

STUDI TENTANG PENGARUH TEKANAN KOMPAKSI DAN SINTERING PADA CAMPURAN SERBUK Cu, Fe, Si, Ni

Muhammad Dermawan^{1*}, Indreswari Suroso², Noviana Utami³

¹Program Studi S1 Teknik Dirgantara, Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan
Jl. Parangtritis No. KM.4,5, Druwo, Bangunharjo, Sewon, Bantul, Daerah Istimewa
Yogyakarta, Indonesia

^{2,3}Program Studi D3 Aeronautika, Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan
Jl. Parangtritis No. KM.4,5, Druwo, Bangunharjo, Sewon, Bantul, Daerah Istimewa
Yogyakarta, Indonesia

*Corresponding author: dermawansyahputra27@gmail.com

Abstract

This study used an experimental method with a quantitative approach to analyze the effect of compaction pressure and sintering temperature on the mechanical properties of green bodies. Specimens were made using powder metallurgy techniques with a composition of 77.489% copper (Cu) powder, 10.81% iron (Fe) powder, 6.047% silicon (Si) powder, and 5.645% nickel (Ni) powder. The specimen manufacturing process began with the mixing stage using a blending tool until optimal homogeneity was achieved. The powder mixture was then compacted through a compaction process with a pressure of 117.8 MPa using a hydraulic press machine to form the greenbody. Next, the greenbody underwent a sintering process at a temperature of 700°C in a furnace to strengthen the bonds between the powder particles. Testing was conducted to measure wear rates using the Universal Wear Testing method and hardness using the Brinell method. The results of the study showed that increases in compaction pressure and sintering temperature had a significant effect on the mechanical properties of the green body. The average wear value of the specimens tested was 0.0000318 mm³/kg.m, while the average hardness reached 31.84 BHN. This indicates that the material has good wear resistance and adequate hardness for industrial applications. The correlation between hardness and wear also shows that materials with higher hardness tend to be more resistant to wear.

Keywords: Compression pressure, sintering temperature, wear, hardness, green body, powder metallurgy.

Abstrak

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis pengaruh tekanan kompaksi dan suhu sintering terhadap sifat mekanik greenbody. Spesimen dibuat menggunakan teknik metalurgi serbuk dengan komposisi serbuk tembaga (Cu) 77,489%, serbuk besi (Fe) 10,81%, serbuk silikon (Si) 6,047%, dan serbuk nikel (Ni) 5,645%. Proses pembuatan spesimen dimulai dengan tahap pencampuran (mixing) serbuk menggunakan alat blending hingga tercapai homogenitas yang optimal. Campuran serbuk kemudian dipadatkan melalui proses kompaksi dengan tekanan 117,8 MPa menggunakan mesin press hidrolik untuk membentuk greenbody. Selanjutnya, greenbody mengalami proses sintering pada suhu 700°C di dalam furnace untuk memperkuat ikatan antar partikel serbuk. Pengujian dilakukan untuk mengukur tingkat keausan menggunakan metode Universal Wear Testing dan kekerasan menggunakan metode Brinell. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tekanan kompaksi dan suhu sintering berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik green body. Nilai keausan rata-rata spesimen yang diuji adalah 0,0000318 mm³/kg.m, sementara kekerasan rata-rata mencapai 31,84 BHN. Hal ini mengindikasikan bahwa material memiliki ketahanan aus yang baik dan kekerasan yang memadai untuk aplikasi industri. Korelasi antara kekerasan dan keausan juga menunjukkan bahwa material dengan kekerasan yang lebih tinggi cenderung lebih tahan terhadap keausan.

Kata kunci: Tekanan kompresi, kekerasan, suhu sintering, aus, green body, metalurgi serbuk

1. Pendahuluan

Industri penerbangan global mengalami pertumbuhan eksponensial dengan proyeksi peningkatan armada pesawat komersial sebesar 4,1% per tahun hingga 2040, yang secara langsung meningkatkan kebutuhan komponen brake

lining berkualitas tinggi untuk sistem pengereman pesawat. Material brake lining konvensional yang berbasis asbestos telah dilarang karena dampak kesehatan, sementara alternatif non-asbestos masih menghadapi tantangan dalam mencapai keseimbangan optimal antara koefisien

gesek, ketahanan termal, dan daya tahan aus. Metalurgi serbuk menawarkan solusi inovatif melalui kontrol mikrostruktur yang presisi dan kemampuan menciptakan komposisi material yang tidak dapat dicapai melalui proses konvensional.

