

PEMBUATAN *GREEN BODY* BRAKE LINING BERBAHAN Cu-Fe-Si PADA TEKANAN TETAP DENGAN VARIASI SUHU

M.Zidni Iiminuddin¹, Indreswari Suroso^{1*}

¹ Jurusan Teknik Dirgantara, Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan
Jl. Parangtritis km 4.5 Yogyakarta.

*Email: indreswari.suroso@sttkd.ac.id

Abstrak

The development of engineering materials has encouraged the use of Cu-Fe-Si metal-based composites as brake lining materials due to their favorable mechanical properties and good wear resistance. This study aims to investigate the effect of low silicon (Si) content and sintering temperature variations on the hardness and wear behavior of Cu-Fe-Si green bodies. The compaction process was carried out at a constant pressure of 150 MPa, followed by sintering at temperatures of 700°C, 750°C, 800°C, and 850°C. The results show that increasing the sintering temperature leads to an improvement in material hardness, with the maximum hardness value of 49.3 VHN obtained at 850°C. In addition, the wear rate decreases with increasing sintering temperature, reaching the lowest value of 0.000180 mm³/kg·m at 850°C. Based on the relationship between hardness and wear behavior, a sintering temperature of 800°C is considered the optimal condition, as it provides the best balance between hardness enhancement and wear rate reduction. These findings indicate that the use of low Si content contributes positively to improving the performance of brake lining materials based on Metal Matrix Composites (MMC).

Kata kunci: Metal Matrix Composite (MMC), brake lining, sintering, hardness, wear

PENDAHULUAN

Keselamatan dan kinerja kendaraan sangat bergantung pada efektivitas sistem pengereman brake lining berperan penting dalam menghasilkan gaya gesek untuk memperlambat atau menghentikan pergerakan kendaraan. Kinerja brake lining sangat ditentukan oleh kemampuan material dalam mempertahankan kekerasan dan ketahanan aus pada kondisi kerja bersuhu tinggi serta beban mekanik yang berulang [I. Suroso dan Ahmad, 2024]. Seiring perkembangan teknologi material, *Metal Matrix Composite* (MMC) banyak dikembangkan sebagai alternatif material brake lining karena memiliki kombinasi sifat mekanik yang unggul, seperti kekerasan tinggi, ketahanan aus yang baik, serta stabilitas termal yang memadai untuk aplikasi otomotif dan penerbangan [M. Kuncara dan C. N. Nasuha, 2025]. Salah satu sistem MMC yang berpotensi dikembangkan adalah Cu-Fe-Si, di mana Fe berfungsi sebagai matriks utama, Cu berperan dalam meningkatkan kestabilan termal dan sifat tribologi, serta Si berkontribusi dalam meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus material. Metalurgi serbuk (*powder metallurgy*) adalah teknik pengolahan logam di mana komponen atau part dibuat dari serbuk logam. Proses ini dilakukan dengan menekan serbuk hingga membentuk geometri tertentu (*pressing*), kemudian dipanaskan agar partikel saling terikat dan menghasilkan struktur yang kuat [S.D. Gaikwad et al, 2024]

Pembuatan material MMC umumnya dilakukan melalui teknik metalurgi serbuk yang meliputi proses pencampuran serbuk, kompaksi, dan sintering untuk memperoleh sifat mekanik yang diinginkan. Tahap kompaksi menghasilkan green body sebagai bentuk awal material, yang selanjutnya mengalami peningkatan kekuatan dan kekerasan melalui mekanisme difusi atom selama proses sintering [Fathurrohman, N. K et al, 2024]. Parameter proses, khususnya tekanan kompaksi dan suhu sintering, memiliki pengaruh terhadap struktur mikro dan sifat mekanik material. Tekanan kompaksi yang optimal mampu menghasilkan green body dengan kekuatan awal yang baik sehingga mendukung peningkatan kekerasan setelah proses sintering [M. N. A. Habibiy et al, 2022]. Selain itu, variasi suhu sintering memengaruhi tingkat difusi antarpartikel yang berdampak langsung pada peningkatan kekerasan serta penurunan laju keausan material, meskipun suhu yang terlalu tinggi berpotensi menurunkan performa akibat perubahan struktur mikro yang kurang menguntungkan [Zhou et al, 2024]. Variasi suhu sintering berpengaruh langsung terhadap kekerasan dan keausan material, di mana peningkatan suhu sintering mendorong proses difusi antarpartikel menjadi lebih

