

PEMBUATAN DAN PENGUJIAN SPESIMEN *PIN ON DISC* BERBASIS TEMBAGA UNTUK APLIKASI *HIGH SPEED TRAIN*

*Agustinus Dimas Krisna Adi Nugroho¹, Rusnaldy², Paryanto²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: adimaskrisna@gmail.com

Abstrak

Salah satu moda transportasi yang paling digemari oleh masyarakat Indonesia adalah kereta api. Badan pusat statistik menyebutkan bahwa pengguna kereta api mencapai angka 15.735 penumpang untuk wilayah Jabodetabek, 3.398 penumpang untuk wilayah Non Jabodetabek (Jawa), dan 305 untuk wilayah Sumatra, dengan total penumpang mencapai 19.438 (data bulan Maret 2022). Kebutuhan akan moda transportasi baru di dunia sangat memungkinkan untuk terbentuknya sebuah kereta cepat. Beberapa negara yang telah menggunakan moda transportasi kereta api cepat diantaranya adalah China, Jepang, Korea Selatan dan Prancis. Di Indonesia sendiri, kereta api cepat masih dalam tahap pengembangan. Target capaian sampai dengan tahun 2024 untuk inovasi teknologi perkeretapiian di Indonesia adalah dapat terbangunnya prototipe kereta api antar kota kecepatan 220 km/jam. Kinerja dari kampas rem memiliki pengaruh penting pada kemampuan pengereman dan keselamatan operasional pada kereta api cepat. Dalam penelitian ini akan dibahas mengenai pembuatan spesimen pin kampas rem dengan metode pembuatan yang menggunakan skala lab karena keterbatasan peralatan. Spesimen pin kampas rem dibuat dengan metode *powder metallurgy* dengan material serbuk yang digunakan meliputi serbuk tembaga (Cu), serbuk besi (Fe), serbuk grafit, serbuk ferokrom (Cr-Fe), serbuk molybdenum disulfida (MoS₂), dan serbuk silikon dioksida (SiO₂). Variasi dalam penelitian ini terdapat pada komposisi serbuk molybdenum disulfida dan grafit dengan interval sebesar 0,5% dan dibagi menjadi spesimen A, B, C, D, dan E sesuai dengan variasinya. Spesimen yang telah dibuat kemudian dilakukan pengujian densitas, kekerasan dan keausan. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa proses produksi spesimen pin kampas rem menggunakan skala lab berhasil dilakukan. Proses produksi dengan metode *powder metallurgy* menghasilkan spesimen dengan densitas tertentu yang akan berhubungan dengan hasil kekerasan maupun keausannya. Spesimen terbaik dengan porositas serta keausan terendah dan kekerasan tertinggi adalah spesimen E.

Kata kunci: *high speed train brake pads; powder metallurgy; uji densitas; uji keausan; uji kekerasan*

Abstract

One of the modes of transportation most favoured by the people of Indonesia is the train. The Central Statistics Agency stated that train users reached 15,735 passengers for the Greater Jakarta area, 3,398 passengers for the Non-Jabodetabek (Java) region, and 305 for the Sumatra region, with a total of 19,438 passengers (data for March 2022). The need for new modes of transportation in the world is possible for the formation of a high-speed train. Several countries that have used the high-speed train as their transportation are China, Japan, South Korea and France. In Indonesia itself, fast trains are still in the development stage. The achievement target by 2024 for railway technology innovation in Indonesia is to build a prototype inter-city train with a speed of 220 km/hour. The performance of the brake pads has an important influence on the braking capability and operational safety of fast trains. In this research, we will discuss the manufacture of brake pad pin specimens with a manufacturing method that uses a lab scale due to limited equipment. The materials used for processes are copper (Cu) powder, iron (Fe) powder, graphite powder, ferrochrome (Cr-Fe) powder, molybdenum disulfide (MoS₂) powder, and silicon dioxide powder (SiO₂). Variations in this study were determined by the composition of molybdenum disulfide powder and graphite with an interval of 0.5% and divided into specimens A, B, C, D, and E. Specimens that made

are then tested for density, hardness and wear and tear. The study's results showed that the production process of brake pad pin specimens using a lab scale was successfully carried out. The powder metallurgy method produces specimens with a specific density related to the hardness and wear results. Specimen E is the best specimen with the lowest porosity and wear and the highest hardness.

