

Proses Pembuatan Brake Pad Berbasis Tembaga Dengan Metodologi Metalurgi Serbuk

Nur Kollis Fathurrohman^a, R Rusnaldy^a, Sultan Haydar At Toriq^a dan P Paryanto^{a,*}

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: paryanto@ft.undip.ac.id

Abstract

This study aims to systematically analyze the manufacturing process of copper-based (Cu-based) brake pads using the powder metallurgy method. This technique was selected due to its capability to produce materials with high homogeneity, optimal density, and precise dimensional control. The fabrication process consists of four main stages: powder mixing, compaction, sintering, and surface finishing. The materials used include copper (Cu) powder as the primary matrix, iron (Fe) as a structural reinforcement, graphite as a solid lubricant, ferrochromium (FeCr) to enhance wear resistance, molybdenum disulfide (MoS₂) as a high-temperature lubricant additive, and silicon dioxide (SiO₂) as a thermal stabilizer. The mixing process was carried out for 8 hours using a V-blender, followed by compaction at a pressure of 650 MPa to form a green compact, and sintering at 950 °C for 3 hours under an inert atmosphere to promote metallurgical bonding between particles. The final stage, polishing, was performed to obtain a smooth and uniform surface. The analysis indicates that this combination of processes effectively produces a dense and homogeneous structure, making it suitable as a foundation for developing locally manufactured brake pads for high-speed train applications. This is consistent with observational results showing that the specimens after sintering and finishing exhibit good geometric stability, uniform surface characteristics, and no visible cracks or macroscopic defects, indicating that the applied process operates in a stable and consistent manner.

Keywords: Powder metallurgy process, copper-based composite, compaction pressure, sintering parameters, tribological material fabrication.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara sistematis proses pembuatan brake pad berbasis tembaga (Cu) menggunakan metode metalurgi serbuk (powder metallurgy). Metode ini dipilih karena memiliki kemampuan menghasilkan material dengan homogenitas tinggi, kepadatan optimal, serta kontrol dimensi yang presisi. Proses pembuatan dilakukan melalui empat tahapan utama, yaitu pencampuran serbuk (mixing), kompaksi (compaction), sintering, dan penyempurnaan permukaan (finishing). Bahan yang digunakan meliputi serbuk tembaga (Cu) sebagai matriks utama, besi (Fe) sebagai penguat struktur, grafit sebagai pelumas padat, ferrochromium (FeCr) untuk meningkatkan ketahanan aus, molybdenum disulfide (MoS₂) sebagai aditif pelumas suhu tinggi, dan silikon dioksida (SiO₂) sebagai penstabil termal. Pencampuran dilakukan selama 8 jam menggunakan mesin V-blender, diikuti dengan proses kompaksi pada tekanan 650 MPa untuk membentuk green compact, kemudian disinter pada suhu 950 °C selama 3 jam dalam atmosfer inert untuk menghasilkan ikatan metalurgi antar-partikel. Tahap akhir berupa polishing dilakukan untuk memperoleh permukaan halus dan seragam. Analisis menunjukkan bahwa kombinasi tahapan proses tersebut efektif dalam menghasilkan struktur padat yang homogen dan layak digunakan sebagai dasar pengembangan brake pad untuk aplikasi kereta berkecepatan tinggi. Hal ini sejalan dengan hasil observasi yang menunjukkan bahwa spesimen hasil sintering dan finishing memiliki kestabilan geometris yang baik, permukaan yang seragam, serta tidak menunjukkan adanya retak maupun cacat makroskopik, yang mengindikasikan bahwa proses yang diterapkan berjalan stabil dan konsisten.

Kata kunci: Proses metalurgi serbuk, Komposit berbasis tembaga, Tekanan pemadatan, Parameter penyinteran, Fabrikasi material tribology.

