

STUDI MIKROSTRUKTUR SERBUK NANO KARBON HASIL PROSES *BALL MILLING* DENGAN METODE (*SCANNING ELECTRON MICROSCOPY*) SEM

Muhammad Ainur Rosiqin¹, Dewi Puspitasari^{2*}, Andita Nataria Fitri Ganda³,

^{1,2,3,4}Teknik Mesin, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia 60231

E-mail: dewipuspitasari@unesa.ac.id

Abstrak : Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik mikrostruktur dan komposisi unsur serbuk nano karbon hasil proses ball milling menggunakan metode Scanning Electron Microscopy dan Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX). Proses penggilingan dilakukan menggunakan mesin ball mill tipe horizontal dengan parameter waktu milling 6 jam dan kecepatan putar 140 rpm, yang dipilih berdasarkan hasil terbaik dari pengujian sebelumnya. Material karbon digiling menggunakan kombinasi bola zirconia dengan variasi ukuran untuk meningkatkan efektivitas proses kominusi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses ball milling mampu mereduksi ukuran partikel karbon secara signifikan hingga orde nano dengan nilai size reduction sebesar 89,8%. Citra SEM memperlihatkan perubahan morfologi partikel menjadi lebih pipih, tipis, dan tidak beraturan, yang mengindikasikan terjadinya mekanisme pengelupasan mekanis selama proses milling. Analisis EDX menunjukkan bahwa unsur karbon (C) merupakan unsur dominan, disertai keberadaan unsur minor seperti O, Mn, Fe, dan Zn yang diduga berasal dari proses preparasi dan interaksi mekanis selama penggilingan. Secara keseluruhan, kombinasi parameter milling 6 jam dan 140 rpm dinilai efektif dalam menghasilkan serbuk nano karbon dengan karakteristik mikrostruktur yang baik dan berpotensi untuk aplikasi material berbasis karbon.

Abstract: This study investigates the microstructural characteristics and elemental composition of nano carbon powder produced through a ball milling process using Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX). The milling process was conducted using a horizontal ball mill with a milling time of 6 hours and a rotational speed of 140 rpm, selected based on the optimal parameters obtained from prior analysis. Carbon material was milled using a combination of zirconia balls with various diameters to enhance the comminution efficiency. The results indicate that the ball milling process significantly reduced the particle size to the nanoscale, achieving a size reduction value of 89.8%. SEM observations revealed that the carbon particles exhibited thin, flaky, and irregular morphologies, indicating the occurrence of mechanical exfoliation during milling. EDX analysis confirmed that carbon (C) was the dominant element, accompanied by minor elements such as O, Mn, Fe, and Zn, which are attributed to mechanical interactions and sample preparation processes. Overall, the milling parameters of 6 hours and 140 rpm were found to be effective in producing nano carbon powder with favorable microstructural characteristics for potential carbon-based material applications.

Keywords: Ball Mill, Karbon-Graphene, Microstructure, SEM- EDX

© 2025, JRM (Jurnal Rekayasa Mesin) dipublikasikan oleh ejournal Teknik Mesin Fakultas Vokasi UNESA.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi material menuntut hadirnya material dengan karakteristik khusus yang mampu memenuhi kebutuhan aplikasi industri. Serbuk karbon merupakan salah satu material yang banyak digunakan pada berbagai bidang seperti elektrokimia, metalurgi serbuk, industri energi, dan material komposit. Kinerja material tersebut sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel, morfologi, serta mikrostruktur permukaannya. Oleh karena itu, proses penghalusan dan rekayasa struktur partikel menjadi aspek penting dalam menghasilkan material serbuk berkualitas tinggi [1].

Material dalam orde nano memiliki jumlah atom yang lebih banyak sehingga meningkatkan luas permukaan spesifiknya serta menunjukkan

keunggulan mekaniknya [2]. Dengan demikian, diperlukan upaya untuk memperkecil ukuran material hingga skala nano sebagai solusi tantangan dan kebutuhan global. Selain itu, aspek keberlanjutan juga menjadi perhatian utama dalam pengembangan material baru dengan fokus pada material ramah lingkungan [3]. Salah satu pemanfaatan teknologi material yaitu dalam proses *milling*. Proses *milling* merupakan metode yang umum digunakan untuk memperkecil ukuran partikel material padat menjadi serbuk halus menggunakan bantuan *ball miller* [4].

Karbon memiliki beragam alotrop penyusun yang membentuk struktur terikat yang kuat. Hal tersebut menjadikan karbon sebagai material yang relatif sulit untuk diperkecil ukurannya [3]. Proses kominusi (*size reduction*) menggunakan metode *ball*

milling sangat tepat digunakan untuk menggiling material yang memiliki karakteristik seperti karbon [5]. Hal tersebut karena metode ini sangat fleksibel diterapkan menggunakan pendekatan *dry milling* maupun *wet milling*. Sifat fisik dan kimia dari material karbon juga banyak dipengaruhi oleh parameter operasional mesin *ball mill* [4] dan [6].