Keywords: *density test, hardness test, high speed train brake pads, powder metallurgy, wear test*

1. Pendahuluan

Transportasi merupakan hal yang tidak dapat terpisahkan dari kehidupan manusia di seluruh dunia, tak terkecuali Indonesia. Salah satu moda transportasi yang paling digemari oleh masyarakat Indonesia adalah kereta api. Badan pusat statistik menyebutkan bahwa pengguna kereta api mencapai angka 15.735 penumpang untuk wilayah Jabodetabek, 3.398 penumpang untuk wilayah Non Jabodetabek (Jawa), dan 305 untuk wilayah Sumatra, dengan total penumpang mencapai 19.438 (data bulan Maret 2022).

Seiring dengan perkembangan teknologi, banyak sektor transportasi yang sudah berkembang pula, tak terkecuali pada transportasi kereta api. Kebutuhan akan moda transportasi baru di dunia sangat memungkinkan untuk terbentuknya sebuah kereta cepat. Kereta api dengan kecepatan tinggi saat ini sangat populer karena bisa menawarkan kecepatan, kenyamanan, kestabilan, keamanan, hemat energi dan perjalanan ramah lingkungan kepada penumpang [1-3]. Beberapa negara yang telah menggunakan moda transportasi kereta api cepat diantaranya adalah China, Jepang, Korea Selatan dan Prancis. Negara-negara tersebut telah mengembangkan kereta cepat untuk menghubungkan kota-kota besar untuk memenuhi meningkatnya kebutuhan perjalanan warganya [4].

Pembangunan infrastruktur saat ini merupakan langkah yang ditempuh pemerintah Indonesia untuk mempercepat pemerataan pertumbuhan ekonomi di Indonesia. Target pembangunan infrastruktur ekonomi nasional salah satunya adalah konektivitas kereta api dengan tujuan mempermudah transportasi masyarakat dan pemerataan penduduk berupa pembangunan kereta api kecepatan tinggi. Target capaian sampai dengan tahun 2024 untuk inovasi teknologi perkeretaapian adalah dapat terbangunnya prototipe kereta api antar kota kecepatan 220 km/jam. Dasar hukum untuk pelaksanaan Prioritas Riset Nasional Teknologi Perkeretaapian ini adalah Perpres Nomor 18 Tahun 2020 tentang RPJMN Tahun 2020-2024, Permen Ristek-Dikti No. 38 tahun 2019 tentang Prioritas Riset Nasional Tahun 2020-2024, Rencana Induk Perkeretaapian Nasional 2030, Kementerian Perhubungan 2018. Beberapa manfaat tentunya akan dapat diperoleh untuk masyarakat Indonesia. Salah satu contohnya adalah dengan menggunakan moda transportasi kereta cepat ini, diperkirakan perjalanan Jakarta-Bandung yang sebelumnya memakan waktu 2,5 jam kini dapat ditempuh dengan waktu 36 menit saja.

Pada pengoperasian kereta api, sistem pengereman merupakan salah satu faktor yang paling penting, terutama pada kereta cepat, karena menyangkut keselamatan dari penumpang yang ada di dalamnya. Rem memiliki peranan penting untuk memperlambat maupun menghentikan laju dari sebuah kendaraan. Sistem pengereman terdiri dari dua komponen dasar yaitu cakram rem dan kampas rem. Untuk memastikan kereta dapat melambat, kampas rem yang digunakan harus memiliki sifat-sifat yang mumpuni.

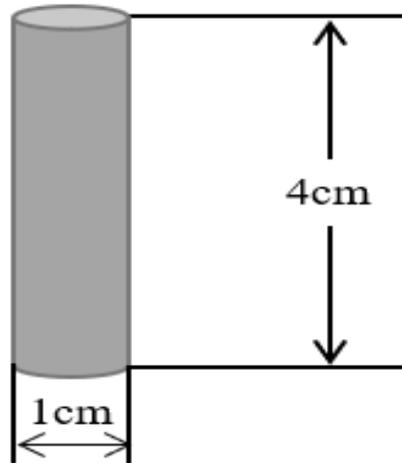
Kinerja dari kampas rem memiliki pengaruh penting pada kemampuan pengereman dan keselamatan operasional pada kereta api [5]. Jika dibandingkan dengan kereta konvensional, material kampas rem untuk kereta cepat harus memiliki koefisien gesek yang lebih stabil, ketahanan aus yang lebih baik, ketahanan thermal yang lebih tinggi, dan kekuatan mekanik yang cukup baik [6]. Kereta api cepat dengan 8 gerong dan 17 poros harus memiliki kampas rem yang dapat menyerap 2571 MJ dalam keadaan darurat pada saat melaju dengan kecepatan 350 km/jam [6]. Dalam pengoperasiannya, suhu permukaan dari kampas rem kereta cepat dapat mencapai 500°C sementara suhu *flash* nya bisa mencapai 900°C [7,8]. Kampas rem berbahan logam terutama berbahan tembaga telah menjadi pilihan untuk kereta api cepat karena memiliki kinerja gesekan yang luar biasa, ketahanan aus yang baik, konduktivitas termal yang tinggi dan suhu kerja yang tinggi [9-11]

