

Systematic Literature Review: Sintesis Nanopartikel Menggunakan Metode Planetary Ball Mill

^{1*}Ali Aqsho Hudzaifi, ²M Fahrur Rozy Hentihu

¹ Teknik Mesin, Universitas Jember
E-mail: ¹aliaqsho.hudzaifi07@gmail.com

Abstrak— Metode *Planetary Ball Mill (PBM)* merupakan salah satu teknik *top down* yang efektif dan populer untuk memproduksi nanopartikel melalui penggilingan mekanis. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan tren riset global dan menganalisis pengaruh parameter operasi khususnya kecepatan rotasi piringan (*disk rotation speed*) dan waktu penggilingan (*grinding time*) terhadap ukuran partikel yang dihasilkan. Pendekatan yang digunakan adalah *Systematic Literature Review (SLR)* dengan metode *preferred reporting items for systematic reviews and meta analyses (PRISMA)* berbasis *database Google Scholar* untuk artikel ilmiah terbit tahun 2021–2025. Hasil pencarian awal menunjukkan tren riset PBM yang terus meningkat pesat dari tahun ke tahun. Analisis lebih lanjut mendapati bahwa peningkatan kecepatan rotasi piringan secara signifikan memperbesar energi tumbukan (*impact energy*), sehingga mempercepat pengecilan partikel hingga skala nanometer. Di sisi lain, durasi penggilingan yang optimal tidak hanya menurunkan ukuran kristal tetapi juga meningkatkan homogenitas distribusi ukuran partikel.

Kata Kunci— Nanopartikel, *Planetary Ball Mill*, *PRISMA*, *Systematic Literature Review*, *Zinc Oxide*,

Abstract— The Planetary Ball Mill (PBM) method is an effective and popular top-down technique for producing nanoparticles through a grinding mechanism. This study aims to map global research trends and analyze the effect of operating parameters, particularly disk rotation speed and grinding time, on the resulting particle size. The approach used is a Systematic Literature Review (SLR) with the preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses (PRISMA) method based on the Google Scholar database for scientific articles published in 2021–2025. Initial search results indicate a rapidly increasing trend in PBM research from year to year. Further analysis found that increasing disk rotation speed significantly increases impact energy, thereby accelerating particle reduction to the nanometer scale. On the other hand, optimal grinding duration not only reduces crystallite size but also improves the homogeneity of particle size distribution.

Keywords— Nanoparticles, *Planetary Ball Mill*, *PRISMA*, *Systematic Literature Review*, *Zinc Oxide*,

This is an open access article under the CC BY-SA License.



I. PENDAHULUAN

Material berskala nano (memiliki ukuran karakteristik antara 1–100 nm)[1] saat ini menjadi pusat perhatian dalam dunia teknik material. Pada skala ini, material menunjukkan sifat fisika, kimia, mekanik, maupun optik yang jauh lebih unggul dan unik dibandingkan dengan material sejenis dalam ukuran makro atau curah (bulk)[2][3]. Secara umum, terdapat dua pendekatan utama dalam sintesis nanopartikel, yaitu metode bottom-up (menyusun atom/molekul melalui reaksi kimia)[4] dan metode top-down (memecah benda padat berukuran besar menjadi serbuk berukuran mikro hingga nano secara mekanis)[5][6].

Salah satu metode *top down* yang paling efektif, efisien, dan berskala industri adalah penggilingan mekanis menggunakan *Planetary Ball Mill (PBM)*[7]. Prinsip kerja PBM mengandalkan kombinasi gaya sentrifugal dari piringan (*sun disk*) dan vial penggiling yang berputar berlawanan arah. Kondisi ini menghasilkan gaya impak (*impact energy*) serta gaya gesek tinggi antara bola-bola giling (*grinding balls*) dengan material sampel[8].

Meskipun PBM diakui luas mampu mereduksi ukuran material secara drastis, efisiensi dan ukuran akhir produk sangat bergantung pada parameter operasi seperti kecepatan rotasi (*disk rotational speed*), durasi penggilingan (*grinding time*), rasio bola terhadap bubuk (*ball to powder ratio*), serta bola penggiling (*grinding ball*)[9][10]. Guna memetakan perkembangan teknologi PBM serta mengidentifikasi celah riset (*research gap*) terutama pada sintesis nanopartikel diperlukan sebuah kajian literatur yang terstruktur. Oleh karena itu, penelitian ini melakukan *Systematic Literature Review (SLR)* metode *preferred reporting items for systematic reviews and meta analyses* (PRISMA) untuk mengevaluasi data empiris dari tahun 2021 hingga 2025 mengenai pengaruh parameter *disk rotation speed* dan *grinding time* terhadap keberhasilan sintesis nanopartikel *Zinc Oxide (ZnO)*.