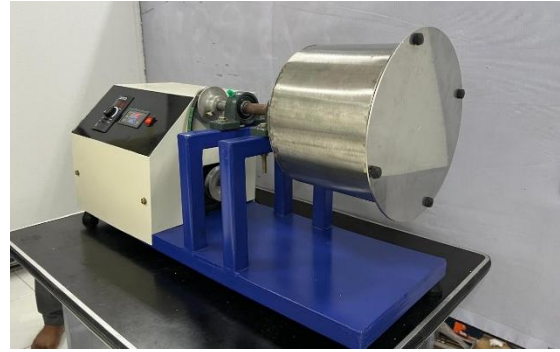
Beberapa studi sebelumnya mengkaji secara mendalam bagaimana keadaan mikrostruktur serta kuantitas kadar karbon grafit yang mempengaruhi distribusi partikel pengisi pada skala mikroskopis, yang sejatinya sangat menentukan performa fungsional komposit. Sebagai salah satu metode karakterisasi, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dapat mengamati morfologi permukaan dan struktur mikro dari material karbon. SEM bekerja berdasarkan prinsip hamburan balik sinar elektron yang dipantulkan kembali oleh permukaan sampel yang pada akhirnya ditangkap menjadi citra resolusi tinggi. Analisa *Energy Dispersive X-Ray* (EDX) memungkinkan identifikasi unsur-unsur kimia penyusun material dan dapat melakukan pemetaan unsur (*elemental mapping*). Keduanya dapat terintegrasi secara bersamaan untuk melihat karakteristik morfologi karbon.

Dari beberapa uraian penelitian di atas tentang Analisa mikrostruktur material berbasis karbon, penting untuk menetapkan parameter operasi yang optimal, sehingga kualitas produk karbon dapat ditingkatkan dan mencapai karakteristik unggulnya. Pemanfaatan SEM-EDX dalam penelitian material nano karbon bertujuan untuk memperoleh Gambaran morfologi, keseragaman ukuran, dan kandungan unsur yang berkontribusi terhadap kualitas karbon grafit. Dengan demikian, penggunaan metode *Scanning Electron Microscopy* dan *Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) menjadi langkah penting dalam karakterisasi struktur mikro dan komposisi kimia karbon-grafit, guna mendukung pengembangan aditif material dan memiliki performa tinggi untuk aplikasi rekayasa termal.

DASAR TEORI

Ball Mill

Ball mill merupakan salah satu alat mekanis yang umum digunakan untuk mereduksi ukuran material. Metode *ball milling* menggunakan bantuan *ball miller* berupa bola untuk memperkecil ukuran partikel material padat menjadi serbuk hingga orde nano [7]. Metode ini memanfaatkan energi kinetik tumbukan dan gesekan dari bola-bola penghancur yang bergerak tak beraturan di dalam silinder berputar. Mekanisme tersebut menyebabkan material mengalami deformasi plastis, retakan, hingga pengelupasan lapisan. Terdapat beberapa jenis *ball mill* seperti horizontal *ball mill*, vertikal *ball mill*, dan *planetary ball mill* [8]. Tipe horizontal digunakan karena di samping konstruksi rangkanya yang sederhana, juga mempunyai stabilitas putaran yang baik saat digunakan dalam skala laboratorium maupun skala industri seperti terlihat pada gambar berikut.



Gambar 1. Mesin Ball Mill Tipe Horizontal (dokumentasi pribadi 2025)

Proses penggilingan serbuk menggunakan mesin *ball mill* dapat dilakukan dengan cara kering (*dry process*) dan cara basah (*wet process*). *Dry process* dalam *ball mill* berarti proses *milling* dilakukan dalam kondisi kering atau tanpa bantuan cairan pelarut [9]. Model ini biasa digunakan ketika menggiling material yang sensitif terhadap cairan, seperti pada industri semen. *Dry milling* memiliki keunggulan pada kesederhanaan prosesnya karena tidak membutuhkan proses tambahan untuk pemisahan material dengan pelarut seperti pada *wet milling*. Sedangkan penggilingan metode basah membutuhkan cairan pelarut sebagai media tambahannya. Pelarut yang biasa digunakan dalam proses wet milling seperti, air, etanol, isopropanol, dan toluene [10]. Dalam proses tersebut cairan bertindak sebagai pelumas, pendingin, sekaligus media dispersi partikel yang digiling. Metode *wet milling* biasanya digunakan untuk menggiling material yang mudah terdegradasi oleh panas, serta ketika hasil akhir yang diinginkan dalam bentuk cairan (*slurry*) [4] dan [5].