Pada penelitian tugas akhir ini, penulis akan membuat spesimen *pin* kampas rem berbasis tembaga yang akan digunakan untuk kereta cepat. Spesimen *pin* kampas rem pada penelitian ini dibuat dengan menggunakan metode metalurgi serbuk [12]. Spesimen yang telah dibuat kemudian dilakukan pengujian yang meliputi pengujian densitas, pengujian kekerasan, dan pengujian keausan *pin on disc*. Karena keterbatasan alat, semua peralatan produksi maupun pengujian dalam penelitian ini dilakukan dengan skala lab.

2. Bahan dan Metode Penelitian

2.1 Proses Powder Metallurgy

Pada penelitian ini, pembuatan spesimen *pin* kampas rem dilakukan dengan proses *powder metallurgy*. Proses *powder metallurgy* terdiri dari proses *mixing*, proses kompaksi dan proses *sintering*. Spesimen *pin* kampas rem yang akan dibuat dalam penelitian ini merupakan spesimen berskala lab nantinya diharapkan memiliki bentuk silinder dengan diameter 1 cm dan tinggi 4 cm seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Spesimen *Pin* Kampas Rem

2.1.1 Material Serbuk yang Digunakan

Dalam penelitian ini digunakan variasi dengan cara mensubstitusi serbuk MoS_2 dan grafit dengan interval 0,5%. Untuk mengukur massa serbuk agar sesuai dengan kebutuhan digunakan *mini digital scale* 0,001 g – 20 g. Variasi komposisi serbuk logam yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Komposisi Serbuk Logam

No.	Material Serbuk	Formulasi				
		I	II	III	IV	V
1	Cu	55	55	55	55	55
2	Fe	22	22	22	22	22
3	Cr-Fe	8	8	8	8	8
4	MoS_2	2,5	2	1,5	1	0,5
5	SiO_2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
6	Grafit	9	9,5	10	10,5	11

2.1.2 Proses *Mixing*

Proses *mixing* dilakukan dengan menggunakan alat pencampur bentuk V yang berfungsi sebagai wadah untuk mencampur paduan serbuk-serbuk logam agar merata. Alat pencampur bentuk V yang digunakan pada penelitian ini terbuat dari pipa stainless steel 304 dengan diameter 1,25 inch yang dilas menjadi satu menyerupai bentuk V. Alat pencampur bentuk V ini digerakkan oleh motor *gearbox* dengan kecepatan putar 28 rpm. Pencampuran serbuk dilakukan selama 8 jam [12].

2.1.3 Proses Kompaksi

Pada proses kompaksi diperlukan alat bantu berupa cetakan. Cetakan berperan dalam membentuk serbuk agar sesuai dengan geometri yang diinginkan saat dilakukan penekanan oleh alat kompaksi. Cetakan terdiri dari tiga bagian yaitu penekan, dinding cetakan dan alas cetakan yang dapat dilepas untuk mengeluarkan spesimen. Bentuk dari cetakan yang digunakan mengikuti geometri spesimen yang akan dibuat yaitu silinder. Dalam penelitian ini, cetakan yang digunakan merupakan baja ST-90 yang dibuat dengan proses permesinan. Tekanan yang digunakan untuk membuat spesimen *pin* kampas rem adalah 400MPa [12]. Untuk mendapatkan gaya tekan yang diperlukan, maka dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan berikut ini.

$$F = P \times A \quad (1)$$

Dimana P merupakan tekanan yang diperlukan yaitu 400 MPa atau 400×10^6 Pa. A merupakan luas permukaan tekan dengan diameter 1 cm yaitu $0,0000785 \text{ m}^2$. Dengan data tersebut dapat dihitung bahwa tekanan yang diperlukan yaitu sebesar 3,14 ton. Hasil dari proses kompaksi disebut *green compact*.

2.1.4 Proses Sintering

Sintering adalah proses pemadatan dari gabungan atau kelompok serbuk dengan cara membentuk ikatan batas butir antar serbuk penyusunnya dari hasil proses kompaksi (*green compact*) dan berlangsung pada suhu di bawah titik leburnya. Tujuan dari sintering adalah untuk meningkatkan kekuatan dari *green compact* tersebut. Proses sintering dilakukan pada suhu 950°C dan *holding time* selama 2 jam [12].