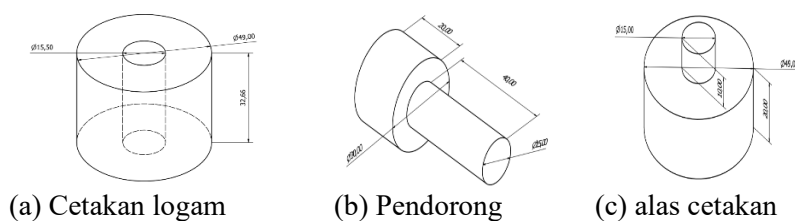
optimal sehingga densitas meningkat dan porositas berkurang [R. Rusnaldy, N. K, 2026].

Uji kekerasan digunakan untuk mengevaluasi ketahanan material terhadap deformasi plastis serta sebagai indikator kualitas material dalam menahan gaya tekan dan gesekan yang terjadi selama proses pengereman [M. A. R. Septiyanto et al, 2022]. Nilai kekerasan yang tinggi mencerminkan ikatan antar partikel yang kuat dan struktur mikro yang lebih padat, sehingga material mampu mempertahankan sifat mekaniknya pada kondisi beban dan temperatur tinggi. Selain itu, pengujian kekerasan memberikan gambaran mengenai pengaruh parameter proses, khususnya suhu sintering, terhadap peningkatan sifat mekanik material [Sugiyarto et al, 2023]. Uji keausan menilai daya tahan material terhadap gesekan berulang yang terjadi selama pengoperasian sistem pengereman [J. D. Polanco et al, 2022]. Penilaian keberhasilan proses manufaktur ini dilakukan melalui pengujian sifat mekanik pada *green body* maupun produk hasil sintering guna memastikan material yang dihasilkan memenuhi persyaratan kinerja sebagai *brake lining*.

Research gap penelitian ini pada terbatasnya pemahaman mengenai batas suhu optimum yang mampu menyeimbangkan peningkatan densitas, penurunan porositas, dan kontrol laju keausan pada komposit bahan gesek berbasis Cu-Fe-Si di bawah tekanan pemadatan konstan. Dari celah tersebut, novelty penelitian ini adalah penemuan rentang suhu *sintering* optimal untuk memicu difusi antarunsur dan pembentukan fase intermetalik (seperti Fe-Si) secara akurat, sehingga menghasilkan produk *green body brake lining* bermatriks Cu-Fe-Si yang memiliki struktur mikro stabil, ketahanan aus tinggi, dan ramah lingkungan sebagai alternatif bahan gesek konvensional.

METODOLOGI

Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental. Serbuk Cu, Fe, dan Si dicampurkan sesuai dengan komposisi yang telah ditentukan, kemudian dikompaksi dengan tekanan 150 MPa menggunakan cetakan logam hingga terbentuk *green body* dilihat pada Gambar 1. Total massa campuran ditetapkan sebesar 20 gram, menyesuaikan dengan kapasitas cetakan logam berbentuk silinder berdiameter 1,5 cm dan tinggi 1,4 cm. Berdasarkan total massa tersebut, diperoleh fraksi massa masing-masing komponen, yaitu Cu sebesar 83,7%, Fe sebesar 15,7%, dan Si sebesar 0,52%. Penetapan fraksi massa ini bertujuan menjaga konsistensi komposisi material pada setiap sampel yang diuji, sekaligus menyesuaikan dengan batasan volume dan massa cetakan uji.