1. Pendahuluan

Kebutuhan akan sistem pengereman yang andal pada kereta berkecepatan tinggi (*High-Speed Train*, HST) menuntut pengembangan material *brake pad* dengan ketahanan termal dan mekanik yang tinggi. Pada sistem HST, energi kinetik yang sangat besar selama deselerasi harus dikonversi menjadi panas melalui gesekan, sehingga material kampas rem diharuskan memiliki stabilitas termal, ketahanan aus, dan konduktivitas panas yang unggul [1,2]. *Brake pad* konvensional berbasis organik, yang umumnya menggunakan resin fenolik sebagai pengikat, memiliki keterbatasan

karena degradasi termal terjadi pada suhu di atas 350 °C [3]. Kondisi tersebut menyebabkan penurunan koefisien gesek, deformasi material, dan keausan berlebih sehingga tidak sesuai untuk aplikasi pada kecepatan di atas 200 km/jam [4].

Sebagai alternatif, *brake pad* berbasis logam, khususnya berbasis tembaga (Cu), banyak dikembangkan karena sifat fisiknya yang unggul, seperti konduktivitas panas tinggi (385 W/m·K), kestabilan dimensi, serta kemampuan mempertahankan koefisien gesek pada rentang suhu hingga 600 °C [5]. Tembaga juga memiliki kemampuan transfer panas yang cepat, sehingga dapat mengurangi potensi *thermal fade* saat pengereman berulang. Selain itu, paduan Cu dengan elemen seperti Fe, FeCr, grafit, dan MoS₂ telah terbukti meningkatkan ketahanan aus serta memperkuat pembentukan *tribo-film* stabil pada antarmuka gesek [1,6].

Metode *powder metallurgy* (PM) merupakan pendekatan yang efektif untuk menghasilkan material *brake pad* logam dengan homogenitas mikrostruktur tinggi dan porositas terkendali. Melalui tahapan *mixing*, *compaction*, dan sintering, partikel logam halus dikompaksi di bawah tekanan tinggi dan kemudian disinter pada suhu mendekati titik lebur, membentuk ikatan metalurgi antar-partikel [7,8]. Proses ini memungkinkan kontrol yang presisi terhadap ukuran butir, densitas, serta distribusi fasa, yang sulit dicapai dengan teknik pengecoran konvensional. Keunggulan lainnya adalah efisiensi material yang tinggi dan limbah produksi yang minimal, menjadikannya metode yang ramah lingkungan dan ekonomis untuk produksi massal komponen teknik berpresisi tinggi [9].

Sejumlah penelitian sebelumnya telah membuktikan keberhasilan metode metalurgi serbuk dalam meningkatkan sifat mekanik dan tribologi material *Cu-based composites*. [1] menunjukkan bahwa *Cu-Fe-graphite composites* hasil sintering pada 950 °C memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang lebih tinggi dibanding produk *casted*. Sementara itu, [10] melaporkan bahwa penambahan MoS₂ sebesar 2 wt% mampu menurunkan laju keausan hingga 50% tanpa mengorbankan koefisien gesek. Temuan tersebut menegaskan bahwa parameter proses seperti tekanan kompaksi, waktu pencampuran, dan suhu sintering memiliki pengaruh langsung terhadap mikrostruktur dan performa material yang dihasilkan.

Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada analisis proses pembuatan *brake pad* berbasis tembaga menggunakan metodologi metalurgi serbuk, mencakup tahapan pencampuran, kompaksi, sintering, dan finishing. Fokus utama penelitian bukan pada karakterisasi hasil uji, melainkan pada kajian teknis dan sistematis mengenai tahapan proses pembentukan material, kontrol parameter, serta potensi penerapannya pada *brake pad* kereta berkecepatan tinggi yang dikembangkan di Indonesia.

2. Material dan metode penelitian

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan menerapkan metode *powder metallurgy* (PM) atau metalurgi serbuk. Metode ini dipilih karena kemampuannya menghasilkan material logam dengan mikrostruktur homogen, densitas tinggi, dan porositas yang dapat dikontrol secara presisi. Pendekatan PM berbeda dari teknik pengecoran konvensional karena tidak melibatkan proses peleburan, melainkan pembentukan padatan melalui penekanan dan sintering partikel logam halus. Teknik ini memungkinkan pengendalian dimensi, morfologi partikel, dan distribusi fasa yang lebih seragam sehingga sesuai untuk aplikasi komponen teknik berpresisi tinggi seperti *brake pad* berbasis logam [11,12].