2.2 Proses Pengujian.

Beberapa pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu uji densitas, uji kekerasan, dan uji keausan. Pengujian densitas pada penelitian ini menggunakan metode Archimedes dengan alat *densitymeter* yang terdapat pada Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Diponegoro. Pengujian kekerasan mikro pada percobaan ini adalah untuk mengetahui distribusi kekerasan spesimen *pin* kampas rem yang telah dibuat. Pengujian kekerasan dilakukan dengan alat *Micro Hardness Vickers* yang terdapat di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Diponegoro.

Sedangkan pengujian keausan dalam penelitian ini dilakukan menggunakan alat tribometer *pin on disc* yang terdapat di Laboratorium Perancangan Universitas Wahid Hasyim Semarang. Koefisien keausan dapat dihitung dengan metode [13] seperti pada persamaan 2 berikut.

$$K_D = \frac{V}{F_N \cdot S} \quad (2)$$

Dimana K_D merupakan koefisien keausan, V merupakan volume material yang hilang, S merupakan jarak, F_N merupakan beban norman.

Selain itu, laju keausan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3 berikut [14]

$$N = \frac{m_1 - m_2}{t \cdot A} \quad (3)$$

N merupakan laju keausan, m_1 dan m_2 merupakan massa spesimen sebelum dan sesudah dilakukan pengujian, t merupakan waktu pengujian, dan A merupakan luas permukaan kontak.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Spesimen *Pin* Kampas Rem

Pembuatan spesimen *pin* kampas rem dilakukan dengan metode *powder metallurgy* dengan mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Zhao, dkk [12]. Spesimen yang dihasilkan diharapkan memiliki diameter 1 cm dan tinggi 4 cm. Hasil spesimen *pin* kampas rem dapat dilihat pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Dimensi Hasil Spesimen

No.	Spesimen		Panjang Spesimen	Diameter Spesimen
1.	A	Spesimen I	40,9 mm	10,3 mm
		Spesimen II	40,8 mm	10,4 mm
2.	B	Spesimen I	40,7 mm	10,2 mm
		Spesimen II	40,8 mm	10,4 mm
3.	C	Spesimen I	40,6 mm	10,5 mm
		Spesimen II	40,7 mm	10,4 mm
4.	D	Spesimen I	40,4 mm	10,5 mm
		Spesimen II	40,6 mm	10,3 mm
5.	E	Spesimen I	40,8 mm	10,3 mm
		Spesimen II	40,1 mm	10,4 mm

Hasil dari dimensi spesimen kampas rem yang dibuat memiliki Panjang dan diameter sesuai dengan yang diharapkan yaitu dengan diameter 1 cm dan tinggi 4 cm. Selisih dari data yang ditemukan dapat disebabkan karena pengukuran berat masing-masing serbuk logam yang kurang teliti dan dimensi dari cetakan yang dibuat. Perubahan dimensi juga dapat terjadi pada saat proses sintering. Proses sintering adalah proses pembakaran setelah melalui proses pencetakan dimana terjadi proses penggabungan partikel-partikel serbuk melalui peristiwa difusi pada saat suhu

meningkat sehingga diperoleh suatu produk yang kuat dan lebih padat [15]. Proses sintering mengakibatkan air akan menguap dan akan meninggalkan rongga kosong yang sebelumnya di isi oleh air yang kemudian akan menyebabkan terbentuknya pori dan difusi atom. [16].

3.2 Hasil Uji Densitas

Pengujian densitas dilakukan untuk mengetahui massa jenis dari spesimen pin *brake pad* yang sudah dibuat. Hasil dari pengujian densitas dapat dilihat pada tabel 3 berikut.

Tabel 3. Hasil Uji Densitas

No.	Spesimen	Pengujian			Rata-rata Densitas (g/cm ³)
		I (g/cm ³)	II (g/cm ³)	III (g/cm ³)	
1.	A	4,84	4,84	4,90	4,86
2.	B	4,90	4,78	4,84	4,84
3.	C	4,88	4,76	4,84	4,83
4.	D	4,82	4,79	4,83	4,81
5.	E	4,88	4,77	4,85	4,83

Pengujian densitas dilakukan sebanyak tiga kali setiap variasi spesimen kemudian dihitung rata-rata dari ketiga data yang diperoleh. Berdasarkan Tabel 4.4 diketahui bahwa densitas dari spesimen pin *brake pad* A sebesar 4,86 (g/cm³), spesimen B sebesar 4,84 (g/cm³), spesimen C sebesar 4,83 (g/cm³), spesimen D sebesar 4,81 (g/cm³), dan spesimen E sebesar 4,83 (g/cm³). Hasil yang diperoleh tidak jauh berbeda dari densitas spesimen dari penelitian sebelumnya yaitu sebesar 4,8 (g/cm³) [12].