Penelitian terdahulu dalam bidang metalurgi serbuk untuk aplikasi friksi telah mengeksplorasi berbagai sistem paduan, namun mayoritas fokus pada paduan biner atau terner seperti Fe-Cu (Setiyanto, 2019), Al-SiC (Alfianto & Nafi, 2023), dan Al-Ti (Mastuki et al., 2023) dengan suhu sintering tinggi ($>800^{\circ}\text{C}$). Sistem paduan quaternary Cu-Fe-Si-Ni belum mendapat perhatian memadai, padahal kombinasi ini menawarkan keunggulan sinergis: tembaga sebagai konduktor termal untuk disipasi panas, besi untuk kekuatan struktural, silikon sebagai deoxidizer dan penghalus butir, serta nikel untuk ketahanan korosi dan stabilitas dimensi. Lebih lanjut, karakterisasi greenbody sebagai produk antara sebelum sintering masih terbatas, meskipun sifat mekanisnya sangat menentukan kualitas produk akhir.

Greenbody adalah benda padat yang terbentuk dari campuran bahan keramik (biasanya serbuk dan bahan pengikat) yang telah dibentuk dalam bentuk tertentu. Tetapi masih berada dalam keadaan mentah (belum dilakukan sintering). [1].

Proses pembuatan *green body* merupakan tahapan penting dalam pembuatan benda dari serbuk logam, serat, atau bahan komposit lainnya. Pada tahap ini, bahan-bahan awal akan dibentuk menjadi benda setengah jadi sebelum dilakukan proses selanjutnya yaitu sintering. Proses pembentukan *green body* dilakukan dengan berbagai teknik seperti pemadatan, pengerasan, pencetakan, dan sebagainya guna memperoleh bentuk kasar dari produk akhir. Namun demikian, agar proses selanjutnya berjalan dengan baik dan menghasilkan kualitas yang optimal, *green body* harus memiliki karakteristik tertentu seperti kepadatan dan kekuatan tinggi serta bebas dari defek. Oleh karena itu, penelitian

terkait optimasi proses pembentukan *green body* sangatlah penting untuk dilakukan.

Beberapa masalah yang kerap dihadapi dalam pembentukan *green body* antara lain rendahnya kepadatan dan kekuatan *green body* yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor seperti ketidakseimbangan bahan baku, ketidaksesuaian tekanan dan suhu selama pemadatan, serta ketidakseragaman metode pembentukannya. Akibatnya, *green body* menjadi rentan terhadap kerusakan selama proses penanganan hingga sintering berikutnya. Selain itu, cacat bentuk seperti porositas dan retak juga sering muncul pada *green body* akibat ketidakseragaman proses. Hal tersebut tentunya akan berdampak buruk terhadap mutu produk jika tidak ditangani dengan baik. Oleh karena itu, perlu dilakukan riset terkait optimasi proses pembuatan *green body* agar menghasilkan karakteristik *green body* yang memenuhi standar. Dengan demikian, diharapkan akan menunjang proses selanjutnya hingga diperoleh produk akhir yang berkualitas.

Pada tahap kompaksi digunakan tekanan tinggi untuk membentuk *green body* dari campuran serbuk logam. Sedangkan pada tahap sintering, *green body* tersebut dipanaskan pada suhu tinggi untuk memperkuat ikatan antar butir serbuk logam sehingga menjadi padat. Parameter proses kompaksi dan variasi suhu sintering berpengaruh terhadap sifat mekanik *green body* seperti keausan dan kekerasan. Semakin tinggi tekanan kompaksi dan suhu sintering maka semakin meningkatkan sifat mekanik tersebut. Namun perlu ditentukan tingkat optimalnya agar memenuhi spesifikasi dan masih ekonomis.