2.1 Persiapan Material

Penelitian ini menggunakan bahan dasar dalam bentuk serbuk logam berukuran mikro dengan kemurnian minimal 99% dan ukuran partikel di bawah 75 µm. Pemilihan bahan mengacu pada karakteristik material yang dibutuhkan untuk sistem pengereman berkecepatan tinggi, yaitu konduktivitas panas tinggi, ketahanan aus, dan stabilitas termal. Komposisi material terdiri dari tembaga (Cu) sebagai matriks utama, besi (Fe) sebagai penguat mekanik, grafit (C) sebagai pelumas padat, *ferrochromium* (FeCr) sebagai penguat ketahanan oksidasi dan adhesi, *molybdenum disulfide* (MoS₂) sebagai aditif pelumas suhu tinggi, serta *silicon dioxide* (SiO₂) yang berfungsi sebagai penstabil struktur dan pengontrol porositas selama proses sintering [10,13].

Seluruh bahan dikeringkan sebelum digunakan untuk menghilangkan kelembapan yang dapat mengganggu homogenitas pencampuran. Pemilihan kombinasi Cu-Fe-C-FeCr-MoS₂-SiO₂ didasarkan pada hasil penelitian terdahulu yang menunjukkan peningkatan signifikan pada stabilitas termal dan ketahanan aus material *Cu-based composites* [5,14]. Bahan-bahan tersebut disiapkan dalam wadah tertutup untuk menghindari oksidasi, kemudian ditimbang dengan presisi sesuai rasio komposisi yang telah ditentukan.

Tabel 1. Komposisi serbuk *brake pad*

Elemen	Cu	Fe	Graphite	MoS ₂	FeCr	SiO ₂
Berat (%)	55	22	10	2	9	2
Berat (gr)	39,08	13,73	1,74	0,8	5,14	0,42

2.2 Proses Pencampuran (*Mixing*)

Tahapan pencampuran dilakukan menggunakan mesin V-blender dengan kecepatan rotasi 23 rpm selama delapan jam. Proses ini bertujuan menghasilkan campuran serbuk yang homogen sehingga distribusi setiap partikel logam dan aditif merata di seluruh volume. Campuran homogen sangat penting karena memengaruhi efektivitas difusi atom selama proses sintering, yang secara langsung menentukan kekompakan dan kekuatan mekanik akhir [11].

Prosedur pencampuran dilakukan dengan menambahkan serbuk sesuai urutan massa jenis, dimulai dari Cu, diikuti Fe, FeCr, grafit, MoS₂, dan terakhir SiO₂. Selama pencampuran, wadah V-blender ditutup rapat untuk mencegah oksidasi tembaga. Penelitian [12] menyatakan bahwa waktu pencampuran minimal enam jam dengan kecepatan moderat menghasilkan distribusi partikel seragam dan mengurangi potensi segregasi massa jenis antar-serbuk. Homogenitas pada tahap ini menjadi fondasi utama untuk menghasilkan *green compact* yang padat dan bebas cacat.



a. Persiapan serbuk bahan



b. Penimbangan serbuk



c. Pencampuran serbuk

Gambar 1. Alur proses pencampuran serbuk menggunakan metode *powder metallurgy*

2.3 Proses Kompaksi (*Compaction*)

Serbuk hasil pencampuran selanjutnya dikompaksi menggunakan *Universal Testing Machine* berkapasitas 100 ton. Cetakan yang digunakan berbentuk segitiga sesuai desain *triangle brake pad*. Proses dilakukan pada tekanan 650 MPa dengan waktu tahan 30 detik pada suhu ruang (25 ± 2 °C). Tujuan tahap ini adalah membentuk *green compact* yang memiliki densitas awal sekitar 80–85% dari densitas teoritis. Tekanan tinggi menyebabkan deformasi plastis antar-partikel, sehingga terjadi *interlocking* mekanik yang menghasilkan kekuatan awal pada padatan [15].

