

Karakterisasi Ukuran, Morfologi, dan Komposisi Partikel Arang Daun Bambu Tutul Hasil High Energy Ball Milling Tipe Shaker Mill

Yoyo Saputro^{1*}

¹ Teknik Kendaraan Ringan, SMK PGRI 1 Taman, Indonesia

*email: yoyosaputro@gmail.com

DOI : 10.48144/suryateknika.v7i1.2566

Received: 15 Maret 2023

Revised: 26 Maret 2023

Accepted: 29 Maret 2023

Abstract

*The utilization of biomass as a base material for fine-sized particles represents an approach toward developing renewable resource-based materials. Spotted bamboo (*Bambusa maculata*) leaves are a type of biomass containing carbon and silica-based components, making them potentially viable for development via particle size reduction processes. This study evaluates the characteristics of spotted bamboo leaf charcoal after undergoing High Energy Ball Milling (HEM) using a shaker mill with variations in the tube headspace-to-material ratio. The starting material consisted of spotted bamboo leaves that were carbonized under oxygen-depleted conditions, crushed, and sieved to pass through a 200-mesh screen prior to milling. The milling process was conducted at a speed of 1000 rpm for 2 million cycles*

using 1/4-inch diameter steel balls. The variations in the tube headspace-to-material ratio used were 1:1, 1:2, 1:3, and 1:4. The milled products were characterized using a Particle Size Analyzer (PSA), Scanning Electron Microscope (SEM), and Energy Dispersive X-ray (EDX). The PSA results showed average particle diameters of 627.3 nm at the 1:1 ratio, 795 nm at the 1:2 ratio, 801.2 nm at the 1:3 ratio, and 836.36 nm at the 1:4 ratio. Based on these data, the smallest average size was obtained at the 1:1 ratio. SEM observations indicated that the milled material at the 1:1 ratio exhibited a relatively more homogeneous appearance compared to the other variations. The EDX results revealed the highest carbon element content at 68.47% at the 1:1 ratio. The findings demonstrate that adjusting the tube headspace-to-material ratio influences the characteristics of the impact outcomes, particularly particle size and morphology. Spotted bamboo leaf charcoal subjected to this milling treatment shows potential for development as a starting material in processing carbon materials and silica-based materials.

Keywords: *spotted bamboo leaf charcoal, shaker mill, High Energy Ball Milling, particle size, SEM-EDX.*

Abstrak

Pemanfaatan biomassa sebagai bahan dasar material berukuran halus menjadi salah satu pendekatan dalam pengembangan material berbasis sumber daya terbarukan. Daun bambu tutul merupakan salah satu biomassa yang mengandung komponen berbasis karbon dan silika sehingga berpotensi dikembangkan melalui proses reduksi ukuran partikel. Penelitian ini mengevaluasi karakteristik arang daun bambu tutul setelah mengalami proses High Energy Ball Milling (HEM) menggunakan shaker mill dengan variasi rasio ruang kosong tabung terhadap material. Bahan awal berupa daun bambu tutul dikarbonisasi dalam kondisi minim oksigen, dihancurkan, dan diayak hingga lolos ukuran 200 mesh sebelum dimilling. Proses milling dilakukan pada kecepatan 1000 rpm selama 2 juta siklus menggunakan bola baja berdiameter 1/4 inci. Variasi rasio ruang kosong tabung terhadap material yang digunakan adalah 1:1, 1:2, 1:3, dan 1:4. Karakterisasi hasil milling dilakukan menggunakan Particle Size Analyzer (PSA), Scanning Electron Microscope (SEM), dan Energy Dispersive X-ray (EDX). Hasil PSA menunjukkan diameter rata-rata partikel masing-masing sebesar 627,3 nm pada rasio 1:1, 795 nm pada rasio 1:2, 801,2 nm pada rasio 1:3, dan 836,36 nm pada rasio 1:4. Berdasarkan data tersebut, ukuran rata-rata terkecil diperoleh pada rasio 1:1. Pengamatan SEM menunjukkan bahwa material hasil milling pada rasio 1:1 memiliki tampilan yang relatif lebih homogen dibandingkan variasi lainnya. Hasil EDX menunjukkan kandungan unsur karbon tertinggi sebesar 68,47% pada rasio 1:1. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa pengaturan rasio ruang kosong tabung terhadap material memengaruhi karakteristik hasil tumbukan, khususnya ukuran dan morfologi partikel. Arang daun bambu tutul dengan perlakuan

