

## Pengaruh Variasi *Milling* terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Paduan Serbuk Fe-C dengan Metode *Mechanical Alloying*

Aleksander Jehatu<sup>1</sup>, Sutrisna<sup>\*1</sup>, Mustakim<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

Korespondensi<sup>\*2</sup> : [sutrisna@itny.ac.id](mailto:sutrisna@itny.ac.id)

### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi durasi *milling* (4 jam, 8 jam, dan 12 jam) terhadap struktur mikro dan kekerasan paduan serbuk Fe-C yang diproses menggunakan metode *mechanical alloying*. Proses *mechanical alloying* melibatkan penggilingan energi tinggi untuk menghasilkan campuran homogen dengan ukuran butir halus. Variasi durasi *milling* diharapkan mempengaruhi perubahan mikrostruktur, seperti ukuran butir, distribusi fasa, dan pembentukan fasa metastabil. Analisis struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop elektron. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin lama durasi *milling*, ukuran butir semakin halus dan terjadi peningkatan fasa martensit. Pada durasi 12 jam, ukuran butir mencapai skala nanometer, yang berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan (425 HVN) dan homogenitas mikrostruktur. Dengan demikian, variasi durasi *milling* memiliki pengaruh signifikan terhadap evolusi mikrostruktur paduan Fe-C, dengan durasi *milling* yang lebih panjang memberikan hasil mikrostruktur yang lebih halus dan seragam. Penelitian ini memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang hubungan antara parameter *milling* dan sifat mikrostruktur paduan Fe-C untuk aplikasi yang lebih optimal dalam material teknik.

**Kata kunci:** *mechanical alloying*, durasi *milling*, struktur mikro, paduan serbuk Fe-C

### ABSTRACT

This study aims to investigate the effect of varying milling durations (4 hours, 8 hours, and 12 hours) on the microstructure and hardness of Fe-C alloy powders processed using the mechanical alloying method. The mechanical alloying process involves high-energy milling to produce a homogeneous mixture with fine grain size. The variation in milling duration is expected to influence microstructural changes, such as grain size, phase distribution, and the formation of metastable phases. Microstructural analysis was conducted using electron microscopy. The results show that longer milling durations lead to finer grain sizes and an increase in martensitic phase formation. At 12 hours of milling, the grain size reached the nanometer scale, contributing to increased hardness (425 HVN) and microstructural homogeneity. Thus, the variation in milling duration significantly impacts the microstructural evolution of Fe-C alloy, with longer milling durations producing finer and more uniform microstructures. This research provides deeper insights into the relationship between milling parameters and the microstructural properties of Fe-C alloy for more optimal applications in engineering materials.

**Keyword :** *mechanical alloying*, milling duration, microstructure, Fe-C alloy powders

### PENDAHULUAN

Paduan Fe-C (besi-karbon) merupakan salah satu material yang paling banyak digunakan dalam industri karena sifat mekanisnya yang unggul, seperti kekuatan tinggi, kekerasan, dan ketangguhan(1) . Struktur mikro paduan Fe-C, yang terdiri dari berbagai fase seperti ferit, perlit, bainit, dan martensit, sangat dipengaruhi oleh metode pengolahan yang digunakan. Salah satu teknik modern yang efektif dalam mengontrol struktur mikro dan kekerasan material ini adalah *mechanical alloying*, sebuah metode penggilingan energi tinggi yang memungkinkan terjadinya penghalusan ukuran butir dan homogenisasi campuran pada tingkat atomic(2)(3). Dalam beberapa tahun terakhir, metode ini semakin mendapatkan perhatian karena kemampuannya dalam menghasilkan paduan dengan sifat unik yang sulit dicapai menggunakan metode konvensional (4).

Variasi parameter *milling*, seperti durasi penggilingan, kecepatan putaran, rasio bola terhadap serbuk, dan atmosfer selama proses, memainkan peran penting dalam menentukan mikrostruktur akhir paduan Fe-C(5). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa peningkatan waktu *milling* dapat menghasilkan ukuran butir yang lebih halus, yang berpengaruh pada kekuatan mekanik dan fasa material. Selain itu, perubahan rasio massa bola

terhadap serbuk diketahui memengaruhi energi tumbukan partikel selama penggilingan, yang dapat mengubah morfologi serbuk dan distribusi fasa dalam paduan (6). Hal ini menunjukkan bahwa kontrol yang tepat terhadap parameter *milling* sangat krusial untuk mendapatkan mikrostruktur yang diinginkan.