Tekanan kompaksi yang terlalu rendah dapat mengakibatkan *green body* memiliki kepadatan yang rendah, sehingga mempengaruhi sifat mekanis seperti kekerasan dan keausan. Di sisi lain, tekanan kompaksi yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan *green body* menjadi getas dan mudah retak. Suhu sintering juga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sifat material *green body*. Suhu sintering yang

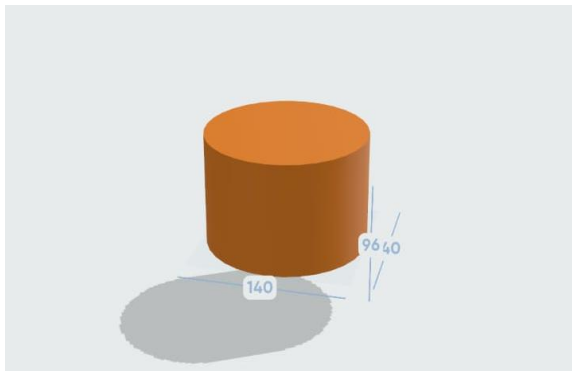
terlalu rendah dapat mengakibatkan ikatan antar partikel tidak optimal, sementara suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan material mengalami deformasi dan perubahan mikrostruktur.

2. Metode Penelitian

Penelitian pengembangan fokus pada pembuatan, pengujian, dan implementasi *green body* berbasis *Prototype*. Berikut ini adalah tahapan-tahapan penelitian yang akan dilakukan dalam penelitian ini:

a. Perancangan (*design*)

Tahapan dalam perancangan ini adalah membuat gambar kerja atau *design prototype* dari alat yang akan dibuat. Adapun *design prototype* dapat dilihat pada gambar 1 berikut ini:



Gambar 1. *Design Prototype*

b. Pembuatan Spesimen *Green Body*
Pembuatan design ini dilakukan dengan mengeksekusi semua bahan yang ada menjadi sesuai desain rancangan bahan. *Green body* setengah jadi dapat dilihat pada gambar 2 berikut:



Gambar 2. *Green Body*

Gambar 2 merupakan sebuah *Green body* memiliki peran penting

dalam proses additive manufacturing. Bentuk setengah jadi ini berguna untuk melakukan validasi desain dan uji coba awal sebelum dilakukan pemerkuatan lebih lanjut. Berikut ini adalah tahapan proses pembuatan *green body* menggunakan langkah-langkah:

1. Persiapan Bahan

Memilih dan mempersiapkan bahan-bahan seperti serbuk tembaga, serbuk besi, serbuk silikon, dan serbuk nikel dan pelarut sesuai formula yang ditetapkan.

2. Pengeringan dan Pengayakan Serbuk

Mengeringkan dan mengayak serbuk untuk mendapatkan ukuran butiran yang diinginkan.

3. *Mixing* Bahan

Memasukkan semua bahan ke dalam mixer dan melakukan proses blending hingga tercapai homogenitas

4. Pembuatan *Green Body*

Memadatkan campuran bahan yang sudah tercampur rata menggunakan alat pemadatan Serbuk dimasukkan ke dalam cetakan (*die*) kemudian diberikan tekanan tinggi menggunakan alat press.

5. Pemsinteran *Green Body*

Meletakkan *green body* ke dalam furnace dan memanaskannya sesuai program suhu yang telah ditetapkan yaitu pada suhu 700C.

6. Pengujian Keausan dan Kekerasan

Mengukur keausan dan kekerasan bahan paduan metal Cu, Fe, Si, Ni menggunakan alat uji yang sesuai yaitu menggunakan universal wear dan metode brinell

7. Evaluasi dan Pemeriksaan Hasil Uji Coba

c. pengujian Kekerasan Brinell

Setelah persiapan spesimen telah selesai, maka langkah berikutnya ialah persiapan alat uji kekerasan. Adapun persiapan pada alat uji kekerasan Brinell meliputi; 1) Pemilihan beban dilakukan dengan menekan tombol beban pada alat yang digunakan, dan 2) menentukan penetrator yang digunakan dalam

pengujian ini adalah bola baja dengan diameter 1,10, 1,09 dan 1,08 mm. Memasang penetrator dengan cara memutar baut yang menekan penetrator [2].