Kualitas *green compact* diamati dari permukaan dan integritas bentuknya. Padatan yang baik memiliki permukaan halus, tidak retak, dan memiliki bentuk mendekati spesifikasi cetakan. Tekanan kompaksi yang terlalu rendah dapat menghasilkan porositas tinggi, sedangkan tekanan berlebih dapat menimbulkan retak internal (*lamination crack*). [12] melaporkan bahwa tekanan optimum berkisar antara 600–700 MPa untuk sistem Cu–Fe guna memperoleh kepadatan tinggi tanpa menimbulkan deformasi internal. Oleh karena itu, tekanan 650 MPa dipilih sebagai kondisi ideal pada penelitian ini.



a. Pengisian serbuk ke cetakan (Mold)



b. Pemasangan punch dan penataan cetakan



c. Proses penekanan (Kompaksi)

Gambar 2. Tahapan proses kompaksi serbuk pada pembuatan *brake pad*

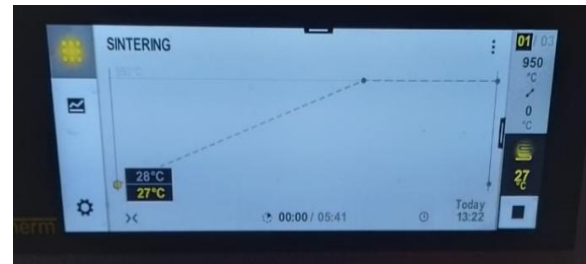
2.4 Proses Sintering

Proses sintering merupakan tahap kunci dalam metode metalurgi serbuk, yang bertujuan membentuk ikatan metalurgi permanen antar-partikel melalui mekanisme difusi padat. Sintering dilakukan dalam *box-type electric furnace* pada suhu 950 °C selama tiga jam menggunakan atmosfer gas nitrogen (N₂) untuk mencegah oksidasi tembaga. Menurut [8], suhu tersebut merupakan rentang ideal untuk sistem Cu–Fe karena mendukung difusi atom antar-logam tanpa menyebabkan pelelehan lokal pada matriks tembaga.

Proses pemanasan dilakukan bertahap untuk menjaga kestabilan termal spesimen, dimulai dengan pemanasan awal pada 200–400 °C untuk menguapkan gas volatil dan kelembapan, kemudian pemanasan utama hingga 950 °C untuk memicu pertumbuhan leher difusi (*neck growth*), serta pendinginan terkontrol di dalam tungku untuk mencegah retakan akibat tegangan sisa. Pada tahap ini, ukuran butir meningkat, porositas menurun, dan terjadi penyusutan volume akibat densifikasi. Studi oleh [11] menunjukkan bahwa pengaturan waktu tahan sintering berperan penting dalam memaksimalkan ikatan metalurgi, di mana peningkatan waktu di atas tiga jam hanya memberikan efek marginal terhadap kekompakan, namun berisiko menyebabkan pertumbuhan butir berlebihan (*grain coarsening*).



a. Sampel sebelum dimasukkan ke *furnace*



b. Pengaturan suhu sinting pada *furnace*

Gambar 3. Tahapan proses sinting pada pembuatan *brake pad*

2.5 Validasi Proses

Seluruh tahapan proses divalidasi berdasarkan standar ASTM B925-22 dan ISO 5755 tentang prosedur pembuatan dan karakterisasi material hasil metalurgi serbuk. Parameter suhu sinting dan tekanan kompaksi disesuaikan dengan hasil penelitian [10], yang menunjukkan peningkatan kepadatan hingga 96% dari densitas teoritis pada tekanan 650 MPa dan suhu sinting 950 °C. Dengan pengendalian parameter tersebut, proses yang digunakan dalam penelitian ini terbukti menghasilkan *brake pad* berbasis tembaga dengan mikrostruktur homogen, densitas tinggi, dan stabilitas termal yang sesuai untuk aplikasi sistem pengereman berkecepatan tinggi sebagaimana juga dilaporkan oleh [11] dan [12].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Tahap Persiapan Material