Karbon

Karbon merupakan salah satu unsur yang memiliki banyak alotrop penyusun, seperti grafit, graphene, karbon amorf, dan karbon nanotube[2]. Sifat unik karbon terletak pada kemampuan atomnya untuk membentuk ikatan kovalen yang kuat, sehingga menghasilkan material dengan beragam struktur dan sifat fisik. Grafit, misalnya, terdiri dari lapisan-lapisan graphene dengan struktur heksagonal yang tersusun rapat membentuk ikatan (sp^2) [11]. Lapisan ini memiliki ikatan kovalen yang kuat pada bidang dua dimensi sehingga cocok untuk dijadikan material aditif yang meningkatkan performa material lainnya. Karbon juga memiliki sifat konduktivitas listrik dan termal yang tinggi, kekuatan mekanis yang baik, serta kestabilan kimia, sehingga banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi. Secara fisik material karbon memiliki tampak hitam pekat dengan sedikit warna mengkilat pada permukaannya, seperti terlihat pada gambar 2 berikut.

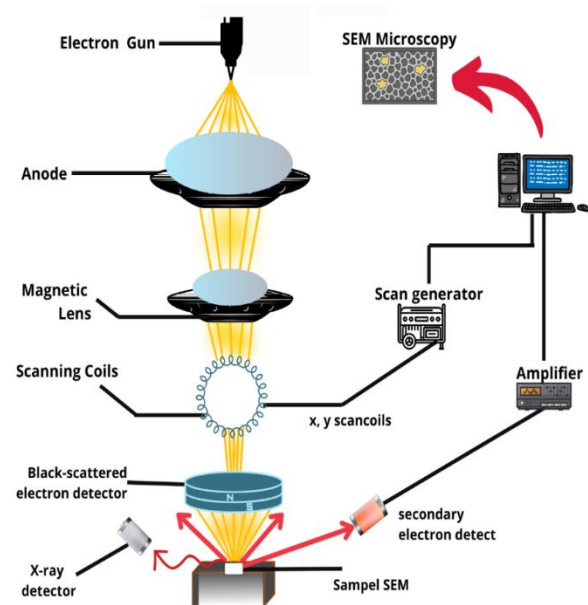


Gambar 2. Karbon Roods Setelah Proses *Crushing* (dokumentasi pribadi 2025)

Scanning Electron Microscopy (SEM-EDX)

Scanning electron Microscopy (SEM) adalah metode yang umum digunakan untuk melihat morfologi atau bentuk spesifik dari sebuah material. Dengan memanfaatkan prinsip mikroskop *electron* metode SEM dapat mengamati suatu serbuk yang memiliki ukuran partikel mikron hingga nanometer. SEM memiliki rentan perbesaran yang beragam mulai dari 10 – 3.000.000 kali, dan memiliki resolusi yang baik. Kemampuan melihat kedalaman bidang fokus (*depth of field*) metode SEM juga sangat baik yaitu berada di rentan 4 – 0.4 mm. Kombinasi dari perbesaran yang tinggi dan dof yang besar membuat metode SEM memiliki kemampuan untuk mengetahui komposisi dan informasi kristalografi sehingga banyak digunakan untuk keperluan penelitian dan industri.

Dalam penggunaan metode SEM untuk pengamatan serbuk diperlukan persiapan sampel yang baik, agar morfologi yang ditangkap terlihat jelas dan partikel tidak saling bertumpuk (Huang dkk., 2022). Secara sederhana prinsip kerja dari SEM yaitu saat permukaan material yang di lapisi terkena elektron akan dipantulkan kembali dengan elektron sekunder ke segala arah. Selanjutnya detektor akan mendeteksi dan menerima pantulan elektron yang selanjutnya ditentukan lokasi berkas elektron dan di analisis. Hasil *scan* ini tersinkronisasi dengan tabung sinar katoda dan gambar sampel akan tampak pada area yang di *scan*. Tingkat kontras yang tampak pada tabung sinar katoda timbul karena hasil refleksi yang berbeda-beda dari sampel seperti ditunjukkan pada gambar 3. berikut.