Gambar 1. Cetakan *green body*

Sampel *green body* dipanaskan di dalam furnace pada variasi suhu 700°C, 750°C, 800°C, dan 850°C untuk memicu terjadinya proses sintering awal. Setelah proses pemanasan, sampel diuji untuk mengetahui sifat mekanik *green body*, yang meliputi uji kekerasan menggunakan metode Vickers dan uji keausan menggunakan *Universal Wear Test*. Seluruh hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh variasi suhu sintering terhadap nilai kekerasan dan laju keausan *green body* yang dihasilkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan adanya keterkaitan yang jelas antara variasi suhu sintering dengan nilai kekerasan dan laju keausan *green body brake lining* berbasis *Metal Matrix Composite* (MMC). Pemilihan suhu sintering 700 °C, 750 °C, 800 °C, dan 850 °C berkaitan dengan titik leleh unsur penyusun utama, yaitu tembaga (Cu) sekitar 1085 °C, besi (Fe) sekitar 1538 °C, dan silikon (Si) sekitar 1414 °C, sehingga proses sintering berlangsung melalui mekanisme *solid-state sintering*. Peningkatan suhu sintering meningkatkan energi termal yang tersedia untuk difusi atom antarpartikel, yang mendorong terbentuknya ikatan metalurgi yang lebih kuat dan struktur mikro

yang lebih rapat. Kondisi ini berpengaruh langsung terhadap sifat mekanik dan tribologi material, di mana peningkatan suhu sintering diikuti oleh peningkatan nilai kekerasan serta penurunan laju keausan secara bertahap [Samiyan et al, 2026]. Pada suhu sintering yang lebih rendah, material masih mengalami keausan yang relatif tinggi akibat ikatan antar partikel yang belum optimal. Namun, pada suhu sintering yang lebih tinggi, stabilitas ikatan antar partikel meningkat sehingga material mampu mempertahankan keausan permukaan saat mengalami kontak gesek. Dengan demikian, peningkatan suhu sintering pada rentang yang diteliti memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan kekerasan dan penurunan laju keausan, sehingga menghasilkan material brake lining berbasis MMC dengan performa mekanik dan ketahanan gesek yang lebih baik.

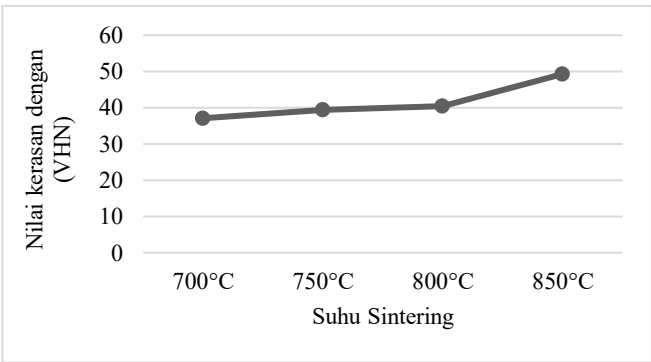
Kekerasan

Pada penelitian ini, pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Vickers untuk mengevaluasi pengaruh variasi suhu sintering terhadap sifat mekanik *green body* Cu–Fe–Si. Uji kekerasan juga berperan penting dalam proses *quality control* karena dapat memberikan gambaran konsistensi mutu material yang diuji [F. T. H. Sinaga et al, 2024]. Pengujian dilakukan pada suhu sintering 700°C, 750°C, 800°C, dan 850°C dengan tekanan kompaksi konstan sebesar 150 MPa. Setiap spesimen diuji pada tiga titik berbeda untuk memperoleh nilai kekerasan rata-rata yang representatif. Hasil pengujian kekerasan selanjutnya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tabel Laju kekerasan dengan Variasi Suhu Sintering (VHN)

Green body brake lining berbahan MMC	Laju kekerasan dengan Variasi Suhu Sintering (VHN)			
	Suhu	Suhu	Suhu	Suhu
	Sintering 700°C	Sintering 750°C	Sintering 800°C	Sintering 850°C
Tekanan kompaksi (MPa)	37.1	39.4	40.5	49.3