Tahapan persiapan material merupakan fondasi utama dalam proses metalurgi serbuk karena komposisi dan morfologi partikel akan menentukan sifat akhir material yang dihasilkan. Tembaga (Cu) dipilih sebagai matriks utama karena memiliki konduktivitas panas yang tinggi serta kestabilan termal yang baik. Penambahan Fe dan FeCr bertujuan untuk meningkatkan kekuatan struktural dan ketahanan aus melalui pembentukan fasa keras Cu-Fe yang terdistribusi secara merata setelah proses sinting [13]. Sementara itu, grafit dan MoS₂ berfungsi sebagai pelumas padat yang mampu membentuk lapisan pelindung (*tribo-film*) selama gesekan, sehingga mengurangi laju keausan. SiO₂ digunakan dalam jumlah kecil sebagai pengontrol porositas agar struktur padatan tidak terlalu rapat namun tetap mampu mendisipasi panas dengan baik [8]. Kombinasi komponen ini didesain untuk mencapai keseimbangan antara konduktivitas termal, kekuatan mekanik, dan kestabilan tribologi sebagaimana telah terbukti efektif pada material *Cu-based composites* [4].

3.2 Tahap Pencampuran (*Mixing*)

Proses pencampuran memiliki peran kritis dalam menentukan homogenitas mikrostruktur material. Pencampuran dilakukan menggunakan V-blender selama delapan jam untuk memastikan distribusi partikel yang merata. Berdasarkan teori kinetika partikel, homogenitas campuran meningkat seiring lamanya waktu dan kecepatan rotasi pencampuran, namun jika terlalu lama dapat menyebabkan penggumpalan akibat gaya elektrostatis antar-partikel [11].

Dalam penelitian ini, durasi pencampuran delapan jam dianggap optimum karena menghasilkan distribusi serbuk yang seragam tanpa indikasi aglomerasi setelah pengayakan 200 mesh. [12] melaporkan bahwa homogenitas campuran yang baik meningkatkan efisiensi difusi atom Cu-Fe selama sinting hingga 30% dibanding campuran heterogen. Homogenitas yang tercapai pada tahap ini juga memastikan terbentuknya *green compact* dengan distribusi porositas yang merata, sehingga mengurangi risiko retakan termal saat proses pemanasan.



Gambar 4. Hasil pencampuran serbuk

3.3 Tahap Kompaksi (*Compaction*)

Tahap kompaksi merupakan proses pembentukan awal *green compact* yang sangat menentukan densitas awal dan integritas geometris *brake pad* hasil metalurgi serbuk. Pada penelitian ini, serbuk campuran hasil *mixing* dimasukkan ke dalam cetakan baja berbentuk segitiga dan dikompaksi menggunakan *Universal Testing Machine* berkapasitas 100 ton dengan tekanan 650 MPa selama 30 detik pada suhu ruang (25 ± 2 °C). Tekanan tinggi ini menghasilkan deformasi plastis antar-partikel sehingga terjadi ikatan mekanik melalui mekanisme *cold welding*. Proses ini bertujuan untuk mengurangi porositas awal dan menghasilkan bentuk padat dengan struktur seragam di seluruh volume [15].



Gambar 5. *Green compact brake pad*

Hasil kompaksi ditunjukkan pada Gambar 5, di mana spesimen berbentuk *triangle pad* tampak memiliki permukaan halus dan dimensi yang seragam. Tidak ditemukan retak permukaan, *delamination*, ataupun deformasi geometris yang menandakan terjadinya *over-compaction*. Permukaan spesimen yang mengkilap menandakan deformasi plastis yang baik pada partikel tembaga, menunjukkan keberhasilan pembentukan ikatan mekanik antar-partikel selama proses penekanan. Fenomena ini sesuai dengan hasil penelitian [12] yang menjelaskan bahwa tekanan optimum dalam rentang 600–700 MPa dapat menghasilkan *green compact* dengan kepadatan hingga 85 % dari nilai teoritis tanpa memicu kerusakan internal.