Gambar 3. Mekanisme Pengujian SEM-EDX (dokumentasi pribadi 2025)

Nilai pengurangan ukuran partikel dalam proses *ball milling*, juga dapat dipaparkan dari hasil pengujian SEM, dan dapat dimasukkan pada persamaan berikut.

$$SR = \frac{(A_0 - A_1)}{A_0} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan :

SR = Persentase reduksi (%)

A_0 = rata-rata ukuran awal serbuk (μm)

A_1 = rata-rata ukuran akhir serbuk (μm)

METODE

Alat dan Bahan

Mesin *ball mill* tipe horizontal kapasitas mill jarr 5 liter dengan kemampuan putar antara 50-270 rpm digunakan dalam penelitian ini. Juga digunakan alat pendukung penelitian seperti: digital *tachometer*, timbangan analitik, gelas beker, *sieve mesh* 50 dan *mesh* 100 serta alat pendukung lainnya. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah karbon (C) dengan bentuk struktur awal silinder berdiameter 10 mm dan panjang 300 mm. Sedangkan jenis bola penghancur yang digunakan untuk proses *ball milling* material yaitu jenis *zirconia balls* (ZrO_2) yang mempunyai nilai densitas material 6,0-6,06 g/cm³. Variasi ukuran *zirconia balls* juga digunakan dalam penelitian kali ini dengan ukuran yaitu mulai 0,8-1 mm; 6 mm dan; 10mm

Tabel 1. Sifat dan Karakteristik Material Karbon

KANDUNGAN MATERIAL KARBON						
Raw Karbon	Karbon (C)	Hidrogen (H)	Oksigen (O_2)	Nitrogen (N)	Sulfur (S)	Abu
on	80-100%	0-5 %	0-10 %	<1 %	<1 %	<1 %

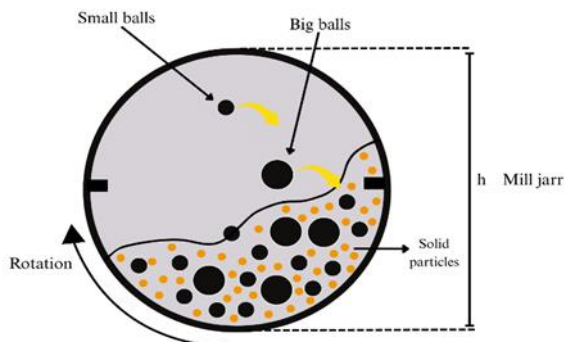
Tabel 2. Sifat Mekanik Zirconia Ball

Variasi Ukuran (mm)	SIFAT MEKANIK ZIRCONIA BALL				
	Bahan	Massa Jenis (g/cm ³)	Massa Satuan Bola (g)	Asumsi Porositas (%)	Kekerasan (kg/mm ²)
0,8-1	Zirconia (ZrO ₂)	6,02	3,25	1-5 %	≥1250
6		6,02	0,8	1-5 %	≥1250
10		6,02	0,1	1-5 %	≥1250

Prosedur Penelitian

Penelitian ini menganalisis faktor hasil *ball milling* yaitu lama penggilingan dan kecepatan putar. Sampel serbuk karbon menggunakan parameter terbaik dari 2 faktor *ball milling* tersebut yang didasarkan lagi pada hasil pengujian *Particle Size Analyzer* (PSA) pada penelitian sebelumnya oleh penulis. Parameter *ball milling* yang digunakan pada penelitian ini yaitu dengan waktu *milling* 6 jam dan kecepatan putarnya 140 rpm. Dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali, sehingga diperoleh 3 satuan percobaan. Material sebelumnya telah dilakukan *preparation* dengan metode *crushing* hingga didapati pada *sieve mesh* 50 atau berkisar 298 μm . Perbandingan massa material karbon (C) dan massa bola penghancur zirconia yang dipakai adalah 5 : 47, yaitu 25 gram massa karbon (C) dan 235 gram total bola zirconia. Setiap satuan percobaan akan dilakukan dengan 2 tahapan yaitu dimulai dengan bola penumbuk berdiameter 6 mm dan 10 mm, selanjutnya ditambahkan bola berdiameter 0,8-1 mm.

T6-V140 : Penggilingan total waktu 6 jam dengan kecepatan putar 140 rpm.



Gambar 4. Ilustrasi momen tumbukan pada horizontal ball mill terhadap material uji. (dokumentasi pribadi 2025)

Selanjutnya dilakukan pengamatan pada hasil akhir penggilingan karbon (C) dan dilakukan proses fraksinasi/pemisahan dengan *sieve mesh* 100. 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 waktu terhadap kapasitas produksi mesin *ball mill*. Selanjutnya uji karakterisasi model *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan *kesampil* untuk dianalisis morfologinya. Hasil akhir

karakterisasi dianalisis dengan perbandingan laju grafik menggunakan program Origin Lab.