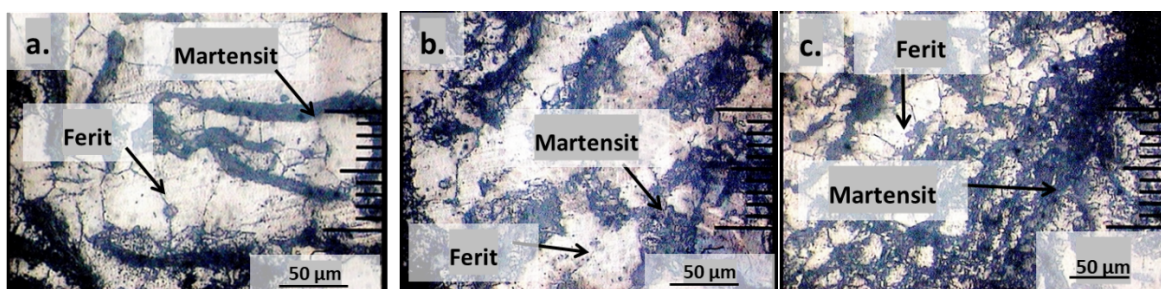
Pengaruh variasi parameter *milling* 4 jam, 8 jam dan 12 jam terhadap mikrostruktur dan kekerasan paduan Fe-C memiliki dampak yang signifikan terhadap sifat material. Penelitian oleh Zhang HW et al (1) menunjukkan bahwa variasi dalam waktu penggilingan menghasilkan perbedaan pada ukuran kristalit dan distribusi fasa martensit, yang berdampak langsung pada struktur mikro dan kekerasan paduan. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk mengkaji lebih lanjut bagaimana variasi parameter *milling* memengaruhi struktur mikro dan kekerasan paduan Fe-C, dengan harapan dapat mengoptimalkan sifat mekanik material tersebut untuk aplikasi industri yang lebih luas.

### METODE PENELITIAN

Serbuk besi (Fe) dan carbon (C) dengan komposisi 98% Fe dan 2% C dicampur, kemudian digiling menggunakan *ball mill* pada kecepatan putaran 300 rpm dengan rasio massa bola terhadap serbuk 10:1. Adapun waktu variasi penggilingan adalah 4 jam, 8 jam dan 12 jam. Setelah proses penggilingan, serbuk dibuat *compact green* dengan mesin press 50 MPa selama 15 menit dan di panaskan pada suhu 900 °C ditahan selama 60 menit dan diquen dalam air. Spesimen dianalisis menggunakan mikroskop elektron untuk mengamati morfologi struktur mikro dan *vickers hardness*. Hasil dari analisis ini digunakan untuk mengevaluasi perubahan ukuran butir, distribusi fasa, dan homogenitas mikrostruktur akibat variasi durasi *milling*.

### HASIL DAN ANALISIS

Gambar 1. menunjukkan struktur mikro paduan Fe-C dengan fasa-fasa yang tampak bervariasi. Berdasarkan pengamatan visual, terdapat area yang menunjukkan distribusi butir yang tidak seragam dengan adanya fasa gelap dan terang, yang mungkin menunjukkan perbedaan fasa pada paduan tersebut. Fasa gelap kemungkinan menunjukkan keberadaan fasa martensit yang lebih keras, sementara fasa terang bisa menunjukkan daerah ferit yang lebih lunak(7). Pada gambar 1.a. struktur mikro setelah *milling* 4 jam, terlihat bahwa mikrostruktur paduan Fe-C masih memperlihatkan butiran besar dengan batas butir yang terlihat jelas. Ukuran butir ini menunjukkan bahwa proses *mechanical alloying* belum sepenuhnya mereduksi ukuran butir secara signifikan. Struktur ini kemungkinan masih didominasi oleh fasa ferit dengan distribusi fasa martensit yang minimal. Fasa gelap di sepanjang batas butir bisa menunjukkan adanya fase martensit awal, tetapi belum merata di seluruh matriks. Pengaruh durasi *milling* yang pendek (4 jam) cenderung memberikan energi mekanis yang masih terbatas untuk menghasilkan perubahan signifikan dalam ukuran butir maupun homogenitas distribusi fasa, sesuai dengan penelitian oleh Kim Y Do et al. (2000)(8), yang menyatakan bahwa proses *milling* membutuhkan waktu yang lebih lama untuk menciptakan perubahan substansial dalam mikrostruktur.