Secara visual, spesimen menunjukkan integritas struktural yang tinggi. Lubang pusat hasil cetakan terbentuk simetris tanpa deformasi, menandakan gaya tekan terdistribusi secara aksial dan seimbang selama proses. Kondisi ini membuktikan bahwa sistem penekanan dan cetakan memiliki keselarasan geometris yang baik, sehingga gaya tekan tersalurkan merata pada seluruh permukaan serbuk. Warna logam yang seragam tanpa bercak gelap atau area cacat juga menunjukkan bahwa kelembapan dan udara terperangkap berhasil diminimalkan selama kompaksi, mencegah terbentuknya rongga mikro yang dapat menurunkan kekuatan padatan setelah sintering.



a. *Punch* yang mengalami deformasi (bending)



b. *Green compact* yang mengalami kerusakan struktural

Gambar 6. Kegagalan proses kompaksi

Namun demikian, proses kompaksi juga menunjukkan beberapa bentuk kegagalan yang perlu diperhatikan seperti yang ditunjukkan gambar 6. Deformasi pada *punch* dalam bentuk *bending* mengindikasikan adanya ketidakseimbangan distribusi tekanan selama pemadatan yang dipengaruhi oleh friksi dinding cetakan [16]. Kegagalan juga terlihat pada *green compact* yang mengalami *edge chipping*, retak tepi, dan pecah lokal ketika dikeluarkan dari cetakan. Kondisi ini menunjukkan bahwa *green strength* belum sepenuhnya memadai untuk menahan tegangan geser dan tarik yang timbul selama proses *ejection*, terutama pada bagian dengan densitas lebih rendah [12]. Friksi dinding *die* yang tinggi turut memperbesar konsentrasi tegangan pada permukaan *compact*, mempercepat terbentuknya kerusakan [13]. Selain itu, tekanan kompaksi yang mendekati batas optimum dapat menyebabkan *density gradient* antara permukaan dan bagian dalam *compact*, membuat struktur menjadi lebih rentan terhadap retak lokal [5]. Analisis ini menunjukkan bahwa meskipun parameter tekanan utama berada pada rentang optimal, faktor pendukung seperti pelumasan, homogenitas serbuk, dan kestabilan transfer tekanan harus dikontrol lebih ketat.

Dengan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa parameter proses yang diterapkan yakni tekanan 650 MPa, waktu tahan 30 detik, dan kondisi lingkungan stabil berada dalam rentang optimum untuk menghasilkan *green compact* berkualitas tinggi. Spesimen hasil kompaksi ini memiliki kekompakan, kestabilan dimensi, dan homogenitas yang baik sehingga dapat langsung digunakan dalam tahap sintering tanpa perlakuan tambahan. Secara makroskopik, hasil ini menunjukkan bahwa mekanisme deformasi plastis dan *interlocking* antar-partikel Cu dan Fe telah terjadi secara efektif, membentuk struktur padat yang siap mengalami difusi metalurgi pada tahap pemanasan selanjutnya.

3.4 Tahap Sintering

Tahap sintering merupakan bagian krusial dalam proses metalurgi serbuk yang bertujuan membentuk ikatan metalurgi permanen antar-partikel melalui mekanisme difusi padat. Proses ini dilakukan pada suhu 950 °C selama tiga jam untuk menghindari oksidasi permukaan tembaga. Pada tahap ini, partikel logam yang sebelumnya hanya saling menekan secara mekanik akibat proses kompaksi mulai berfusi dan berikatan melalui pertumbuhan leher difusi (*neck growth*). Fenomena ini menyebabkan meningkatnya densitas material serta penurunan porositas internal yang signifikan [17].