Metode Karakterisasi

Scanning Electron Microscopy (SEM)

Pengujian ini dilakukan menggunakan alat SEM tipe *Thermo Scientific-Phenom ProX* terlihat pada gambar 5. dan dilakukan pada tegangan percepatan 15 kV. Mesin ini mempunyai rentang pembesaran optik elektron 160-350.000 kali. Sampel karbon sebelumnya dilakukan *preparation* dan di lapisi menggunakan material Au untuk memperjelas tangkapan objek yang dianalisis. Untuk dapat melihat bentuk morfologi dari serbuk karbon, pengujian SEM dilakukan dalam rentan perbesaran 5000-50.000 kali. Analisis *Energy Dispersive X-Ray* (EDX) juga dilakukan untuk mengidentifikasi dan menganalisis komposisi unsur dari sampel serbuk yang diamati, sehingga juga dapat menunjukkan kemungkinan adanya partikel pengotor (gangue). Pengujian model SEM diharapkan dapat memberikan gambaran langsung mengenai pengaruh dari proses *ball milling* dalam menghasilkan karakteristik struktur mikro serbuk karbon grafit.



Gambar 5. Mesin Uji SEM *Thermo Scientific* (Dokumentasi Pribadi)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan dalam penelitian ini dibagi menjadi 2 poin yaitu (i) pengaruh parameter proses *ball milling* terhadap kapasitas hasil penggilingan *ball mill*, (ii) karakterisasi serbuk hasil penggilingan material karbon menggunakan pendekatan *Scanning Electron Microscopy* (SEM-EDX).

Pengaruh Parameter Waktu Terhadap Kapasitas Hasil Penggilingan

Serbuk hasil penggilingan dari *ball mill* kemudian disaring menggunakan *sieve mesh* 100 untuk memperoleh fraksi serbuk yang dapat ditimbang massanya. Secara makroskopis, bola-bola penggiling berdiameter 6 mm dan 10 mm tampak berwarna hitam dengan permukaan yang masih berkilau metalik. Kondisi ini menunjukkan bahwa serbuk karbon tidak menempel pada permukaan bola maupun dinding tabung, sehingga keduanya dapat dipisahkan dengan mudah, seperti terlihat pada (Gambar 6).



Gambar 6. Proses Setelah Ball Milling dengan Mesh 100

Berdasarkan eksperimen *ball milling* dengan parameter waktu *milling* 6 jam dan kecepatan putar 140 rpm., diperoleh data hasil penggilingan serbuk sebagai berikut.

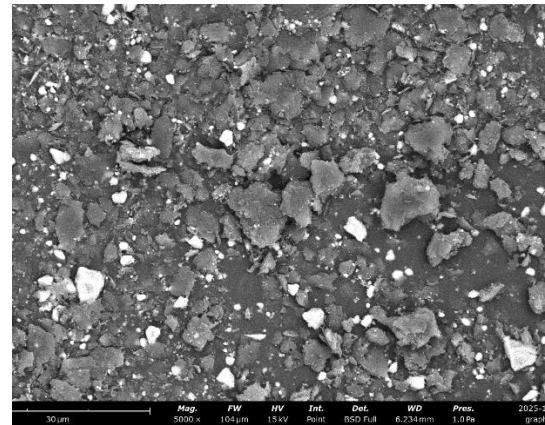
Tabel 3. Data Kapasitas Hasil Produksi Serbuk

Nomer Percobaan	Variasi Bola	Berat Produksi (gr)	Rata-rata Hasil (gr)
1	0,8-1; 6; dan 10 mm	14,520	14,045
2		13,750	
3		13,860	

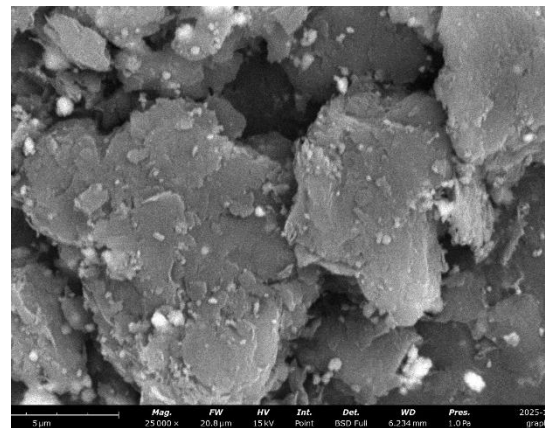
Hasil penelitian pada tabel 3. Menunjukkan bahwa dengan parameter *milling* dan berat sampel yang sama mempunyai hasil serbuk yang relatif konstan. Hasil *milling* menggunakan mesin *ball mill* tipe horizontal pada percobaan 1, 2, dan 3 diambil rata-rata sehingga didapatkan hasil akhir *milling* (gr). Percobaan 1 dengan menghasilkan serbuk dengan berat terbesar yaitu 14,520 gram. Hal ini dapat diartikan bahwa seberat 58,08 % material karbon grafit berhasil di *milling* dan telah lolos pada *mesh* 100. Hasil produksi sedikit menurun pada percobaan *milling* ke 2 dan ke 3 namun nilainya tidak terlalu jauh karena memiliki indeks perbedaan yaitu 2,86. Percobaan ke 2 menghasilkan serbuk sebesar 13,750 dan percobaan 3 menghasilkan 13,860 gram.

Karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Uji karakterisasi model SEM digunakan untuk mengetahui bentuk morfologi dari serbuk karbon setelah dilakukan proses *ball milling*. Pada penelitian ini pengujian SEM dilakukan 1x pada variabel terbaik menurut uji PSA. Sehingga berdasarkan hasil analisis uji PSA didapatkan percobaan W2-6 dengan parameter waktu 6 jam dan kecepatan putar 100 rpm dipilih menjadi sampel untuk dilakukan uji model SEM.



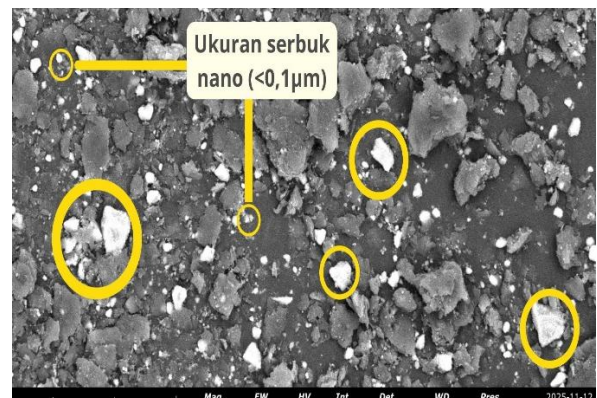
(a)



(b)

Gambar 7. Hasil Uji SEM Material Karbon W2-6 (a) perbesaran 5000x, dan (b) perbesaran 25.000x

Citra pengujian SEM dilakukan dengan 2 variasi perbesaran yaitu 5000x dan 25.000x serta dilakukan pada titik lokasi yang berbeda. Dapat terlihat pada perbesaran 5000x serbuk yang lebih kecil cenderung lebih banyak dibandingkan pada perbesaran 25.000x. Pada gambar 7.(b) terlihat masih banyak serbuk karbon yang saling menumpuk sehingga memiliki luas permukaan yang lebih besar dan saling menempel. Untuk memperjelas kondisi morfologi dan hasil sebaran pada serbuk karbon dapat kita lihat kembali dalam gambar berikut.



Gambar 8. Citra SEM serbuk nano karbon W2-6

Pada perbesaran SEM citra 5000 hingga 25.000x (lihat gambar) terlihat jelas bahwa serbuk memiliki warna yang unik. Serbuk karbon terlihat memiliki warna transparan dan putih mengkilat. Hal ini menunjukkan bahwa serbuk telah sampai pada lapisan paling tipisnya. Serbuk dengan karakteristik tersebut juga mempunyai luas permukaan yang sangat kecil yaitu dalam orde nano. Berdasarkan kriteria serbuk yang didapatkan, proses ball milling dikatakan berhasil untuk melakukan kerja pengelupasan mekanis karena dapat mencapai lapisan paling tipis dari kristal karbon.

Analisis Kandungan Unsur Model EDX

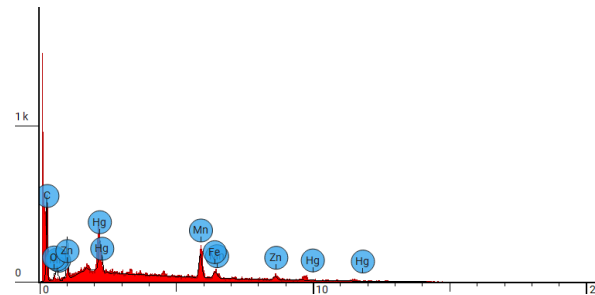
Setelah dilakukan analisis morfologi dan ukuran partikel menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), tahap selanjutnya dalam penelitian ini adalah analisis komposisi unsur dari material rod karbon hasil proses *ball milling* menggunakan metode *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDX). Analisis EDX berfungsi sebagai metode pendukung untuk melengkapi hasil SEM, khususnya dalam mengevaluasi unsur pembangun yang terkandung dalam serbuk dan memberikan distribusi *mapping* unsur-unsur dominan pada permukaan karbon. Data hasil EDX akan diuraikan pada gambar dan tabel berikut.