Berdasarkan Tabel 1, nilai kekerasan *green body* berbahan *Metal Matrix Composite* (MMC) menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan kenaikan suhu sintering dari 700°C hingga 850°C. Pada suhu sintering yang lebih rendah, nilai kekerasan masih relatif kecil yang mengindikasikan ikatan antar partikel belum terbentuk secara optimal. Peningkatan suhu sintering hingga 750°C dan 850°C menyebabkan nilai kekerasan meningkat akibat difusi antar partikel yang semakin efektif seiring bertambahnya energi termal. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada suhu sintering 850°C ditunjukkan pada Gambar 2, yang menunjukkan bahwa dalam rentang suhu penelitian, kondisi tersebut menghasilkan ikatan antarpartikel yang paling kuat dan stabil sehingga meningkatkan ketahanan material terhadap deformasi. Untuk memperjelas pengaruh variasi suhu sintering terhadap nilai kekerasan, data pada Tabel 1 selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik, yang menunjukkan hubungan antara suhu sintering dan kekerasan material pada tekanan kompaksi konstan sebesar 150 MPa.



Gambar 2. Uji Kekerasan Metode Vickers

Hasil pengujian kekerasan menggunakan metode Vickers Hardness Number (VHN) menunjukkan bahwa variasi suhu sintering berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik green body brake lining berbahan *Metal Matrix Composite* (MMC). Pada suhu sintering 700°C diperoleh nilai kekerasan rata-rata sebesar 37,1 VHN, yang mengindikasikan bahwa proses sintering belum berlangsung secara optimal karena energi termal yang diberikan masih terbatas sehingga difusi dan ikatan antarpartikel belum terbentuk secara maksimal. Peningkatan suhu sintering menjadi 750°C dan 850°C menyebabkan nilai kekerasan meningkat masing-masing menjadi 39,4 VHN dan 40,5 VHN. Kenaikan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu sintering, proses difusi antarpartikel berlangsung lebih efektif sehingga ikatan yang terbentuk menjadi lebih kuat dan seragam, yang berdampak pada meningkatnya ketahanan material terhadap deformasi.

Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada suhu sintering 850°C, yaitu sebesar 49,3 VHN. Hal ini menunjukkan bahwa dalam rentang suhu yang diteliti, suhu 850°C merupakan kondisi optimum untuk menghasilkan kekerasan maksimum, karena energi termal yang tinggi memungkinkan terbentuknya ikatan antar partikel yang sangat kuat dan stabil. Nilai kekerasan tersebut berada dalam rentang kekerasan yang direkomendasikan untuk material *brake lining* komersial, yaitu 40–50 VHN sesuai standar SAE J2654 selaras dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan nilai kekerasan brake lining berbasis komposit sekitar 44 VHN. Pengujian dilakukan menggunakan metode Vickers yang dikenal presisi dan sesuai untuk material hasil metalurgi serbuk, karena mampu mendeteksi perubahan sifat mekanik akibat variasi suhu sintering. Hasil pengujian kekerasan pada penelitian ini dinilai valid dan reliabel dalam menganalisis pengaruh suhu sintering terhadap sifat mekanik *green body* MMC.