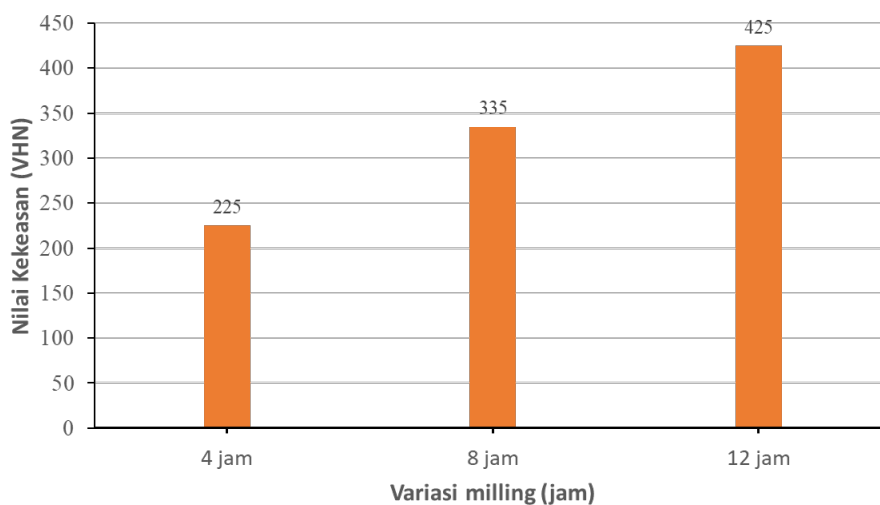


**Gambar 1.** Struktur mikro variasi *milling* a. 4 jam, b. 8 jam dan c. 12 jam

Pada gambar 1.b. setelah *milling* 8 jam, terlihat perubahan mikrostruktur yang lebih signifikan dibandingkan gambar 1.a. Butir-butir menjadi lebih kecil dan distribusi fasa martensit mulai lebih merata. Setelah *milling* 12 jam, fasa gelap yang lebih tersebar di seluruh struktur menunjukkan bahwa terjadi peningkatan dalam pembentukan fasa martensit seiring dengan peningkatan durasi *milling*. Selain itu, batas butir lebih halus, yang menunjukkan bahwa proses *milling* selama 12 jam telah mempercepat penghalusan butir dan memicu terbentuknya fasa metastabil seperti martensit yang terbukti meningkatkan kekerasan dan ketangguhan material. Hal ini sesuai dengan hasil yang dilaporkan oleh Nugroho IA dkk. (2023)(9), di mana peningkatan durasi *milling* menyebabkan penghalusan ukuran butir dan homogenisasi fasa dalam paduan Fe-C.

Secara keseluruhan, perbandingan antara ketiga gambar ini menunjukkan bahwa durasi *milling* yang lebih lama (12 jam) menghasilkan penghalusan butir dan distribusi fasa yang lebih baik dibandingkan *milling* 4 jam dan

8 jam. Namun, untuk mencapai ukuran butir nanometer dan distribusi fasa yang sepenuhnya seragam, durasi *milling* yang lebih lama mungkin diperlukan.



**Gambar 2.** Nilai kekerasan dengan variasi *milling*

Hasil pengujian kekerasan Vickers menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya durasi *milling*. Pada durasi *milling* 4 jam, nilai kekerasan Vickers berkisar antara 225 HV, menunjukkan bahwa ukuran butir masih relatif besar dan fasa martensit belum terbentuk secara signifikan. Setelah 8 jam *milling*, kekerasan meningkat menjadi 335 HV, karena terjadinya penghalusan butir dan peningkatan distribusi fasa martensit. Pada *milling* 12 jam, nilai kekerasan mencapai 425 HV, didukung oleh ukuran butir yang halus hingga mendekati skala nanometer serta fasa martensit yang terbentuk merata, sehingga meningkatkan kekerasan material secara signifikan (10). Penghalusan ukuran butir dan distribusi fasa martensit yang lebih merata pada durasi *milling* yang lebih panjang sesuai dengan teori penguatan butir, di mana butir yang lebih halus meningkatkan kekerasan material (11).

## KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa variasi durasi *milling* memberikan pengaruh signifikan terhadap struktur mikro dan kekerasan pada paduan Fe-C yang diproses menggunakan metode *mechanical alloying*. Semakin lama durasi *milling*, ukuran butir semakin halus dan fasa martensit terbentuk lebih merata, yang pada akhirnya meningkatkan kekerasan material. Pada durasi *milling* 4 jam, struktur mikro masih terdiri dari butir besar dengan distribusi martensit yang tidak merata, menghasilkan kekerasan yang lebih rendah. Setelah 8 jam *milling*, terjadi penghalusan ukuran butir dan peningkatan kekerasan. Pada durasi 12 jam, ukuran butir mendekati skala nanometer, dan fasa martensit terbentuk secara optimal, menghasilkan kekerasan tertinggi. Dengan demikian, durasi *milling* yang lebih lama berkontribusi terhadap evolusi mikrostruktur yang lebih baik, meningkatkan kekerasan paduan Fe-C secara signifikan, yang dapat diterapkan dalam peningkatan performa material di berbagai aplikasi teknik.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Institut Teknologi Nasional Yogyakarta atas dukungan biaya yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian dan seminar ini. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada Laboratorium Material Teknik ITNY dan Vokasi Universitas Gadjah Mada yang telah menyediakan fasilitas alat untuk pengujian, sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan lancar. Dukungan dari kedua institusi ini sangat berarti dalam keberhasilan penelitian ini, dan saya berharap hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di Indonesia.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Al-Joubori A. A., Suryanarayana C., "Synthesis of Fe-C alloys by mechanical alloying," Mater Sci Technol Conf Exhib, MS T 2014, 1(October 2014):509–616, 2014.
- [2] Dewantoro Herlambang Y., "Aplikasi Pengolahan Citra untuk Analisis Strukturmikro Logam Ferro Berdasarkan Pola-Pola Khas Statistiknya," Semin Nas Apl Teknol Inf, 2007(Snati).

*Pengaruh Variasi Milling terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Paduan Serbuk Fe-C dengan Metode Mechanical Alloying (Aleksander Jehatu)*



ISSN: 1907-5995

- [3] Enayati M. H., Zakeri M., "Production of Fe-C Powders with Improved Structure," 1(1):24–28, 2004.
- [4] Kim Y. D., Chung J. Y., Kim J., Jeon H., "Formation of nanocrystalline Fe-Co powders produced by mechanical alloying," *Mater Sci Eng A*, 291(1):17–21, 2000.
- [5] Nowosielski R., Pilarczyk W., "The Fe-C alloy obtained by mechanical alloying and sintering," 18(1):167–170, 2006.
- [6] Nugroho I. A., Ramadhana R., Matsuki., "Analisa Tekanan Kompaksi dan Waktu Tahan Sintering pada Paduan Serbuk Besi dan Serbuk Arang Batok Kelapa dengan Metode Metalurgi Serbuk terhadap Densitas dan Nilai Kekerasan," *Publ Online Mhs Tek Mesin*, 5(2), 2023.
- [7] Rifnaldi R., Mulianti., "Pengaruh Perlakuan Panas *Hardening* dan *Tempering* terhadap Kekerasan (*Hardness*) Baja AISI 1045," *Ranah Res J Multidisciplinary Res Dev*, 1(4):950–959, 2019.
- [8] Rochman N. T., "Mechanical Alloying of Fe-C System Based Alloy," *Indones J Phys*, 19(3):83–90, 2016.
- [9] Science M., Higashi-ku H., January R., "Microstructures of Fe-C System Hard Alloys Produced Mechanically Alloyed Powders from Yuuji Kimura," Setsuo Takaki and Hideto Goto Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki. 1996.
- [10] Setiyana B., "Optimalisasi Kekerasan dan Struktur Mikro Baja Karbon Sedang pada Bucket Teeth Excavator Menggunakan Metode Taguchi dan Anova," *Rotasi*, 19(4):177, 2017.
- [11] Zhang H. W., Gopalan R., Mukai T., Hono K., "Fabrication of bulk nanocrystalline Fe-C alloy by spark plasma sintering of mechanically milled powder," *Scr Mater*, 53(7):863–868, 2005.