Tabel 4. Kandungan Unsur Sampel Karbon setelah di milling 6 jam 140

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
6	C	Carbon	75,71	31,26
8	O	Oxygen	0,0	0,0
25	Mn	Manganese	12,58	23,77
26	Fe	Iron	3,12	5,9
30	Zn	Zinc	4,35	9,79
80	Hg	Mercury	4,22	29,17

Pada tabel 4. terlihat material karbon setelah dilakukan proses milling pada waktu 6 jam dengan kecepatan putar 140 rpm memiliki beberapa kandungan unsur seperti C, Mn, Fe, Zn, dan Hg. Unsur carbon (C) menjadi atom paling dominan dengan jumlah atom 75,7% dan berat 31,2% dari total sampel uji SEM-EDX. Kandungan oksigen masih belum terlihat pada titik pertama. Unsur mangan (Mn) memiliki persentase berat 23,77% dilanjutkan dengan unsur Zn (9,7%) dan Fe (5,9%) sampel EDX. Kemunculan unsur merkuri (Hg) pada hasil EDX tidak secara langsung mengindikasikan keberadaan Hg sebagai unsur penyusun utama material. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh artefak EDX atau kontaminasi permukaan kuvet selama preparasi sampel. Meskipun jumlah atom unsur Hg relatif sedikit, unsur ini memiliki persentase berat (wt%) yang besar karena massa atomnya tinggi dan tergolong logam berat. Oleh karena itu, keberadaan Hg

pada hasil EDX tidak dijadikan parameter utama dalam pembahasan komposisi material karbon hasil *ball milling*.



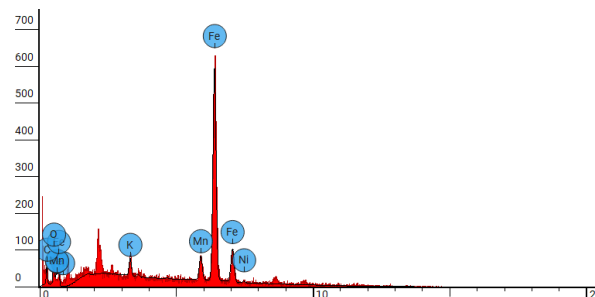
Gambar 9. Hasil Mapping Unsur Titik 1 Serbuk Karbon

Pada analisis EDX dititik kedua, ditemukan beberapa unsur baru yang sebelumnya belum muncul pada titik pertama. Secara lengkap unsur pembangun dijabarkan pada tabel 9 berikut.

Tabel 5. Kandungan Unsur Titik 2 Sampel Karbon setelah di milling 6 jam 140

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
6	C	Carbon	42,83	19,58
8	O	Oxygen	26,24	15,98
25	Mn	Manganese	2,43	5,09
26	Fe	Iron	26,13	55,54
28	Ni	Nickel	0,40	0,89

Analisis EDX pada titik kedua memperlihatkan beberapa unsur pembangun seperti C, O, Mn, Fe, dan Ni. Atom karbon masih mendominasi berdasarkan persentase jumlah atomnya yaitu 42,83% meskipun persentase beratnya kalah dengan unsur Fe yang termasuk logam berat. Ditemukan adanya kandungan oksigen (O) dengan persentase atom 26,24% dan jumlah (wt%) 15,98 % berat sampel EDX. Unsur Mn memiliki persentase berat (wt%) yang konsisten seperti pada titik pertama yaitu 5,09% dari berat sampel. Unsur nikel (Ni) juga muncul pada pengamatan EDX dititik kedua dengan kuantitas kandungan yang sangat kecil, yaitu 0,89 % berat sampel.



Gambar 10. Hasil Mapping Unsur Titik 1 Serbuk Karbon

Keberhasilan dalam proses penghalusan atau pengurangan ukuran serbuk karbon *Size Reduction (SR)* dari ukuran awal hingga ukuran terbesar uji SEM (30 µm) dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$SR = \frac{(A_0 - A_1)}{A_0} \times 100\%$$

$$SR = \frac{(297 - 30)}{297} \times 100\%$$

$$SR = 89,8 \%$$

Dimana :

SR = Persentase reduksi (%)

A₀ = rata-rata ukuran awal serbuk (µm)

A₁ = rata-rata ukuran akhir serbuk (µm)

SIMPULAN

Dari hasil penelitian yang sudah terlaksana mengenai hasil penggilingan serbuk karbon menggunakan *ball mill* tipe horizontal melalui variasi parameter waktu operasi terhadap tingkat kehalusan dan morfologi didapatkan Kesimpulan sebagai berikut.