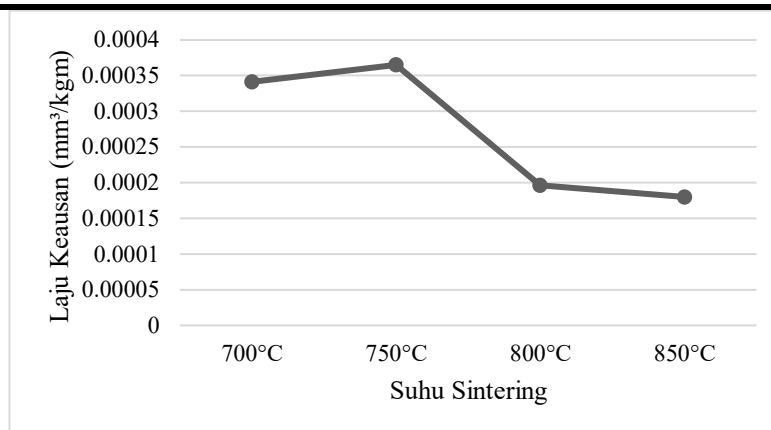
Keausan

Karakteristik keausan *green body* berbahan *Metal Matrix Composite* (MMC) dievaluasi melalui pengujian keausan menggunakan alat Universal Wear. Tingkat keausan sangat dipengaruhi oleh karakteristik material itu sendiri. Upaya pengendalian keausan dapat dilakukan dengan menambahkan pelumas, sehingga gesekan pada permukaan material dapat berkurang dan laju keausan menjadi lebih rendah. Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh data panjang goresan (*b*), volume material yang tergores (*W*), serta nilai keausan spesifik (*Ws*) dari setiap spesimen. Seluruh data hasil pengujian tersebut kemudian disajikan secara sistematis pada Tabel 2.

Tabel 2. Laju keausan dengan Variasi Suhu Sintering

Green body berbahan MMC	Laju keausan dengan Variasi Suhu Sintering (mm ³ /kgm)			
	Suhu Sintering 700°C	Suhu Sintering 750°C	Suhu Sintering 800°C	Suhu Sintering 850°C
Tekanan kompaksi 150MPa	0.000341	0.000365	0.000196	0.000180

Berdasarkan Tabel 2, variasi suhu sintering berpengaruh terhadap laju keausan green body brake lining berbahan MMC dengan hubungan yang tidak bersifat linear. Pada suhu 700°C–750°C, laju keausan cenderung meningkat akibat ikatan antarpartikel yang belum terbentuk secara optimal. Peningkatan suhu sintering hingga 800°C menyebabkan laju keausan menurun secara signifikan karena terbentuknya struktur mikro yang lebih homogen dan ikatan antarpartikel yang lebih kuat. Pada suhu 850°C, laju keausan tetap menunjukkan kecenderungan menurun, menandakan peningkatan stabilitas struktur mikro material, meskipun perlu diperhatikan potensi perubahan mikrostruktur pada suhu tinggi. Suhu sintering berperan penting dalam mengendalikan karakteristik keausan *green body* pada tekanan kompaksi tetap 150 MPa ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Hasil Uji Keausan menggunakan *Universal Wear*

Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi suhu sintering memberikan pengaruh nyata terhadap laju keausan material brake lining berbahan *Metal Matrix Composite* (MMC) dengan kecenderungan yang tidak selalu berbanding lurus dengan kenaikan suhu. Pada suhu sintering 700°C, laju keausan masih relatif tinggi karena ikatan antarpartikel belum berkembang secara optimal. Ketika suhu dinaikkan menjadi 750°C, laju keausan justru mengalami peningkatan ringan, yang mengindikasikan bahwa perubahan mikrostruktur pada tahap awal sintering belum cukup efektif dalam meningkatkan ketahanan material terhadap mekanisme gesekan.

Penurunan laju keausan mulai terlihat signifikan pada suhu sintering 800°C. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada suhu tersebut struktur mikro material telah berkembang secara lebih homogen dengan ikatan antarpartikel yang lebih kuat dan stabil, sehingga kemampuan material dalam menahan gaya gesek meningkat. Peningkatan suhu sintering hingga 850°C tidak menyebabkan kenaikan laju keausan, melainkan menghasilkan nilai keausan terendah. Fenomena ini menandakan bahwa proses sintering pada suhu tinggi masih mendukung penyempurnaan struktur mikro dan meningkatkan ketahanan material terhadap mekanisme keausan, sehingga material berpotensi memiliki umur pakai yang lebih panjang dan kinerja yang lebih stabil sebagai brake lining.