II. METODE

Penelitian ini dilaksanakan menggunakan metode *Systematic Literature Review (SLR)* yang mengacu pada protokol standar PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Proses identifikasi dan seleksi literatur dilakukan secara sistematis berdasarkan dua parameter utama yang menjadi fokus kajian penelitian.

A. Tahap 1: Parameter *Disk Rotation Speed*

- **Database:** Google Scholar
- **Rentang Waktu:** 2021–2025
- **Kata Kunci Utama:** "Nanoparticle" AND "Planetary Ball Mill" AND "Disk Rotation Speed"
- **Alur Seleksi PRISMA:**
 - (1) *Identification:* Menemukan 19 artikel potensial dari database
 - (2) *Screening:* Menyaring judul, abstrak, dan duplikasi sehingga tersisa 7 artikel
 - (3) *Eligibility:* Memeriksa teks lengkap untuk kesesuaian parameter, menyisakan 5 artikel
 - (4) *Included:* Sebanyak 5 artikel dinyatakan layak untuk direview mendalam.

B. Tahap 2: Parameter *Grinding Time* (Spesifik *ZnO*)

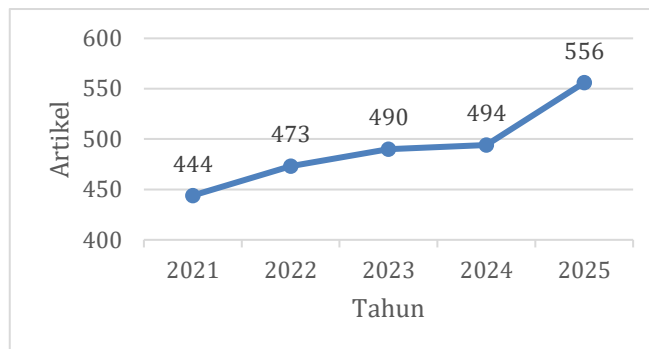
Berdasarkan temuan awal pada Tahap 1, terdapat gap penelitian di mana material *Zinc Oxide (ZnO)* belum mencapai skala nanometer hanya dengan variasi parameter *Disk Rotation Speed*. Oleh karena itu, dilakukan pencarian tahap kedua dengan menyertakan kata kunci material spesifik *Zinc Oxide (ZnO)*.

- **Database:** Google Scholar
- **Rentang Waktu:** 2021–2025
- **Kata Kunci Utama:** "Nanoparticle" AND "Planetary Ball Mill" AND "Grinding Time" AND "Zinc Oxide".
- **Alur Seleksi PRISMA:**
 - (1) *Identification:* Menemukan 44 artikel potensial dari database
 - (2) *Screening:* Menyaring relevansi dokumen, tersisa 9 artikel
 - (3) *Eligibility:* Memeriksa data eksperimen ukuran kristal/partikel, menyisakan 4 artikel
 - (4) *Included:* Sebanyak 4 artikel dimasukkan ke dalam tabel review final.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Tren Riset Global PBM (2021–2025)

Data publikasi di Google Scholar menggunakan kata kunci umum "*Nanoparticle*" AND "*Planetary Ball Mill*" menunjukkan pertumbuhan minat riset yang sangat masif di komunitas ilmiah internasional:



Gambar 1. Tren Jumlah Artikel PBM di Google Scholar (2021–2025)

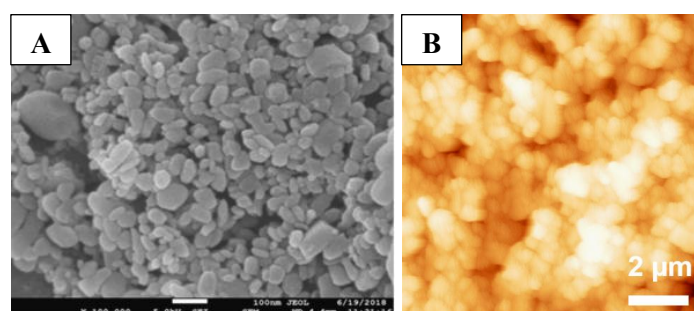
Tren kenaikan ini mengonfirmasi bahwa PBM tetap menjadi instrumen andalan para peneliti dalam rekayasa *top-down* nanomaterial. Peningkatan jumlah publikasi tersebut menunjukkan tingginya minat penelitian terhadap efektivitas metode ini dalam menghasilkan partikel berukuran nano dengan distribusi ukuran yang homogen[11], serta kemampuan aplikasinya pada berbagai jenis material, dan dapat menghasilkan nano material dalam jumlah besar sekaligus[7].