d. prosedur Pengujian Kekerasan

Setelah spesimen dan alat uji telah siap, kemudian dilakukan pengujian dengan langkah-langkah sebagai berikut; 1) Letakkan benda uji atau spesimen di atas anvil kemudian putar roda pengatur anvil. Untuk gerak keatas sesuai dengan arah jarum jam, bila menurunkan anvil putar roda tangan berlawanan arah jarum jam, 2) naikkan anvil perlahan-lahan sehingga benda uji menyentuh penetrator, jarum kecil dan jarum panjang bergerak, 3) amati jarum kecil dan tepatkan pada angka tiga dititik merah. Amati jarum panjang yang harus berhenti pada angka nol (0) pada skala hitam, 4) tekan tombol perlahan-lahan selama ± 1 detik dan lepaskan, jika jarum panjang belum bergerak berarti alat belum bekerja, maka diulangi lagi. 5) setelah jarum bergerak tunggu sampai ada bunyi tik = 15 detik dari ON, 6) turunkan anvil perlahan-lahan dengan memutar roda tangan berlawanan arah jarum jam, dan 7) bekas injakan penetrator yang dihasilkan diukur kemudian hasil pengukuran digunakan untuk mencari harga kekerasan melalui perhitungan [2].

e. Pengujian Keausan

Setelah specimen dan alat uji telah siap, kemudian dilakukan pengujian dengan langkah-langkah sebagai berikut; 1) letakkan benda uji atau spesimen di atas anvil kemudian putar roda pengatur anvil. Untuk gerak keatas sesuai dengan arah jarum jam, bila menurunkan anvil putar roda tangan berlawanan arah jarum jam, 2) naikkan anvil perlahan-lahan sehingga benda uji menyentuh penetrator, jarum kecil dan jarum panjang bergerak, 3) amati jarum kecil dan tepatkan pada angka tiga dititik merah. Amati jarum panjang yang harus berhenti pada angka nol (0) pada skala

hitam, 4) tekan tombol perlahan-lahan selama ± 1 detik dan lepaskan, jika jarum panjang belum bergerak berarti alat belum bekerja, maka diulangi lagi, 5) setelah jarum bergerak tunggu sampai ada bunyi tik = 15 detik dari ON, 6) turunkan anvil perlahan-lahan dengan memutar roda tangan berlawanan arah jarum jam, dan 7) bekas injakan penetrator yang dihasilkan diukur kemudian hasil pengukuran digunakan untuk mencari harga kekerasan melalui perhitungan [2].

f. Prosedur Pengujian Keausan

Pengujian keausan dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut; 1) menentukan kecepatan pengausan dengan mengatur perbandingan *gear* pada *speed change replaceable gear*, 2) menentukan jarak pengausan sepanjang 15 meter, 3) menentukan beban yang akan digunakan yaitu 6.36 kg, 4) letakkan benda uji atau spesimen pada *test piece holder*, kemudian dikencangkan dengan memutar *vice* searah jarum jam sampai spesimen tidak dapat bergerak, 5) tutup *rack* hingga benda uji atau spesimen menyentuh *revolving disc*, 6) tekan tombol *on* untuk menyalakan mesin dan tombol *off* untuk mematikan mesin pengujian keausan, 7) buka *rack* kemudian putar *vice* berlawanan arah jarum jam dan keluarkan benda uji atau spesimen dari *test piece holder*, dan 8) bekas injakan *revolving disc* yang dihasilkan diukur kemudian hasil pengukuran digunakan untuk mencari harga kekerasan melalui perhitungan [2].

Pada pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat *Ogoshi Universal High Speed Testing Machine*, dimana benda uji itu digesek dengan diberikan pembebanan dari cincin yang berputar dengan lama pengausan selama 1 menit. Pembebanan gesek ini akan menghasilkan kontak antara permukaan yang berulang-ulang yang pada akhirnya akan mengambil sebagian material pada permukaan sampel.

Besarnya jejak permukaan dari material tergesek itulah yang dijadikan dasar penentuan tingkat keausan pada material.

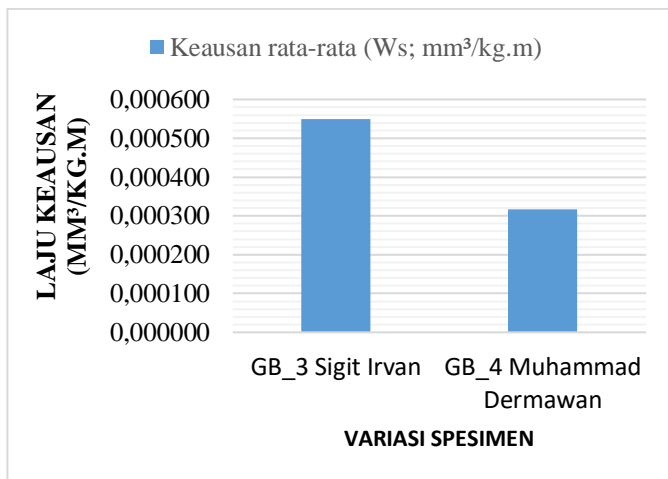
3. Hasil dan Pembahasan

Pengaruh Tekanan Kompaksi 117,8 Mpa dan Suhu Sintering 700°C Terhadap Tingkat Keausan *Greenbody* Paduan Cu, Fe, Si, Ni