Pengujian keausan pada penelitian ini dilakukan menggunakan Universal Wear Testing Machine yang mengacu pada standar ASTM G99, sehingga hasil yang diperoleh memiliki validitas dan reliabilitas yang baik. Instrumen ini memungkinkan pengukuran laju keausan secara presisi dengan parameter pengujian yang terkontrol, seperti beban, jarak gesek, dan kecepatan.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi suhu sintering berpengaruh terhadap sifat mekanik material *brake lining* berbahan *Metal Matrix Composite* (MMC) melalui perubahan struktur mikro. Nilai kekerasan meningkat seiring kenaikan suhu sintering mencapai 49,3 VHN pada 850°C pada suhu 800°C –850°C, sedangkan laju keausan menurun dengan nilai terendah sebesar 0,000180 mm³/kg·m pada suhu 850°C. Meskipun kadar silikon yang digunakan rendah, material tetap menunjukkan performa mekanik yang baik. Suhu sintering 850°C ditetapkan sebagai kondisi optimum karena menghasilkan keseimbangan terbaik antara kekerasan, ketahanan aus, dan memenuhi persyaratan standar untuk aplikasi brake lining kendaraan.

DAFTAR PUSTAKA

- N. K. Fathurrohman, R. Rusnaldy, P. Paryanto, P., dan S. H. A. Toriq. (2026). Proses Pembuatan Brake Pad Berbasis Tembaga Dengan Metodologi Metalurgi Serbuk. *ROTASI*. 281. pp. 41-48.
- F. T. H. Sinaga, E. P. D. Boangmanalu, A. B. Pratama, J. F. H. Saragi, Al Qadry, dan Sahat. (2024). Hardness Test Analysis on ST 37 Steel Plate Material and Aluminum Using the Brinell Test Method. *Formosa J. Sci. Technol.* 212. pp. 3297–3308.
- I. Suroso dan Ahmad. (2024). Pengaruh Tekanan 150 MPa dan Suhu Sintering 495°C Terhadap Karakteristik *Greenbody Metal Matrix Composite* Fe-Cr-Mn-Al-Si-Cu. *J. STTKD*. 101. pp. 273–282.

- J. D. Polanco, C. Jacanamejoy-Jamioy, C. L. Mambuscay, J. F. Piamba, M. G. Forero, "Automatic method for vickers hardness estimation by image processing, *Journal of Imaging*, vol. 9, no. 1, pp. 1-11.
- M. Kuncara dan C. N. Nasuha. (2025). Metal Matrix Composite (MMC) dalam Pembentukan Logam. *J. ATSAR UNISA*. 401. pp. 1–9.
- M. N. A. Habiby, Rusiyanto, R. D. Widodo, dan W. Sumbodo. (2022). Effect of Green Body Heating Rate on Mechanical and Physical Properties of Crucible Materials Made from Evaporation Boats Waste. *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) J.* 71. pp. 19–26.
- M. A. R. Septiyanto, I. Suroso, dan N. Utami. (2025). Analisis kekerasan dan keausan bearing pada pesawat Cessna Grand Carravan 208B. *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*. 111. pp. 117–124.
- R. Rusnaldy, N. K. Fathurrohman, S. H. At-Toriq, P. Paryanto. (2026). Wear and Thermal Analysis of Cu-MMC Brake Pad Fabricated by Powder Metallurgy for Railway Braking Applications. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 102. pp.1-18.
- S.D. Gaikwad, V.V Dabhade, S.N Murty, and S. Manwatkar. (2024). Mechanical alloying and direct powder forging of Ni–20Cr–20Fe-0.08 C alloy. *Materials Chemistry and Physics*. 315. pp. 1-15.
- A.A. Samiyan, L. Nikzad, H. Majidian, M. Farvizi, dan N. Nezafati. (2026). Effect of sintering temperature on phase formation, hardness, and wear behavior of TiMoVWCr refractory high-entropy alloy. *Intermetallics*. 191. pp. 109209.
- Sugiyarto, Somawardi, Sukanto, Yuliyanto, dan M. Asep. (2023). Efek Tekanan Kompaksi dan Suhu Sintering terhadap Densitas dan Kekerasan AMC diperkuat Silika Tailing. *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*. 122.
- Y. Zhou, Y. Zhang, X. Zhang, J. Liu, dan M. Wang. (2024). Effect of sintering temperature on the microstructure and mechanical and tribological properties of copper matrix composite for brake pads. *Metals*, 149. pp. 1048-1056.