Densitas dari suatu material yang dibentuk melalui proses metalurgi serbuk dipengaruhi oleh tekanan yang diberikan pada saat proses kompaksi. Peningkatan densitas sebanding dengan peningkatan tekanan kompaksi. Jika tekanan yang diberikan semakin tinggi maka akan diperoleh bentuk yang lebih padat [22]. Selain itu, densitas dipengaruhi juga oleh porositas dari spesimen. Nilai porositas dapat didapatkan dengan menggunakan metode perbandingan persentase dari densitas teoritis dan densitas aslinya. Persamaan 4 dapat digunakan untuk mencari densitas teoretis dari suatu material komposit.

$$\rho = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \rho_3 V_3 + \dots \text{dst} \quad (4)$$

Densitas teoretis dan persentase porositas dari masing-masing variasi dapat dilihat pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Densitas Teoretis dan Presentase Porositas

No.	Spesimen	Densitas Teoretis	Densitas Aktual	Persentase Densitas	Persentase Porositas
		(g/cm ³)	(g/cm ³)		
1.	A	7,631	4,86	63,69%	36,31%
2.	B	7,617	4,84	63,54%	36,45%
3.	C	7,591	4,83	63,62%	36,37%
4.	D	7,589	4,81	63,38%	36,62%
5.	E	7,575	4,83	63,76%	36,24%

Persentase densitas didapatkan dari pembagian antara densitas aktual dan densitas teoretis kemudian dikali dengan 100. Persentase porositas dapat dihitung dengan mengurangi 100% dengan persentase densitas yang didapat tadi. Porositas merupakan ruang kosong yang terletak di antara partikel. Tekanan kompaksi yang besar menyebabkan jarak antar partikel menjadi semakin rapat sehingga nilai porositas akan semakin kecil. Nilai porositas berbanding terbalik dengan nilai densitas. Jika nilai porositasnya semakin kecil, maka kerapatan atau densitas dari suatu material akan semakin besar [17].

3.3 Hasil Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan sebanyak tiga kali di area yang berbeda pada satu permukaan pin kampas rem. Sebelum melakukan pengujian, permukaan dari spesimen yang akan diuji diampelas terlebih dahulu agar menghasilkan permukaan yang mengkilap untuk memudahkan proses perhitungan kekerasan nantinya. Hasil dari pengujian kekerasan spesimen kampas rem dapat dilihat pada tabel 5 berikut.

Tabel 5. Hasil Uji Kekerasan

No.	Spesimen	Pengujian ke-			Rata-rata (kgf/mm ²)	Rata-rata (GPa)
		I (kgf/mm ²)	II (kgf/mm ²)	III (kgf/mm ²)		
1.	A	63,5	67,4	70,30	67,1	0,658
2.	B	57,9	53,8	77,8	63,2	0,619
3.	C	60,7	40	66,2	66,2	0,650
4.	D	76,7	60,4	48	61,7	0,605
5.	E	57,9	53,8	77,8	67,7	0,664

Hasil kekerasan dari spesimen pin kampas rem yang terdapat pada Tabel 5 menunjukkan bahwa spesimen pin kampas rem yang dibuat pada penelitian ini memiliki kekerasan yang tidak jauh berbeda dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yaitu sebesar 0,6 GPa [12]. Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kekerasan dari suatu material adalah waktu sinter. Semakin lama waktu sinter maka kekerasan yang didapatkan akan semakin tinggi. Hal ini disebabkan oleh jumlah ikatan antar partikel yang terjadi semakin banyak karena distribusi temperatur lebih merata dan homogen [18].

Faktor lain yang dapat mempengaruhi kekerasan dari suatu material adalah porositas. Porositas dari produk akan mempengaruhi nilai kekerasannya, semakin rendah nilai porositas suatu produk maka nilai kekerasannya akan semakin tinggi [19]. Hal ini terbukti dari hasil kekerasan yang didapatkan tiap spesimen. Spesimen D dengan persentase porositas terbesar yaitu 36,62% memiliki kekerasan yang paling kecil yaitu 0,605 GPa. Selanjutnya spesimen B dengan persentase porositas 36,46% memiliki kekerasan 0,619 GPa. Kemudian dilanjutkan oleh spesimen C dan A dengan masing-masing persentase porositas 36,37% dan 36,31% memiliki kekerasan 0,650 GPa dan 0,658 GPa. Sedangkan spesimen E dengan persentase porositas terkecil 36,24% memiliki kekerasan yang paling tinggi yaitu sebesar 0,664 GPa.