Tabel 1. Hasil Pengukuran Keausan (GB_3 hasil penelitian dengan rekan peneliti Sigit Irvan Maulana., Data GB_4 adalah hasil penelitian mandiri)

Variasi Spesimen	Titik Uji	Tebal Disc (B;mm)	Jari-jari Disc (r;mm)	Panjang Wear (b;mm)	Volume Tergores (W;mm ³)	Keausan (Ws; mm ³ /kg.m)	Keausan rata-rata (Ws; mm ³ /kg.m)
GB_3	1	3,45	13,6	1,21	0,03739	0,00059	0,00055
	2	3,45	13,6	1,21	0,03739	0,00059	
	3	3,45	13,6	1,13	0,0301	0,00047	
GB_4	1	3,45	13,6	0,98	0,02016	0,00032	0,000318
	2	3,45	13,6	0,96	0,01848	0,00029	
	3	3,45	13,6	1,01	0,02194	0,00035	

Data hasil pengukuran laju keausan tercantum pada gambar berikut:



Gambar 3 Laju Keausan Apesimen

Berdasarkan data pada Tabel 1, dapat diobservasi bahwa spesimen GB_4 menunjukkan variasi nilai keausan pada tiga titik uji yang berbeda. Nilai keausan rata-rata spesimen GB_4 sebesar 0,000318 mm³/kg.m Hal ini menunjukkan bahwa material *green body* dari bahan paduan serbuk Tembaga (Cu), besi (Fe), silikon (Si),

dan nikel (Ni) memiliki ketahanan aus yang cukup baik.

Proses Pembuatan menggunakan tekanan kompaksi 117,8 MPa menghasilkan green body yang padat dan kuat karena butir-butir bahan saling menempel erat. Sintering pada suhu 700°C memperkuat struktur melalui difusi atom, membuat ikatan antar butir semakin kuat dan tahan terhadap gesekan. Hasil analisis menunjukkan sifat anti-aus yang baik, meskipun ada variasi keausan pada titik uji yang mungkin disebabkan oleh ketidakseragaman struktur mikro atau densitas. Keausan diuji pada tiga titik uji yang berbeda, meskipun suhunya sama, yaitu 700°C. Titik uji 1 menunjukkan keausan sebesar 0,00032 mm³/kg, titik uji 2 sebesar 0,00029 mm³/kg, dan titik uji 3 sebesar 0,00035 mm³/kg. Pada pengujian di tiga titik, nilai keausan terendah tercatat pada titik uji 2 sebesar 0,00029 mm³/kg. Peningkatan suhu sintering cenderung meningkatkan nilai keausan karena penurunan kekerasan spesimen.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Kekerasan Brinell (GB_3 hasil penelitian dengan rekan peneliti Sigit Irvan Maulana., Data GB_4 adalah hasil penelitian mandiri)

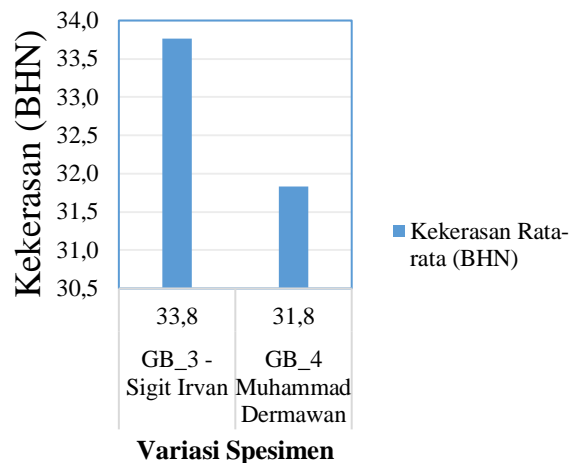
No	Variasi Spesimen	Titik Uji	Diameter (mm)	Kekerasan Brinell (BHN)	Kekerasan Rata-rata (BHN)
1	GB_3	1	1,07	33,1	33,76
		2	1,06	33,8	
		3	1,05	34,4	
2	GB_4	1	1,1	31,2	31,84
		2	1,09	31,8	
		3	1,08	32,5	