B. Analisis Pengaruh Kecepatan Rotasi Piringan (*Disk Rotation Speed*)

Berdasarkan PRISMA Tahap 1, berikut adalah data dari 5 artikel utama yang mengkaji variasi material dan ukuran partikel akibat pengaruh kecepatan rotasi piringan:

Tabel 1. Hasil Review Parameter Disk Rotation Speed terhadap Ukuran Partikel

Penulis	Tahun	Material	Ukuran Partikel
Lu Li et al.[12]	2022	Al ₂ O ₃	30-56 nm
Chernov et al.[13]	2024	Dy ₂ TiO ₅	50-60 nm
Sapkota et al[14]	2021	ZnO	250-110 nm
Chwadaka Pohshna & Damodhara Rao[15]	2023	nHAP	100 nm
		Fly Ash	160 nm
Anthony de Schutter et al.[16]	2024	BOF	10 - 25 µm



Gambar 1. Hasil Pengamatan SEM (A)[15] & (B)[14]

Secara mekanis, hubungan antara proses penggilingan dan *disk rotation speed* dapat dijelaskan melalui perpindahan energi kinetik bola giling. Semakin tinggi *disk rotational speed*, maka gaya sentrifugal dan gaya koriolis yang menggerakkan bola di dalam vial akan meningkat sehingga intensitas tumbukan antar media giling menjadi lebih besar[17]. Hal ini menghasilkan energi tumbukan (*impact energy*) yang lebih besar saat bola menghantam dinding vial atau menumbuk serbuk material. Akibat akumulasi tegangan mekanis yang tinggi, cacat struktural (*dislocations*) pada serbuk material cepat terbentuk, memicu keretakan, dan mempercepat reduksi ukuran partikel hingga mencapai skala nanometer[18].

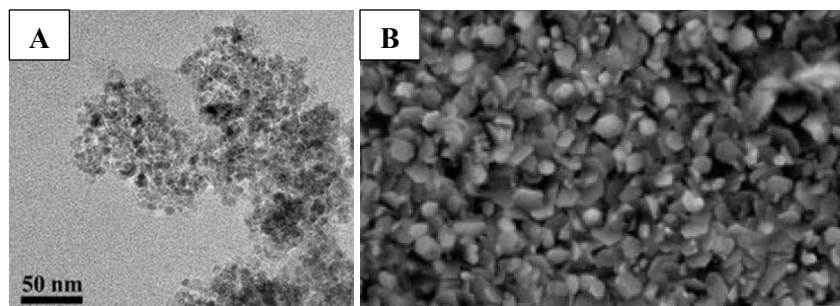
Namun, data dari Sapkota et al. (2021) menunjukkan bahwa pada material ZnO, menggunakan variasi parameter *disk rotation speed* saja hanya menghasilkan ukuran partikel sekitar 110 nm (belum masuk ke standar ideal nanopartikel < 100 nm). Fenomena ini mengindikasikan perlunya optimasi parameter lain, yaitu *grinding time*.

C. Analisis Pengaruh Waktu Penggilingan (*Grinding Time*) pada ZnO (*Zinc Oxide*)

Berdasarkan PRISMA Tahap 2, berikut adalah data dari 4 artikel utama yang mengkaji material ZnO spesifik terhadap waktu penggilingan:

Tabel 2. Hasil *Review* Artikel Parameter *Grinding Time* terhadap Partikel Berbasis ZnO/Zn

Penulis	Tahun	Material	Ukuran Partikel
Serkan Biyik [19]	2024	Ag-ZnO	1 μm
Kabir et al.[20]	2025	Zinc (Zn)	5.5 μm
Gabriela B. Barrón & M. de la L. Olvera[21]	2024	ZnO:F (FZO)	30-45 nm
Otis et al. [22]	2021	ZnO	30 nm



Gambar 1. Hasil Pengamatan SEM (A)[22] & (B)[21]

Waktu penggilingan (*milling time*) merupakan salah satu parameter penting yang menentukan besarnya energi mekanik yang diterima oleh material selama proses penggilingan[23]. Peningkatan durasi penggilingan menyebabkan serbuk mengalami tumbukan berenergi tinggi secara berkelanjutan dan berulang. Kondisi tersebut berkontribusi terhadap penurunan ukuran butir atau ukuran kristal secara signifikan, sekaligus memungkinkan proses fraktur berlangsung lebih merata pada seluruh material. Akibatnya, distribusi ukuran partikel yang dihasilkan menjadi lebih homogen dan seragam[24].