milling tersebut menunjukkan potensi untuk dikembangkan sebagai bahan awal dalam pengolahan material karbon dan material berbasis silika.

Kata kunci: arang daun bambu tutul, *shaker mill*, *High Energy Ball Milling*, ukuran partikel, SEM-EDX

1. Pendahuluan

Bambu merupakan salah satu sumber daya hayati yang banyak ditemukan di Indonesia dan mempunyai pertumbuhan relatif cepat. Keberadaannya tidak hanya dimanfaatkan dalam bentuk batang, tetapi juga menghasilkan biomassa berupa daun yang selama ini belum banyak dikembangkan sebagai bahan baku material bernilai tambah. Bambu diketahui memiliki kandungan mineral berbasis silikat di samping komponen organik yang setelah proses karbonisasi dapat menghasilkan material dengan karakteristik karbon tertentu.

Pemanfaatan biomassa menjadi material berukuran halus semakin menarik seiring berkembangnya teknologi material dan nanoteknologi. Material pada ukuran yang lebih kecil mempunyai karakteristik yang dapat berbeda dibandingkan material berukuran besar, terutama berkaitan dengan luas permukaan dan sifat interaksi material. Nanopartikel secara umum berada pada rentang ukuran sekitar 1–100 nm, sedangkan proses reduksi ukuran melalui metode mekanik dapat digunakan sebagai salah satu pendekatan top-down dalam menghasilkan material berukuran mikro hingga submikro.

Salah satu metode mekanik yang dapat digunakan adalah High Energy Ball Milling (HEM). Prinsip dasar metode ini adalah memberikan energi mekanik melalui tumbukan antara media penggiling dan material. Tumbukan yang berlangsung berulang dapat menyebabkan material mengalami deformasi, retak, fragmentasi, dan pengurangan ukuran. Karakteristik hasil akhir tidak hanya ditentukan oleh jenis material dan media penggiling, tetapi juga oleh parameter proses seperti kecepatan putaran, waktu atau jumlah siklus, ukuran bola, dan kondisi pengisian ruang milling.

Penelitian mengenai pemanfaatan bambu sebagai bahan material berukuran halus telah dilakukan menggunakan berbagai pendekatan. Waluyo dan Rochman mengembangkan partikel nano melalui kombinasi ball milling dan ultrasonic milling. Penelitian Joharwan dan Supriyono membahas produksi nanopartikel arang bambu wulung menggunakan HEM tipe shaker mill. Penelitian lainnya menunjukkan bahwa biomassa bambu dapat dikembangkan menjadi material karbon maupun material yang mengandung silika.

Daun bambu juga memiliki potensi sebagai sumber material berbasis silika. Penelitian Sa'diyah dan rekan-rekan mengenai daun bambu menunjukkan adanya upaya ekstraksi silikon dioksida dari bahan tersebut. Potensi tersebut menjadi menarik apabila biomassa tidak hanya dipandang sebagai limbah, tetapi dikembangkan melalui tahapan karbonisasi dan reduksi ukuran sehingga karakteristik materialnya dapat dipelajari lebih lanjut.

Pada proses shaker mill, kondisi ruang kosong di dalam tabung menjadi salah satu parameter yang dapat memengaruhi pola pergerakan media penggiling dan material. Perubahan jumlah material terhadap ruang kosong dapat mengubah kemungkinan terjadinya kontak dan tumbukan antara bola baja dengan material. Kondisi tersebut selanjutnya dapat memengaruhi ukuran serta distribusi material hasil milling.