Perbedaan hasil ini mungkin disebabkan oleh pada tekanan kompaksi dan suhu sintering, di mana penelitian oleh (Setiyanto, 2019) menunjukkan bahwa peningkatan tekanan kompaksi mempengaruhi mikrostruktur material yang juga menemukan tingkat keausan pada suhu sintering yang sama. Tekanan Kompaksi dan

Suhu Sintering Terhadap Kekerasan *Green Body*.

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan uji Brinell pada *green body* yang disinter pada suhu 700°C. Hasil pengukuran kekerasan Brinell (BHN) disajikan pada Tabel 2.

Data hasil pengukuran kekerasan Brinell tercantum pada gambar 4 di bawah ini.



Gambar 4 Pengukuran Kekerasan Spesimen

Dari data pada Tabel 2, dapat dilihat bahwa spesimen GB_4 memiliki nilai kekerasan Brinell yang bervariasi pada tiga titik uji. Nilai kekerasan rata-rata untuk spesimen GB_4 adalah 31,84 BHN. Spesimen GB_4 menunjukkan variasi nilai kekerasan pada tiga titik uji yang berbeda, dengan nilai terendah 31,2 BHN dan tertinggi 32,5 BHN.

Tekanan kompaksi 117,8 MPa membuat butiran serbuk mencapai kepadatan maksimal. Sintering pada suhu 700°C memperkuat ikatan antar butir melalui difusi, menghasilkan struktur yang padat dan tahan terhadap kecacatan Brinell. Tekanan kompaksi tinggi dan suhu sintering tersebut meningkatkan kekerasan *green body* paduan tembaga (Cu), besi (Fe), silikon (Si), dan nikel (Ni). Variasi kekerasan pada titik uji yang berbeda disebabkan oleh ketidakseragaman mikrostruktur atau densitas setelah sintering. Pengujian kekerasan pada tiga

titik menunjukkan kekerasan terendah pada 31,2 BHN dan tertinggi pada 32,5 BHN. Peningkatan suhu sintering mempengaruhi penurunan kekerasan akibat pembentukan pori dan efek resin thermosetting yang menyebabkan penurunan porositas.

Perbedaan hasil ini mungkin disebabkan oleh pada tekanan kompaksi dan suhu sintering, di mana penelitian oleh (Setiyanto, 2019) menunjukkan bahwa peningkatan tekanan kompaksi mempengaruhi mikrostruktur material yang juga menemukan tingkat kekerasan pada suhu sintering yang sama.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan bahwa tekanan kompaksi dan suhu sintering mempengaruhi keausan *green body*. Spesimen GB_4 menunjukkan nilai keausan rata-rata sebesar 0.000318 mm³/kg.m, yang mengindikasikan ketahanan aus yang cukup baik, tekanan kompaksi dan suhu sintering juga mempengaruhi kekerasan *green body*. Spesimen GB_4 yang disinter pada suhu 700°C memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 31,84 BHN, menunjukkan kekerasan yang cukup baik untuk *green body*, terdapat korelasi antara keausan dan kekerasan *green body*, di mana material dengan kekerasan yang lebih tinggi cenderung memiliki ketahanan aus yang lebih baik dan variasi nilai keausan dan kekerasan pada titik uji yang berbeda menunjukkan adanya ketidakseragaman struktur mikro atau densitas pada *green body*, yang dapat dipengaruhi oleh parameter proses kompaksi dan sintering.

Ucapan terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan Yogyakarta atas dukungan bantuan penelitian dan terima kasih kepada Universitas Gadjah Mada (UGM) jurusan Teknik Mesin yang telah mengizinkan peneliti untuk melakukan penelitian.