Seperti yang dibuktikan oleh Otis et al. (2021) dan Barrón & Olvera (2024), kontrol *milling time* yang tepat penggilingan mampu mereduksi ZnO hingga berukuran 30-45 nm. Sebaliknya, pada penelitian Kabir et al. (2025) atau Serkan Biyik (2024), hasil ukuran yang masih berada di skala mikrometer (1–5.5 μm) dapat disebabkan oleh fenomena *cold welding* (pengelasan dingin), di mana partikel yang sudah halus kembali menyatu (*aglomerasi*) akibat durasi penggilingan yang terlalu lama[25].

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan studi literatur sistematis yang telah dilakukan terhadap data publikasi *google scholar* periode 2021–2025, dapat ditarik beberapa kesimpulan:

1. *Planetary Ball Mill (PBM)* merupakan metode *top-down* yang sangat efektif dalam memproduksi berbagai partikel dengan ukuran micrometer hingga nanometer.
2. Kecepatan rotasi piringan (*disk rotation speed*) memiliki pengaruh terhadap energi mekanik selama proses penggilingan. Peningkatan kecepatan menyebabkan energi tumbukan antar bola penggiling menjadi lebih tinggi, sehingga proses pengecilan ukuran partikel berlangsung lebih efektif dan menghasilkan partikel berukuran lebih kecil secara signifikan.
3. Durasi penggilingan (*grinding time*) memiliki peranan penting dalam mengendalikan batas reduksi ukuran partikel yang dihasilkan. Berbagai penelitian pada material berbasis ZnO menunjukkan bahwa pemilihan kombinasi waktu penggilingan yang optimal sangat diperlukan untuk mencapai skala nanometer dan mencegah terjadinya aglomerasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Mekuye, "Nanomaterials : An Overview Of Synthesis , Classification , Characterization , And Applications," No. March, Pp. 486–501, 2023, Doi: 10.1002/Nano.202300038.
- [2] N. Joudeh And D. Linke, "Nanoparticle Classification , Physicochemical Properties, Characterization , And Applications: A Comprehensive Review For Biologists," *J. Nanobiotechnology*, Pp. 1–29, 2022, Doi: 10.1186/S12951-022-01477-8.
- [3] I. L. P. M. Ridha Alisthipa Sephia¹, Muthia Oktaviani Rahayu², Nayla Robiatul Adawiyah³, Dini Noer Fatwa⁴, "Review Artikel: Analisis Karakteristik Dan Pengaplikasian Teknologi Nanopartikel Berdasarkan Klasifikasinya Pada Berbagai Jenis Terapi.," *J. Ilm. Wahana Pendidikan*, Vol. 9, No. September, Pp. 675–682, 2023.
- [4] M. Sen, *Nanotechnology And The Environment*. 2020.
- [5] D. H. Kusumawati, "Graphite Particle Reduction Process Using High Energy Milling," Vol. 1, No. Iest, Pp. 797–800, 2018.
- [6] M. A. T. Rasha A. Youness*, "Review On Using Powder Metallurgy Method For Production Of Metal- Based," Vol. 64, No. 12, Pp. 7315–7322, 2021, Doi: 10.21608/Ejchem.2021.79970.3934.
- [7] C. Suryanarayana, "Mechanical Alloying: A Critical Review," Vol. 3831, 2022, Doi: 10.1080/21663831.2022.2075243.
- [8] M. Broseghini, L. Gelisio, M. D. Incau, C. L. A. Ricardo, N. M. Pugno, And P. Scardi, "Journal Of The European Ceramic Society Modeling Of The Planetary Ball-Milling Process : The Case Study Of Ceramic Powders," Vol. 36, Pp. 2205–2212, 2016.
- [9] P. Kharat, "Parametric Study On Four Station Ball Mill For Synthesis Of Ultrafine Powders," *Mater. Today Proc.*, 2023, Doi: 10.1016/J.Matpr.2023.04.360.
- [10] T. T. Nguyen, K.-C. Kim, T. Jiang, N.-I. Kim, And C. Kwon, "Effects Of Ball-To-Powder Diameter Ratio And Powder Particle Shape On Edem Simulation In A Planetary Ball Mill," *J. Indian Chem. Soc.*, Vol. 99, No. 1, P. 100300, 2022, Doi: 10.1016/J.Jics.2021.100300.
- [11] M. Broseghini, L. Gelisio, M. D. Incau, C. L. A. Ricardo, N. M. Pugno, And P. Scardi, "Journal Of The European Ceramic Society Corrigendum To ‘ Modeling Of The Planetary Ball-Milling Process : The Case Study Of Ceramic Powders ’ [J . Eur . Ceram . Soc . 36 (9) (2016)]," *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 37, No. 3, P. 1141, 2017, Doi: 10.1016/J.Jeurceramsoc.2016.09.026.
- [12] L. Li *Et Al.*, "Disperse Alumina Nanoparticles Prepared By Ball Milling And Acid Corrosion," Pp. 341–350, 2022.
- [13] I. O. Chernov, A. V Kushtym, And S. V Malykhin, "Synthesis Of Materials Based On Compounds Of Rare Earth Elements With Titanium , Hafnium And Zirconium As Promising Neutron Absorbers For Nuclear Reactors," Vol. 4, Pp. 64–78, 2024.
- [14] R. Sapkota, P. Duan, T. Kumar, And A. Venkataraman, "Applied Sciences Thin Film Gas Sensors Based On Planetary Ball-Milled Zinc Oxide Nanoinks : Effect Of Milling Parameters On Sensing Performance," 2021.
- [15] C. Pohshna And D. R. Mailapalli, "Opennano Modeling The Particle Size Of Nanomaterials Synthesized In A Planetary Ball Mill," *Opennano*, Vol. 14, No. October, P. 100191, 2023, Doi: 10.1016/J.Onano.2023.100191.