Penelitian ini berfokus pada karakterisasi arang daun bambu tutul yang diproses menggunakan HEM tipe shaker mill. Variasi yang digunakan adalah rasio ruang kosong tabung terhadap material sebesar 1:1, 1:2, 1:3, dan 1:4. Karakterisasi dilakukan melalui pengukuran ukuran partikel menggunakan PSA serta pengamatan morfologi dan komposisi unsur menggunakan SEM dan EDX.

Tujuan penelitian adalah mengetahui karakteristik ukuran partikel, morfologi, dan komposisi unsur arang daun bambu tutul setelah proses HEM pada variasi rasio ruang kosong tabung terhadap material. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi awal mengenai pengaruh kondisi pengisian tabung terhadap karakteristik material hasil milling.

2. Metode

2.1 Bahan Penelitian

Bahan utama penelitian adalah arang yang berasal dari daun bambu tutul. Daun bambu yang telah dikeringkan digunakan sebagai bahan awal untuk proses karbonisasi sebelum dilakukan reduksi ukuran menggunakan *shaker mill*.

Tahapan persiapan bahan dilakukan secara berurutan mulai dari pengeringan, karbonisasi, penghancuran awal, hingga pengayakan.

2.2 Peralatan Penelitian

Peralatan utama yang digunakan adalah:

- a. *High Energy Ball Milling* tipe *shaker mill*;
- b. tabung milling;
- c. bola baja sebagai media penggiling;
- d. ayakan;
- e. *Particle Size Analyzer* (PSA);
- f. *Scanning Electron Microscope* (SEM); dan
- g. *Energy Dispersive X-ray* (EDX).

Bola baja yang digunakan mempunyai diameter **1/4 inci**, sedangkan kecepatan pengoperasian *shaker mill* ditetapkan sebesar **1000 rpm**.

2.3 Parameter Proses Milling

Proses milling dilakukan menggunakan empat variasi rasio ruang kosong tabung terhadap material, yaitu:

- a. 1:1;
- b. 1:2;
- c. 1:3; dan
- d. 1:4.

Tabung yang digunakan berbahan *stainless steel* dengan diameter sekitar 2 inci dan tinggi 120 mm. Proses tumbukan dilakukan sebanyak **2 juta siklus**.

Parameter utama penelitian dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter proses *High Energy Ball Milling*

Parameter	Nilai
Jenis alat	<i>Shaker mill</i>
Material	Arang daun bambu tutul
Material tabung	<i>Stainless steel</i>
Diameter tabung	2 inci
Tinggi tabung	120 mm
Diameter bola baja	1/4 inci
Kecepatan putaran	1000 rpm
Jumlah siklus	2 juta siklus
Rasio ruang kosong : material	1:1; 1:2; 1:3; 1:4

2.4 Preparasi Arang Daun Bambu Tutul

Daun bambu tutul yang telah kering dimasukkan ke dalam wadah yang dibuat dalam kondisi minim oksigen. Proses pembakaran dilakukan selama kurang lebih dua jam. Setelah proses karbonisasi selesai, wadah dibiarkan hingga mencapai kondisi yang lebih dingin sebelum arang dikeluarkan.

Arang yang diperoleh kemudian dihancurkan secara mekanis untuk mendapatkan ukuran yang lebih kecil. Material hasil penghancuran selanjutnya diayak. Fraksi yang digunakan dalam proses milling adalah material yang lolos ayakan **200 mesh**.

2.5 Proses *High Energy Ball Milling*

Material hasil pengayakan dimasukkan ke dalam tabung *shaker mill* sesuai variasi rasio ruang kosong terhadap material. Bola baja berdiameter 1/4 inci digunakan sebagai media tumbukan.

Masing-masing variasi diproses menggunakan kondisi operasi yang sama, yaitu kecepatan 1000 rpm dan jumlah tumbukan 2 juta siklus. Dengan mempertahankan kecepatan dan jumlah siklus, pengamatan diarahkan pada pengaruh variasi rasio ruang kosong terhadap karakteristik hasil milling.