Referensi

- [1] Abdulah, A., Shiediqque, A. D., Mutahar, M. I. Z., dan Panggabean, R. M. (2022). Pengaruh Variasi Temperatur Sintering pada Proses *Metal Injection Molding* Terhadap Densitas, Porositas, dan Kekerasan Sinter Part Berbahan SS 17-4 Ph. *Metal Indonesia*, 43(2), 75-82.
- [2] Asep, M. (2023). Efek Tekanan Kompaksi dan Suhu Sintering terhadap Densitas dan Kekerasan Komposit Matrik Aluminium diperkuat Silika Tailing. 12(02).
- [3] Chen, Q., Schmidt, F., Görke, O., Asif, A., Weinhold, J., Aghaei, E., & Shah, A. T. (2022). *Ceramic stereolithography of bioactive glasses: influence of resin composition on curing behavior and green body properties*. *Biomedicines*, 10(2), 395.
- [4] Habiby, M. N. A., Widodo, R. D., & Sumbodo, W. (2022). *Effect of Green Body Heating Rate on Mechanical and Physical Properties of Crucible Materials Made from Evaporation Boats Waste*. *REM (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal*, 7(1), 19-26.
- [5] Lestari, F. P., Saputra, B. A., Erryani, A., Mulyati, I., Dwijaya, M. S., & Kartika, I. (2021). Analisis Variasi Temperatur Sintering dan Ukuran Agen Pengembang Dolomit terhadap Fabrikasi Paduan Logam Mg-Ca-Zn Berpori Tertutup dengan Proses Metalurgi Serbuk. *TEKNIK*, 42(2), 128-136.
- [6] Maryanti, B., Pongsapan, L., Sholihin, R., Mesin, T., & Balikpapan, U. (2018). Pengaruh Kekerasan Brinell Pada Reducer Swing. 224–228.
- [7] Mulyadi, M., Djuhana, D., & Sunardi, S. Pembuatan Magnet Paduan Ferro Nikel pada Komposisi: Fe 70% dan Ni 30% melalui Teknik Metalurgi Serbuk dan Karakterisasinya. *Piston*, 2(2), 37-41.
- [8] Nanda, I. P., Pratoto, A., & Sari, W. H. (2023, June). Pengaruh *Degasser* Dan Serbuk *Slager* Terhadap Kekerasan Dan Struktur Makro-Mikro Paduan Aluminium Silikon-Tembaga (Al7Si-Cu) Menggunakan *Sand Casting*. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik UISU (SEMNASSTEK)* (Vol. 6, No. 1, pp. 93-98).
- [9] Nugroho, E., Rajabiah, N., Wahyudi, T. C., & Inai, J. (2023). *Pengaruh variasi temperatur dan holding time pada proses annealing leaf spring dumb truck bekas terhadap nilai kekerasan*. 12(1).
- [10] Pratama, I. G. B. A. Y., Suroso, I., dan Utami, N. (2023). Analisis Pengaruh Komposisi *Bimetal Fe-Cr* Dengan *Blending Powder Metallurgy* Terhadap Struktur Mikro. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 12(2).
- [11] Setiyanto, I. (2019). Pengaruh Variasi Temperatur Sintering Terhadap Ketahanan Aus Bahan Rem Sepatu Gesek (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta). *Jurnal Teknik*, 2(3), 1–6.
- [12] Susanto, H., Lusiani, R., Saefuloh, I., & Akbar, H. (2023). *Pengaruh perendaman bambu dengan air laut terhadap kekerasan dan laju keausan komposit kanvas rem*. 12(1), 80–87.
- [13] Supriyanto, A., Krisna, S. A., dan Hermawan, M. V. (2022). Eksperimen Variasi Ukuran Butir dan Tekanan Kompaksi Campuran Al-si terhadap Densitas dan Porositas Metode Metalurgi Serbuk. *Teknika*, 7(3), 108-115.
- [14] Triadi, A. A. A., Setyawan, P. D., & Kurniawan, I. K. (2023). Pengaruh laju pemanasan dan variasi komposisi limbah paduan aluminium dengan *Fly Ash* Batubara

terhadap kekerasan dan kekuatan tekan produk metalurgi serbuk. *Dinamika Teknik Mesin*, 13(2), 180-188.

- [15] Wilke, S. K., Mack, J. B., Kenel, C., & Dunand, D. C. (2021). *Evolution of directionally freeze-cast Fe²O³ and Fe²O³ + NiO green bodies during reduction and sintering to create lamellar Fe and Fe-20Ni foams. Journal of Alloys and Compounds*, 889, 161707.