- [16] A. De Schutter, L. Ceyssens, G. Granata, And T. Van Gerven, “Improving The Carbonation Of Steel Slags Through Concurrent Wet Milling,” *J. Sustain. Metall.*, Vol. 10, No. 3, Pp. 1759–1773, 2024, Doi: 10.1007/S40831-024-00895-2.
- [17] V. Bogdanov, S. Anciferov, D. Bogdanov, And E. Sychyov, “State And Directions Of Development Of Grinding Technic And Technology,” *Bull. Belgorod State Technol. Univ. Named After. V. G. Shukhov*, Vol. 7, Pp. 110–116, Apr. 2022, Doi: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-110-116.
- [18] N. Al, H. Nabil, And K. A. Elrahman, “Physical Methods For Preparation Of Nanomaterials , Their Characterization And Applications : A Review,” *J. Umm Al-Qura Univ. Appl. Sci.*, No. 0123456789, 2024, Doi: 10.1007/S43994-024-00165-7.
- [19] S. Biyyik, “Journal Of Radiation Research And Applied Sciences Effect Of Y 2 O 3 Addition And Milling Time On The Synthesis Of Nanocrystalline Ag – Zn Composite Powder Via Mechanical Alloying,” *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, Vol. 17, No. 2, P. 100867, 2024, Doi: 10.1016/J.Jrras.2024.100867.
- [20] H. Kabir, K. Munir, C. Wen, And Y. Li, “In Fl Uence Of Speci Fi C Ball-Milling Energy On Mechanical And Corrosion Properties Of Zn – 0 . 2 Graphene Nanoplatelet Composites,” Vol. 2402196, 2025, Doi: 10.1002/Adem.202402196.
- [21] G. B. Barrón And M. D. L. Olvera, “Study Of Fzo Thin Films Deposited By Ultrasonic Spray : Influence Of Precursor Milling,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, Vol. 35, No. 19, Pp. 1–10, 2024, Doi: 10.1007/S10854-024-13089-Z.
- [22] G. Otis, M. Ejgenberg, And Y. Mastai, “Solvent-Free Mechanochemical Synthesis Of ZnO Nanoparticles By High-Energy Ball Milling Of E -Zn (Oh) 2 Crystals,” 2021.
- [23] W. M. And W. P. C Prommalikit And College, “Effect Of Milling Speed And Time On Ultrafine ZnO Powder By High Energy Ball Milling Technique Effect Of Milling Speed And Time On Ultrafine ZnO Powder By High Energy Ball Milling Technique,” *J. Phys. Conf. Ser.*, P. 1259 012023, 2019, Doi: 10.1088/1742-6596/1259/1/012023.
- [24] T. Im, J. Pyo, J. Lee, And C. Sunyong, “Fabrication Of Homogeneous Nanosized Nickel Powders Using A Planetary Ball Mill : Applications To Multilayer Ceramic Capacitors (Mlccs),” *Powder Technol.*, Vol. 382, Pp. 118–125, 2021, Doi: 10.1016/J.Powtec.2020.12.043.
- [25] M. Dahmani, M. Fellah, N. Hezil, M. C. Benoudia, And M. A. Samad, “Structural And Mechanical Evaluation Of A New Ti - Nb - Mo Alloy Produced By High - Energy Ball Milling With Variable Milling Time For Biomedical Applications,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 129, No. 11, Pp. 4971–4991, 2023, Doi: 10.1007/S00170-023-12650-0.