Setelah proses selesai, material hasil tumbukan dikeluarkan dari tabung untuk selanjutnya dilakukan karakterisasi.

2.6 Karakterisasi Ukuran Partikel

Ukuran partikel hasil milling dianalisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) Horiba SZ-100. Pengujian digunakan untuk mendapatkan nilai rata-rata diameter partikel dari masing-masing variasi perlakuan.

Data hasil PSA selanjutnya dibandingkan antarvariasi untuk melihat kecenderungan perubahan ukuran partikel akibat perubahan rasio ruang kosong tabung terhadap material.

2.7 Karakterisasi Morfologi dan Komposisi Unsur

Morfologi material hasil milling diamati menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Pengamatan dilakukan pada pembesaran hingga 10.000 kali sebagaimana dokumentasi pengujian pada penelitian.

Selain morfologi, komposisi unsur material dianalisis menggunakan *Energy Dispersive X-ray* (EDX). Analisis EDX digunakan untuk mengetahui unsur-unsur kimia yang terdeteksi pada material hasil tumbukan.

2.8 Teknik Analisis Data

Data penelitian dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan hasil PSA, SEM, dan EDX pada setiap variasi rasio ruang kosong terhadap material.

Analisis PSA digunakan untuk membandingkan ukuran rata-rata partikel. Hasil SEM digunakan untuk mengamati perubahan morfologi dan tingkat homogenitas material. Sementara itu, EDX digunakan untuk mengidentifikasi unsur penyusun yang terdeteksi pada material hasil milling.

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dengan pendekatan komparatif. Eksperimen dilakukan dengan memberikan tiga kondisi parameter electroplating pada substrat besi, kemudian membandingkan karakteristik chromium dan respons spesimen terhadap media korosif.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil

3.1 Karakteristik Ukuran Partikel

Hasil pengujian PSA menunjukkan adanya perbedaan diameter rata-rata partikel pada setiap variasi rasio ruang kosong tabung terhadap material. Data hasil pengujian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian PSA

Rasio ruang kosong : material Diameter rata-rata partikel (nm)	
1:1	627,3
1:2	795,0
1:3	801,2
1:4	836,36

Berdasarkan Tabel 2, ukuran rata-rata partikel terkecil diperoleh pada rasio **1:1**, yaitu sebesar **627,3 nm**. Pada rasio 1:2, ukuran rata-rata meningkat menjadi 795 nm. Selanjutnya ukuran rata-rata mencapai 801,2 nm pada rasio 1:3 dan 836,36 nm pada rasio 1:4. Dengan demikian, berdasarkan data numerik PSA yang tersedia, peningkatan rasio ruang kosong terhadap material dari 1:1 menjadi 1:4 diikuti oleh peningkatan diameter rata-rata partikel. Kondisi 1:1 menghasilkan ukuran rata-rata paling kecil di antara empat variasi yang diuji.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi pengisian tabung berhubungan dengan efektivitas proses tumbukan. Pada kondisi 1:1, interaksi antara bola baja dan material selama proses milling menghasilkan reduksi ukuran yang lebih besar dibandingkan variasi lainnya berdasarkan hasil PSA.

Namun demikian, istilah “rasio ruang kosong terhadap material” perlu diperjelas kembali pada naskah final karena definisi volume aktual ruang kosong dan massa/volume material tidak disajikan secara kuantitatif dalam laporan sumber. Oleh karena itu, interpretasi mekanisme tumbukan perlu dipandang sebagai analisis berdasarkan kondisi pengujian, bukan sebagai hubungan matematis yang telah tervalidasi secara statistik.

3.2 Pengaruh Kondisi Pengisian terhadap Proses Tumbukan

Proses HEM mengandalkan tumbukan berulang antara media penggiling dan material. Efektivitas tumbukan dipengaruhi oleh ruang gerak bola dan material di dalam tabung. Perubahan jumlah material dapat mengubah pola gerakan media penggiling serta frekuensi kontak antara bola dengan material.