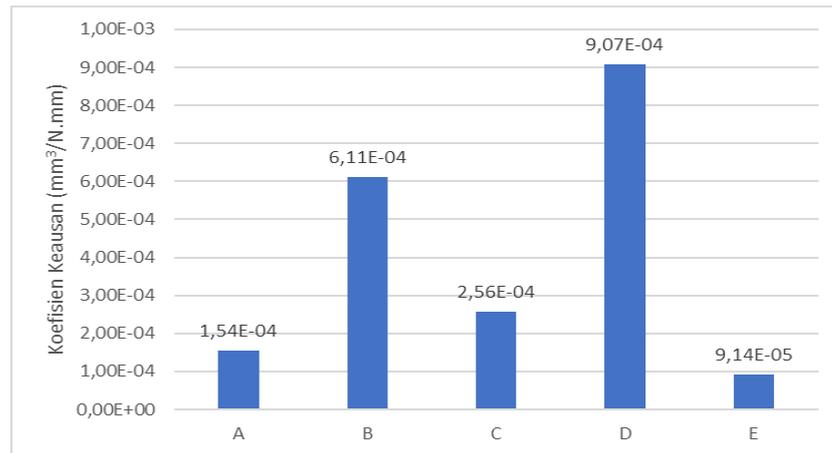
3.4 Hasil Uji Keausan

Pengujian keausan yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan beban 25N dan kecepatan putar *disc* 220rpm. Data yang didapatkan dari pengujian keausan dalam penelitian ini adalah koefisien keausan dan laju keausan. Pengujian keausan tribometer *pin on disc* dengan kecepatan *disc* 220 rpm dan radius 65mm. Atau dengan kata lain, pin diuji dalam kecepatan 1,5m/s. Massa dari spesimen kampas rem dihitung sebelum melakukan pengujian dan juga setiap 5 menit dilakukan pengujian selama 25 menit dengan menggunakan timbangan digital. Data dari massa yang didapatkan pada pengujian keausan kampas rem dapat dilihat pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Perubahan Massa Spesimen Kecepatan 220

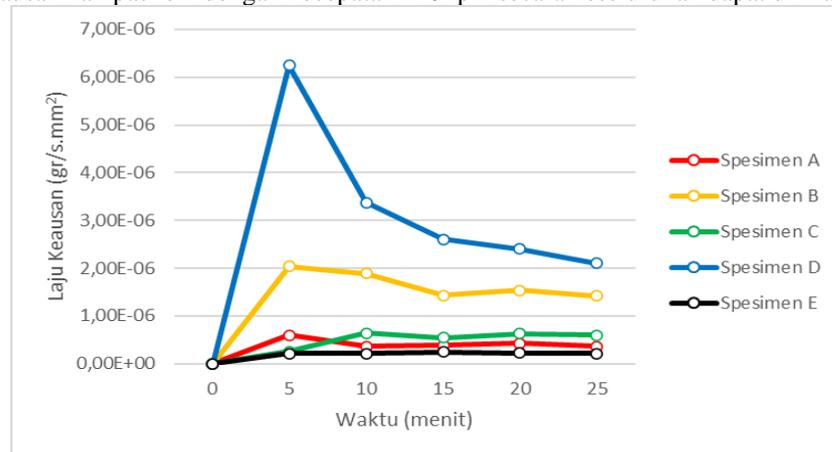
No.	Spesimen	Massa menit ke- (gram)					
		0	5	10	15	20	25
1.	A	7,302	7,288	7,285	7,275	7,262	7,260
2.	B	5,890	5,842	5,801	5,789	5,745	5,723
3.	C	6,591	6,585	6,561	6,553	6,532	6,521
4.	D	8,068	7,921	7,909	7,884	7,842	7,820
5.	E	6,045	6,04	6,035	6,028	6,024	6,020

Dari data massa spesimen yang telah diketahui, dapat dihitung koefisien keausan dari masing-masing variasi spesimen dengan menggunakan rumus yang terdapat pada persamaan 2. Hasil Perhitungan koefisien keausan kampas rem dengan kecepatan 220 rpm secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Koefisien Keausan Kecepatan 220 rpm