Hasil proses sintering yang ditunjukkan pada Gambar 2 memperlihatkan spesimen *triangle pad* dengan perubahan warna dari keperangan mengilap menjadi abu-abu gelap. Perubahan warna ini menandakan terbentuknya lapisan oksida tipis di permukaan akibat interaksi minor antara Cu dan residu oksigen yang masih tersisa di ruang tungku. Menurut Singh et al. (2020), terbentuknya lapisan oksida mikro ini lazim terjadi pada sistem Cu-Fe dan tidak selalu bersifat merugikan karena dapat memperkuat batas butir (*grain boundary strengthening*). Selain itu, lapisan ini menunjukkan bahwa proses rekristalisasi parsial telah terjadi, menandakan aktivitas difusi atom yang efektif selama pemanasan.

Permukaan hasil sintering tampak lebih padat dan menyatu dibandingkan dengan hasil kompaksi, menandakan keberhasilan proses densifikasi melalui penyusutan volume akibat penguapan pori mikro. [17] menjelaskan bahwa peningkatan suhu hingga 950 °C mampu mempercepat mekanisme *volume diffusion* dan *grain boundary diffusion* pada *Cu-Fe composite*, menghasilkan peningkatan kekompakan hingga 95 % dari densitas teoritis. Sementara itu, penelitian [16] menunjukkan bahwa densifikasi yang optimum dicapai pada kombinasi tekanan kompaksi tinggi dan waktu tahan tiga jam, di mana keseimbangan antara pertumbuhan butir dan penurunan porositas dapat tercapai tanpa menimbulkan *grain coarsening* berlebih.

Hasil observasi visual juga menunjukkan bahwa tidak terdapat deformasi, retak, atau cacat makroskopik pada spesimen. Hal ini menandakan bahwa laju pemanasan dan pendinginan dikontrol dengan baik sehingga tegangan termal (*thermal stress*) dapat diminimalkan. Menurut [18], kestabilan geometris spesimen setelah sintering merupakan indikator utama keberhasilan pengendalian gradien temperatur, yang sangat berpengaruh terhadap homogenitas mikrostruktur.

Selain perubahan warna, tampak pula tekstur permukaan yang sedikit kasar dan tidak homogen akibat keberadaan pelumas padat grafit dan MoS₂. Beberapa area tampak membentuk lapisan kehitaman tipis yang berasal dari residu pelumas tersebut. Lapisan ini justru bermanfaat karena membentuk *tribo-film* alami yang meningkatkan ketahanan aus dan kestabilan gesek pada saat pengujian tribologi. Fenomena serupa juga dilaporkan oleh [19], di mana penambahan grafit 5–10 % pada *Cu-Fe composite* membantu menghasilkan permukaan dengan koefisien gesek stabil serta mencegah *adhesive wear* berlebihan.



Gambar 7. Brake pad hasil sintering

Secara keseluruhan, sintering pada suhu 950 °C selama tiga jam menghasilkan peningkatan densitas, pengurangan porositas, dan pembentukan ikatan metalurgi kuat antar-partikel Cu, Fe, dan FeCr. Spesimen menunjukkan kestabilan geometris yang tinggi tanpa cacat struktural makroskopik, menandakan parameter proses telah berada pada kondisi optimum. Hasil ini sejalan dengan laporan penelitian oleh [17] dan [16] yang menegaskan bahwa suhu 900–950 °C dengan waktu tahan moderat menghasilkan *Cu-based composites* berstruktur halus, padat, dan homogen. Dengan demikian, spesimen yang dihasilkan telah siap untuk tahap penyempurnaan permukaan (*finishing*) dan pengujian sifat mekanik serta tribologinya.