Pada rasio 1:1, hasil PSA menunjukkan ukuran partikel paling kecil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kombinasi ruang kosong dan jumlah material pada variasi ini memberikan kondisi tumbukan yang paling efektif dalam penelitian yang dilakukan.

Pada rasio 1:2 hingga 1:4, ukuran rata-rata partikel cenderung lebih besar. Hal ini dapat dikaitkan dengan perubahan pola tumbukan di dalam tabung sehingga proses fragmentasi material tidak menghasilkan ukuran rata-rata sekecil perlakuan 1:1.

Walaupun demikian, hubungan antara volume ruang kosong dan energi tumbukan sebaiknya tidak disimpulkan hanya berdasarkan empat titik pengujian. Penelitian lanjutan dengan pengukuran massa material, volume aktual ruang kosong, energi tumbukan, serta pengulangan pengujian diperlukan untuk mendapatkan hubungan yang lebih kuat.

3.3 Hasil Pengamatan Morfologi SEM

Pengamatan morfologi dilakukan menggunakan SEM dengan pembesaran sampai 10.000 kali. Hasil pengamatan terdiri atas empat variasi perlakuan, yaitu rasio 1:1, 1:2, 1:3, dan 1:4.

Pada rasio 1:1, material hasil milling menunjukkan tampilan yang relatif lebih homogen dibandingkan variasi lainnya. Kondisi tersebut sejalan dengan hasil PSA yang menunjukkan bahwa variasi 1:1 menghasilkan diameter rata-rata partikel paling kecil.

Ukuran partikel yang lebih kecil dapat menghasilkan luas permukaan relatif lebih besar dan meningkatkan kepadatan tampilan material pada bidang pengamatan SEM. Dalam penelitian ini, kondisi tersebut digunakan sebagai salah satu indikator untuk menjelaskan tampilan morfologi yang relatif lebih homogen.

Pada variasi rasio lainnya, morfologi material menunjukkan tingkat keseragaman yang berbeda. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa kondisi pengisian tabung memengaruhi proses fragmentasi dan distribusi ukuran partikel selama milling.

Tabel 3. Ringkasan karakteristik morfologi berdasarkan SEM

Rasio ruang kosong : material Hasil pengamatan umum	
1:1	Relatif lebih homogen
1:2	Homogenitas lebih rendah dibandingkan 1:1
1:3	Distribusi morfologi berbeda dari 1:1
1:4	Homogenitas relatif lebih rendah dibandingkan 1:1

Hasil tersebut memperlihatkan adanya kesesuaian antara pengukuran PSA dan pengamatan SEM, khususnya pada perlakuan 1:1 yang menghasilkan ukuran rata-rata paling kecil sekaligus tampilan morfologi yang relatif lebih homogen.

3.4 Analisis Komposisi Unsur Menggunakan EDX

Analisis EDX dilakukan untuk mengetahui unsur-unsur yang terdapat pada material hasil milling. Berdasarkan hasil pengujian, unsur karbon merupakan salah satu unsur utama yang terdeteksi. Kandungan karbon tertinggi yang dilaporkan dalam penelitian adalah **68,47% pada rasio 1:1**.

Tabel 4. Hasil utama analisis EDX

Parameter	Hasil
Perlakuan	Rasio 1:1
Siklus milling	2 juta siklus
Unsur utama yang dilaporkan Karbon	
Kandungan karbon tertinggi	68,47%

Tingginya kandungan karbon pada material hasil karbonisasi menunjukkan bahwa proses persiapan bahan menghasilkan material dengan karakter karbon yang cukup dominan. Hal ini sesuai dengan penggunaan arang daun bambu sebagai bahan awal.

Di sisi lain, bambu juga dikenal memiliki kandungan berbasis silikat. Oleh karena itu, arang daun bambu dapat dipertimbangkan sebagai bahan awal untuk pengembangan material yang mengandung karbon maupun material berbasis silika.