Selain koefisien keausan, laju keausan dapat dihitung dengan menggunakan rumus dalam persamaan 3. Hasil dari perhitungan laju keausan kampas rem dengan kecepatan 220 rpm secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Laju Keausan Kecepatan 220 rpm

Grafik pada Gambar 6 menunjukkan laju keausan kampas rem pada kecepatan 220 rpm. Pada grafik tersebut dapat diketahui bahwa spesimen D memiliki laju keausan terbesar, kemudian di urutan kedua ada spesimen B, diikuti oleh spesimen C, lalu spesimen A, kemudian spesimen E merupakan spesimen dengan laju keausan yang terkecil dari semua spesimen. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa hubungan antara koefisien keausan dan laju keausan adalah berbanding lurus. Semakin besar koefisien keausan dari suatu material, maka akan semakin besar pula laju keausannya. Pada spesimen D, terjadi kenaikan laju keausan pada awal proses pengujian kemudian mengalami penurunan laju keausan pada menit ke 5. Hal ini dapat terjadi karena permukaan dari spesimen kampas rem maupun *disc* yang kurang rata sehingga mengakibatkan gesekan yang terjadi semakin besar pada awal pengujian.

Hasil dari pengujian keausan menunjukkan bahwa kekerasan suatu material dapat mempengaruhi koefisien keausan maupun laju keausannya. Semakin keras suatu material maka koefisien maupun laju keausannya akan semakin besar. Hal ini dibuktikan dari hasil pengujian dimana spesimen E yang memiliki kekerasan yang terbesar, koefisien keausan dan laju keausannya paling rendah. Sedangkan spesimen D yang memiliki kekerasan yang paling kecil, koefisien keausan dan laju keausannya paling tinggi.

Data koefisien keausan dan laju keausan kampas rem pada penelitian ini jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Taufik, dkk [20] memiliki hasil yang lebih besar. Hal tersebut dapat terjadi karena pada saat proses produksi spesimen kampas rem menggunakan peralatan yang sederhana, terutama pada bagian alat pencampur serbuk. Dimana hal ini membuat pencampuran serbuk tidak merata yang dapat mempengaruhi proses pengujian keausan. Selain itu, ukuran serbuk yang digunakan juga dapat berpengaruh pada distribusi serbuk logam pada spesimen kampas rem sehingga dapat mempengaruhi proses pengujian keausan. Dalam penelitian ini, spesimen kampas rem juga dibuat dengan skala lab dimana luas permukaan dari spesimen tersebut lebih kecil dari kampas rem aslinya. Menurut Bimantoro [21], luas permukaan dapat mempengaruhi beban pengereman. Semakin kecil luas permukaannya maka beban pengereman akan semakin besar sehingga dapat berdampak pada koefisien keausan maupun laju keausannya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan, diantaranya adalah proses powder metallurgy dapat dilakukan dengan prosedur dan perhitungan yang telah dipersiapkan. Hal ini dapat dibuktikan dengan hasil pengujian yang telah dilakukan menyerupai hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Dari pengujian diketahui bahwa spesimen E memiliki densitas yang paling besar yaitu 4,86 g/cm³ dan spesimen D memiliki densitas terendah yaitu 4,83 g/cm³. Porositas tertinggi terdapat di spesimen D sebesar 36,62% dan porositas terendah yaitu spesimen E sebesar 36,24%. Hubungan antara porositas dan kekerasan adalah berbanding terbalik. Spesimen E memiliki kekerasan terbesar yaitu 0,664 GPa sedangkan spesimen D memiliki kekerasan terkecil yaitu 0,605 GPa. Kekerasan juga berbanding terbalik dengan koefisien aus dan laju ausnya. Koefisien aus dan laju aus spesimen D merupakan yang terbesar sedangkan koefisien aus dan laju aus spesimen E merupakan yang terkecil.