- Temuan penelitian memperlihatkan bahwa perubahan pada parameter waktu *milling* memberikan dampak terhadap kuantitas serbuk yang dihasilkan serta pola distribusi ukuran partikelnya.
- Parameter operasi *ball mill* terhadap kapasitas produksi serbuk karbon tertinggi, ada pada percobaan pertama dengan kapasitas serbuk yang berhasil lolos *mesh* 100 yaitu 14,52. gram atau 48,4% dari sampel awal. Pada percobaan ke dua dan tiga kuantitasnya sedikit menurun, namun secara keseluruhan memiliki hasil rata-rata serbuk 14,045 gram.
- Kombinasi parameter *milling* yaitu 6 jam 140 rpm menghasilkan morfologi yang baik. Hasil uji *Scanning Electron Microscopy (SEM)* menyimpulkan proses *ball milling* berhasil melakukan penghancuran mekanik dan mengubah struktur partikel menjadi lebih pipih dan tipis dengan bentuk irregular bersudut. Analisis software ImageJ dan Origin Lab juga menjelaskan bahwa sampel mempunyai normalitas data yang baik dengan nilai indeks *R-Square (R²)* yaitu 0,970. Sedangkan pendekatan model *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX)* menunjukkan bahwa unsur pembangun serbuk didominasi oleh karbon (C) dengan persentase berat (wt %) yaitu 31,26. Unsur oksigen (O) juga muncul dengan nilai wt% 15,98

seta beberapa unsur logam lainnya seperti *Manganese (Mn)*, *Iron (Fe)*, dan *Zinc (Zn)*. Mekanisme proses *ball milling* juga berhasil mereduksi material karbon dengan nilai *Size Reduction (SR)* yaitu sebesar 89,8 % sehingga parameter kombinasi ini (6 jam 140 rpm) layak dijadikan sebagai rekomendasi parameter *milling* terbaik untuk komposisi material berbasis karbon.

REFERENSI

- [1] Suhendi, Jaim, and D. Suryaman, "Pembuatan Partikel Nano Fe₂O₃ Dengan Ultrasonik-Milling," *J. Tek. Mesin*, vol. 2, no. 2, pp. 20–26, 2021.
- [2] N. Muchlisha, D. M. Widjonarko, and T. E. Saraswati, "Sintesis Carbon Nanofoam dan Karakteristiknya," *ALCHEMY J. Penelit. Kim.*, vol. 19, no. 1, p. 108, 2023, doi: 10.20961/alchemy.19.1.64499.108-122.
- [3] A. S. Nair, V. Nallusamy, K. Jayasankar, and S. Ss, "Scalable preparation of graphene from graphite ore via mechano-chemical ball milling," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 37, no. 1, pp. 113–122, 2022, doi: 10.1080/10426914.2021.1945094.
- [4] G. Huang *et al.*, "Efficient preparation and characterization of graphene based on ball milling," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 130, no. July, p. 109438, 2022, doi: 10.1016/j.diamond.2022.109438.
- [5] P. Singh, N. Ram Chauhan, and S. Rajesha, "Design, fabrication and performance analysis of mini ball miller," *Mater. Today Proc.*, vol. 42, pp. 1202–1206, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.690.
- [6] Hadi Nur Widiyanto, Ikhwani Qiram, and Anas Mukhtar, "Pengaruh Lama Waktu dan Rasio Bola Penghancur Terhadap Karakteristik Produk Penggilingan Bata Merah," *V-MAC (Virtual Mech. Eng. Artic.*, vol. 7, no. 1, pp. 18–21, 2022, doi: 10.36526/v-mac.v7i1.1485.
- [7] O. Çuvalcı, T. Varol, S. B. Akçay, O. Güler, and A. Çanakçı, "Effect of ball mill time and wet pre-milling on the fabrication of Ti powders by recycling Ti machining chips by planetary milling," *Powder Technol.*, vol. 426, no. March, 2023, doi: 10.1016/j.powtec.2023.118637.
- [8] M. S. Ummah, *No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析* Title, vol. 11, no. 1. 2019. [Online]. Available: <http://sciotea.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06>

- .005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- [9] N. Zhang, Y. Mao, S. Wu, and W. Xu, "Effects of the Ball Milling Process on the Particle Size of Graphene Oxide and Its Application in Enhancing the Thermal Conductivity of Wood," *Forests*, vol. 13, no. 8, 2022, doi: 10.3390/f13081325.
- [10] W. Tharanon and J. Peerapattana, "The effects of ball mill processing on the physicochemical properties of glutinous rice starch," *Thai J. Pharm. Sci.*, vol. 44, no. 2, pp. 91–98, 2020, doi: 10.56808/3027-7922.2438.
- [11] I. P. H. Yudistira, "ANALISIS PENGARUH VARIASI WAKTU PERLAKUAN ALKALI TERHADAP KEKUATAN IMPACT KOMPOSIT POLYESTER," vol. 14, no. 2, pp. 393–399, 2023, doi: 10.21776/jrm.v14i2.1104.