Namun, berdasarkan data EDX yang tersedia dalam naskah sumber, nilai kuantitatif seluruh unsur pada setiap variasi tidak dapat disajikan kembali karena tabel komposisi EDX pada dokumen berupa gambar dan angka lengkapnya tidak tersedia dalam teks. Oleh karena itu, klaim mengenai persentase silika secara kuantitatif tidak dimasukkan dalam artikel ini.

Hal ini penting untuk menjaga validitas ilmiah artikel. Pernyataan bahwa material “berpotensi sebagai sumber silika” dapat dipertahankan sebagai potensi berdasarkan literatur dan karakteristik bahan baku, tetapi tidak boleh diubah menjadi klaim bahwa penelitian ini telah menghasilkan silika dengan kemurnian tertentu tanpa data EDX lengkap atau analisis lanjutan.

3.5 Hubungan Ukuran Partikel, Morfologi, dan Komposisi

Ketiga karakterisasi yang digunakan memberikan informasi yang saling melengkapi. PSA memberikan informasi kuantitatif mengenai ukuran rata-rata partikel, SEM memberikan gambaran morfologi, sedangkan EDX memberikan informasi mengenai unsur yang terdeteksi.

Variasi 1:1 menunjukkan hasil paling menonjol dalam penelitian ini. Ukuran rata-rata yang diperoleh adalah 627,3 nm, yang merupakan nilai terkecil dibandingkan tiga variasi lainnya. Pengamatan SEM juga menunjukkan material yang relatif lebih homogen. Selain itu, kandungan karbon tertinggi yang dilaporkan melalui EDX, yaitu 68,47%, diperoleh pada variasi yang sama.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa perlakuan milling tidak hanya berkaitan dengan perubahan ukuran partikel, tetapi juga menghasilkan perubahan pada tampilan morfologi material. Namun, hubungan antara ukuran partikel dengan komposisi unsur tidak dapat disimpulkan sebagai hubungan sebab-akibat berdasarkan data yang tersedia.

Kandungan unsur yang diperoleh melalui EDX juga perlu dipahami sebagai hasil analisis pada area tertentu dari spesimen. Untuk memperoleh gambaran komposisi material secara lebih representatif, pengujian dapat dilakukan pada beberapa titik atau menggunakan analisis tambahan dengan metode yang sesuai.

3.6 Potensi Pemanfaatan Arang Daun Bambu Tutul

Hasil penelitian menunjukkan bahwa arang daun bambu tutul dapat direduksi ukurannya menggunakan HEM tipe shaker mill. Ukuran rata-rata terkecil yang diperoleh adalah 627,3 nm pada kondisi 1:1.

Walaupun ukuran tersebut masih berada pada skala submikrometer dan belum mencapai rentang nanopartikel 1–100 nm, hasil tersebut menunjukkan bahwa metode milling yang digunakan mampu menghasilkan reduksi ukuran yang signifikan dari bahan awal yang telah diayak 200 mesh.

Hal ini menjadi penting karena istilah “nanopartikel” dalam artikel ilmiah harus digunakan berdasarkan hasil pengukuran. Apabila hasil PSA menunjukkan ukuran rata-rata ratusan nanometer, material lebih tepat disebut sebagai material berukuran submikrometer atau partikel berukuran nanoskala tertentu, bukan langsung dinyatakan sebagai nanopartikel 1–100 nm.

Potensi material sebagai sumber karbon dan bahan awal material berbasis silika masih dapat dikembangkan. Untuk menghasilkan silika secara lebih spesifik, diperlukan tahapan lanjutan seperti proses ekstraksi, pemurnian, dan karakterisasi silika menggunakan metode yang sesuai.

Dengan demikian, hasil penelitian ini lebih tepat dipandang sebagai tahap awal karakterisasi dan pengolahan mekanik arang daun bambu tutul.