5. Daftar Pustaka

- [1] Sun Y., Jiang, Z., Gu, J., Zhou, M., Li, Y., Zhang, L., 2018, "Analyzing High Speed Rail Passengers' Train Choices Based On New Online Booking Data In China," *Transportation Research Part C*, 97: 96-113.
- [2] Li, L.S.Z., Yang, F.X., Cui, C., 2019, "High-Speed Rail And Tourism in China: An Urban Agglomeration Perspective," *International Journal of Tourism Research*, 21: 45-60.
- [3] Ceraolo, M., Lutzemberger, G., Meli, E., Pugi, L., Rindi, A., Pancari, G., 2018, "Energy Storage Systems to Exploit Regenerative Braking in DC Railway Systems: Different Approaches to Improve Efficiency of Modern High-Speed Trains," *Journal of Energy Storage*, 16: 269-279.
- [4] Zhou, L., Shen, Z., 2011, "Progress in High-Speed Train Technology Around the World," *Journal of Modern Transportation*, 19: 1-6.
- [5] Shi, L.B., Wang, F., Ma, L., Liu, Q.Y., Guo, J., Wang, W.J., 2018, "Study of The Friction and Vibration Characteristics of The Braking Disc/Pad Interface Under Dry and Wet Conditions," *Tribology International*, 127: 533-544.
- [6] Xiao, J.K., Xiao, S.X., Chen, J., Zhang, C., 2020, "Wear Mechanism of Cu-Based Brake Pad for High-Speed Train Braking at Speed of 380Km/h," *Tribology International*, 150: 1-8.
- [7] Kasem, H., Brunel, J.F., Defrenoy, P., Siroux, M., Desmet, B., 2011, "Thermal Levels and Subsurface Damage Induced by The Occurrence of Hot Spots During High-Energy Braking," *Wear*, 270: 355-364.
- [8] Mann, R., Magnier, V., Brunel, J.F., Brunel, F., Dufrenoy, P., Henrion, M., 2017, "Relation Between Mechanical Behavior and Microstructure of A Sintered Material for Braking Application," *Wear*, 386-387: 1-16.
- [9] Zhou, H.B., Yaou, P.P., Xiao, Y.L., Fan, K.Y., Zhang, Z.Y., Gong, T.M., Zhao, L., Deng, M.W., Liu, C., Ling, P., 2019, "Friction and Wear Maps of Copper Metal Matrix Composites with Different Iron Volume Content," *Tribology International*, 132: 199-210.
- [10] Kovalchenko, A.M., Fushchich, O.I., Danyluk, S., 2012, "The Tribological Properties and Mechanism of Wear of Cu-Based Sintered Powder Materials Containing Molybdenum Disulfide and Molybdenum Diselenite Under Unlubricated Sliding Against Copper," *Wear*, 290-291: 106-123.
- [11] Kennedy, F.E., Balbahadur, A.C., Lashmore, D.S., 1997, "The Friction and Wear of Cu-Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composites for Brake Applications," *Wear*, 203-204: 715-721.
- [12] Zhao, S., Yan, Q., Peng, T., Zhang, X., Wen, Y., 2020, "The Braking Behaviors of Cu-Based Powder Metallurgy Brake Pads Mated with C/C-SiC Disk for High-Speed Train," *Wear*, 448-449: 1-11.
- [13] Archard, J.F., 1953, "Contact and Rubbing of Flat Surfaces," *Journal of Applied Physics*, 24: 981-988.
- [14] Sukamto, 2012, "Analisis Keausan Kampas Rem pada Sepeda Motor," *Jurnal Teknik*, 2: 31-39.
- [15] Callister, W.D., Rethwisch, D.G., 2011. "Materials science and engineering: an introduction," Wiley, New York.
- [16] Sulistyono, 2018, "Dampak Proses Sintering Material Keramik pada Sifat Mekanik dan Dimensi Suatu Produk," *ROTASI*, 20: 244-248.
- [17] Gita, N.H., Widyastuti, 2014, "Pengaruh Komposisi Cu dan Variasi Tekanan Kompaksi terhadap Densitas dan Kekerasan pada Komposit W-Cu untuk Projektil Peluru dengan Proses Metalurgi Serbuk," *Jurnal Teknik Pomits*, 3: 96-101.
- [18] Triadi, A.A.A., Wangi, K.G.K., Setyawan, P.D., 2022, "Efek Suhu Sintering dan Komposisi Bahan terhadap Karakteristik Mekanik Komposit Berbahan Limbah Aluminium dan Kaca Menggunakan Metode Metalurgi Serbuk," *Dinamika Teknik Mesin*, 12: 19-28.
- [19] Safira, H., Sutjipto, S., Wiranegara, H., 2020, "Karakteristik Pengaruh Suhu Sintering terhadap Kekerasan, Porositas dan Penyusutan Roda Gigi Lurus Berbahan Serbuk Besi," *Metal Indonesia*, 42: 1-10.
- [20] Taufik, A., Darmanto, Syafa'at, I., 2018 "Analisis Keausan Kampas Rem pada Disc Brake dengan Variasi Kecepatan," *Jurnal Ilmiah Momentum*, 14: 27-32.
- [21] Bimantoro, E., Darmanto, 2022, "Analisis Keausan Kampas dengan Variasi Jumlah Alur pada Kampas Rem," *Jurnal Ilmiah Momentum*, 18: 151-155.