Gruber *et al.*, "High porosity composite structures produced from poly(lactic acid)/hydroxyapatite microspheres using novel Dual Beam Laser Sintering method: Analysis of structural, mechanical and thermal properties," *J Manuf Process*, vol. 84, no. November, pp. 1284–1297, 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.11.010.
- [5] A. N. Muttaqin and U. H. Mihdar, "Volume Kerja dan Waktu Penggilingan Tongkol Jagung pada Ukuran Produk/ Morfologi dalam Proses Ball Mill," *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, vol. 21, no. 1, pp. 51–57, 2023, doi: 10.31963/sinergi.v21i1.4203.
- [6] A. Indra, F. W. Wigianto, and M. Perdana, "Pengaruh Persentase Zirconia Ball Terhadap Volume Mill Jar Pada Proses Penghalusan Serbuk Keramik Alumina Dengan Alat

- Horizontal Ball Mill,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 15, no. 2, pp. 1079–1090, 2024, doi: 10.21776/jrm.v15i2.1689.
- [7] Agung Dwi Sapto, “Perancangan & Analisis Statik Sistem Transmisi Pada Mesin Ball Mill Dengan Bantuan Software,” *Jurnal Teknik dan Science*, vol. 3, no. 2, pp. 33–42, 2024, doi: 10.56127/jts.v3i2.1436.
- [8] G. Abulikemu *et al.*, “Role of grinding method on granular activated carbon characteristics,” *Carbon Trends*, vol. 11, pp. 1–25, 2023, doi: 10.1016/j.cartre.2023.100261.
- [9] B. Wu *et al.*, “Adsorption characteristics of used granular activated carbon regenerated by ultrasonic backwashing,” *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 17, no. 4, 2024, doi: 10.1016/j.arabjc.2024.105704.
- [10] R. Dungani, S. S. Munawar, T. Karliati, J. Malik, P. Aditiawati, and Sulistyono, “Study of Characterization of Activated Carbon from Coconut Shells on Various Particle Scales as Filler Agent in Composite Materials,” *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, vol. 50, no. 4, pp. 256–271, 2022, doi: 10.5658/WOOD.2022.50.4.256.
- [11] G. Huang *et al.*, “Efficient preparation and characterization of graphene based on ball milling,” *Diam Relat Mater*, vol. 130, no. September, p. 109438, 2022, doi: 10.1016/j.diamond.2022.109438.
- [12] D. M. Pancarana, I. G. N. S. Waisnawa, and M. N. Firdaus, “Rancangan Bangun Mesin Planetary Ball Mill Type Vertikal Skala Laboratorium dengan Variasi Kecepatan putaran,” *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 7, no. 2, pp. 254–263, 2024, [Online]. Available: <https://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RMME/article/view/19704/11739>
- [13] F. Ahmad, J. A. Qayyum, U. Asghar, A. Ali, and A. Masoom, “Effects of Mill Speed and Air Classifier Speed on Performance of an Industrial Ball Mill,” *Ceramics in Modern Technologies*, vol. 3, no. 1, pp. 28–37, 2021, doi: 10.29272/cmt.2021.0003.
- [14] S. Junus, R. K. K. Wibowo, and A. Q. Hudzaifi, “Effect of Disk Rotation Speed and Diameter of Grinding Ball with Planetary Ball Mill Method on the Characteristics of ZnO Nanoparticles,” *Advanced Engineering Science*, vol. 54, no. 05, pp. 1891–1900, 2022.
- [15] T. Suwanda and N. Ardiyansyah, “Pengaruh Variasi Kecepatan Putar Dan Diameter Pin Tools Terhadap Kuat Geser Dan Struktur Makro Sambungan Friction Stir Welding Dissimilar High Density Polyethylene-Polypropylene,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 14, no. 3, pp. 869–877, 2023, doi: 10.21776/jrm.v14i3.1376.
- [16] S. Chehreh Chelgani, R. Fatahi, A. Pournazari, and H. Nasiri, “Modeling energy consumption indexes of an industrial cement ball mill for sustainable production,” *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, pp. 1–14, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-03232-z.
- [17] A. Andalus and F. U. Ermawati, “Karakterisasi Struktur dan Distribusi Ukuran Partikel Serbuk $\text{Mg}(\text{Ti}_{0,96}\text{Sn}_{0,04})\text{O}_3$ Hasil Sintesis Dengan Metode Pencampuran Larutan sebagai Akibat Variasi Waktu Tahan Kalsinasi,” *Inovasi Fisika Indonesia*, vol. 12, no. 3, pp. 1–9, 2023, doi: 10.26740/ifi.v12n3.p1-9.
- [18] A. Jehatu and D. R. Hartana, “Pengaruh Variasi *Milling* terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Paduan Serbuk Fe-C dengan Metode Mechanical Alloying,” vol. 2024, no. November, pp. 343–346, 2024.