4. Kesimpulan

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa arang daun bambu tutul berhasil diproses menggunakan metode *High Energy Ball Milling* (HEM) tipe *shaker mill* pada kecepatan 1000 rpm selama 2 juta siklus menggunakan bola baja berdiameter 1/4 inci. Penerapan variasi rasio ruang kosong tabung terhadap material terbukti memengaruhi ukuran rata-rata partikel hasil *milling*. Berdasarkan data *Particle Size Analyzer* (PSA), ukuran rata-rata partikel terkecil dan reduksi ukuran paling efektif diperoleh pada rasio 1:1 yaitu sebesar **627,3 nm**, dibandingkan dengan rasio 1:2 (795 nm), 1:3 (801,2 nm), dan 1:4 (836,36 nm). Efektivitas kondisi 1:1 ini didukung oleh pengamatan *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang memperlihatkan morfologi partikel yang relatif lebih homogen, serta hasil pengujian *Energy Dispersive X-ray* (EDX) yang mencatat kandungan unsur karbon tertinggi mencapai **68,47%**. Meskipun material hasil penelitian ini belum dapat dikategorikan secara langsung sebagai nanopartikel murni karena ukuran rata-ratanya yang masih berada di atas rentang 1–100 nm (yaitu berkisar antara 627,3–836,36 nm), arang daun bambu tutul ini tetap menunjukkan potensi besar sebagai bahan awal untuk pengembangan material berbasis karbon maupun material berbasis silika. Namun, diperlukan data EDX yang lebih lengkap serta karakterisasi lanjutan untuk menyatakan kandungan atau kemurnian silika tersebut secara kuantitatif.

4.2 Saran

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, diperlukan pengulangan eksperimen pada setiap variasi guna memperoleh nilai rata-rata dan simpangan baku agar pengaruh parameter rasio ruang kosong dapat dianalisis secara statistik. Pengukuran juga sebaiknya dilengkapi dengan data kuantitatif mengenai massa material, volume aktual ruang kosong, jumlah bola baja, dan kondisi pengisian tabung (*filling ratio*) untuk menjelaskan korelasi antara kondisi mekanis tabung dan mekanisme tumbukan partikel secara lebih kuat. Bagi pengembangan material berbasis silika, penelitian ke depan dapat diarahkan pada proses ekstraksi dan pemurnian silika dari arang atau abu daun bambu tutul yang diikuti dengan karakterisasi komprehensif menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Fourier-Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Terakhir, apabila orientasi utama penelitian adalah memproduksi nanopartikel murni, modifikasi proses *milling* perlu dilakukan melalui perluasan variasi jumlah siklus, kecepatan putaran, ukuran bola penghancur, serta rasio pengisian yang lebih optimum hingga diperoleh ukuran partikel yang benar-benar masuk dalam skala nanometer.

Referensi

- [1] G. F. Agung, M. R. Hanafie, and P. Mardina, "Ekstraksi silika dari abu sekam padi dengan pelarut KOH," *Konversi*, vol. 2, no. 1, pp. 28–31, 2013.
- [2] Charomaini, *Budidaya Bambu Jenis Komersial*. Bogor, Indonesia: Institut Pertanian Bogor, 2013.
- [3] G. Chen, G. Du, W. Ma, B. Yan, Z. Wang, and W. Gao, "Production of amorphous rice husk ash in a 500 kW fluidized bed combustor," *Fuel*, vol. 144, pp. 214–221, 2015.
- [4] R. Fajarin, H. Purwaningsih, D. Susanti, and R. Kurnia, "Milling time and temperature dependence on Fe₂TiO₅ nanoparticles synthesized by mechanical alloying method," in *Proc. 3rd Int. Conf. Theoretical and Applied Physics*, 2014, pp. 63–66.
- [5] C. Falco, M. Sieben, N. Brun, M. Sevilla, T. Van der Maelen, E. Morallón, and D. Cazorla-Amorós, "Hydrothermal carbons from hemicellulose-derived aqueous hydrolysis products as electrode materials for supercapacitors," *Carbon*, vol. 62, pp. 374–382, 2013.
- [6] A. M. Ghrair and J. Ingwersen, "Nanoparticulate zeolitic tuff for immobilizing heavy metals in soil: Preparation and characterization," *Appl. Geochem.*, vol. 24, no. 1, pp. 155–168, 2009.
- [7] Herminiwati, S. Waskito, C. M. H. Purwanti, Prayitno, and D. Ningsih, "Pembuatan bahan penyamak nano nabati dan aplikasinya dalam penyamakan kulit," *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*, vol. 31, no. 1, pp. 15–22, 2015.
- [8] Hosokawa, "Mechanical milling: A top-down approach for the synthesis of nanomaterials and nanocomposites," in *Powder Technology: Handbook*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2007, pp. 7–42.
- [9] Joharwan and Supriyono, "Produksi nanopartikel arang bambu wulung dengan menggunakan High Energy Milling (HEM) model shaker mill," *J. Tek. Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 1–5, 2017.
- [10] A. Kumar, T. Vlach, L. Laiblova, M. Hroudá, B. Kasal, J. Tywoniak, and P. Hajek, "Engineered bamboo scrimber: Influence of density on the mechanical and water absorption properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 115, pp. 815–827, 2016.

-
- [11] R. Martien, Adhyatmika, I. D. K. Irianto, V. Farida, Dian, and P. Sari, "Technology developments nanoparticles as drug," *Majalah Farmaseutik*, vol. 8, no. 1, pp. 133–144, 2012.
- [12] A. Muhriz, A. Subagio, and Pardoyo, "Pembuatan zeolit nanopartikel," *J. Kim. Sains*, vol. 14, no. 2, pp. 45–50, 2011.
- [13] J. B. Rao, G. J. Catherin, I. N. Murthy, D. V. Rao, and B. N. Raju, "Production of nano structured silicon carbide by high energy ball milling," *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 82–88, 2011.
- [14] A. Rasyidi and F. Hasfita, "Sintesis molibdenum oksida berpenyangga silika sebagai katalis pada reaksi oksidasi etanol menjadi asetaldehida," *J. Tek. Kim. Ikat. Alumni*, vol. 1, no. 2, pp. 23–26, 2015.
- [15] H. Sa'diyah, S. Nurhimawan, S. A. Fatoni, Irmansyah, and Irzaman, "Ekstraksi silikon dioksida dari daun bambu," in *Pros. Sem. Nas. Fis. (E-Journal)*, vol. 5, 2016, pp. 13–16.
- [16] F. G. Salihati and H. Ardhyananta, "Studi pembuatan karbon hitam dari bambu ori (*Bambusa arundinacea*) dan bambu petung (*Dendrocalamus asper*)," *J. Tek. Pomits*, vol. 2, no. 1, pp. 1–6, 2013.
- [17] J. Schuster, G. He, B. Mandlmeier, T. Yim, K. T. Lee, B. Bein, and L. F. Nazar, "Spherical ordered mesoporous carbon nanoparticles with high porosity for lithium–sulfur batteries," *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 51, no. 15, pp. 3591–3595, 2012.
- [18] B. Sharma, A. Gatóo, M. Bock, and M. Ramage, "Engineered bamboo for structural applications," *Constr. Build. Mater.*, vol. 81, pp. 66–73, 2015.
- [19] S. A. Sulandari, L. Susita, and D. Murwani, "Studi fabrikasi isolator silikon dioksida (SiO_2) berbasis lapisan tipis menggunakan teknik plasma," *J. Fis. Lensa*, vol. 1, no. 2, pp. 2–5, 2013.
- [20] T. B. Waluyo and N. T. Rochman, "Pembuatan partikel nano Fe_2O_3 dengan kombinasi ball-milling dan ultrasonic-milling," *J. Sains Mater. Indones.*, vol. 14, no. 3, pp. 48–51, 2013.
-



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)