Dengan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa parameter proses yang diterapkan yakni tekanan 650 MPa, waktu tahan 30 detik, dan kondisi lingkungan stabil berada dalam rentang optimum untuk menghasilkan *green compact* berkualitas tinggi. Spesimen hasil kompaksi ini memiliki kekompakan, kestabilan dimensi, dan homogenitas yang baik sehingga dapat langsung digunakan dalam tahap sintering tanpa perlakuan tambahan. Secara makroskopik, hasil ini menunjukkan bahwa mekanisme deformasi plastis dan *interlocking* antar-partikel Cu dan Fe telah terjadi secara efektif, membentuk struktur padat yang siap mengalami difusi metalurgi pada tahap pemanasan selanjutnya.

3.5 Tahap Finishing

Tahap *finishing* merupakan langkah akhir dalam proses pembuatan *brake pad* berbasis tembaga melalui metode metalurgi serbuk. Tahapan ini bertujuan untuk memperoleh permukaan yang rata, dimensi yang presisi, dan kekasaran

yang seragam sehingga spesimen siap digunakan untuk pengujian sifat mekanik dan tribologi. Proses *finishing* dilakukan menggunakan grinding machine dengan media amplas silikon karbida bertingkat (P400, P800, hingga P5000), kemudian dilanjutkan dengan *polishing* menggunakan pasta alumina berukuran partikel 1 μm . Kombinasi tahap tersebut menghasilkan permukaan halus dengan tingkat kekasaran di bawah 1,5 μm , sesuai dengan standar kekasaran permukaan komponen *friction material* [20][17].



Gambar 8. Brake pad hasil finishing

Hasil proses *finishing* dapat dilihat pada Gambar 3, di mana spesimen menunjukkan permukaan yang lebih mengkilap, halus, dan seragam dibandingkan hasil setelah sintering. Pola garis halus melingkar pada permukaan merupakan jejak *lapping* dari proses *grinding* yang menandakan bahwa material telah mengalami penghalusan mekanis secara merata. Tidak ditemukan retak permukaan, deformasi plastis berlebih, maupun pengelupasan lapisan oksida, yang menunjukkan bahwa proses *finishing* berjalan stabil tanpa menimbulkan tegangan mekanik baru pada struktur spesimen.

Secara visual, spesimen memiliki tampilan homogen dengan warna kecokelatan metalik khas tembaga padat. Warna ini menunjukkan bahwa lapisan oksida hasil sintering telah terkelupas sebagian akibat abrasi halus dari proses *grinding*. Menurut [19], penghilangan lapisan oksida penting dilakukan karena dapat mempengaruhi konduktivitas termal dan kestabilan gesekan saat pengujian *friction test*. Selain itu, hasil permukaan yang rata juga berkontribusi terhadap distribusi tekanan kontak yang merata antara pad dan piringan rem selama proses pengereman [18].

Pada pengamatan makroskopik, tidak terdapat cacat seperti *pitting* atau *void* pada permukaan, menandakan bahwa struktur dalam hasil sintering sebelumnya sudah cukup padat dan tidak mengalami kerusakan selama penghalusan. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian [16] dan [17], yang menyebutkan bahwa spesimen berbasis Cu-Fe yang memiliki densitas tinggi pasca-sintering akan lebih mudah dipoles hingga mencapai permukaan stabil tanpa cacat mikro. Dengan demikian, tahap finishing ini berhasil menghasilkan permukaan dengan karakteristik optimal untuk tahapan uji lanjut, baik mekanik maupun tribologis.

Secara keseluruhan, hasil *finishing* menunjukkan keberhasilan proses metalurgi serbuk secara menyeluruh, di mana spesimen *brake pad* berbasis tembaga yang dihasilkan memiliki kekompakan tinggi, permukaan halus, serta kestabilan dimensi yang baik. Permukaan akhir yang rata dan bebas cacat menjadi indikator keberhasilan seluruh rangkaian proses sebelumnya (pencampuran, kompaksi, dan sintering) dalam menghasilkan material berkualitas tinggi untuk aplikasi sistem pengereman berkecepatan tinggi.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menghasilkan *brake pad* berbasis tembaga (Cu) melalui metode metalurgi serbuk (*powder metallurgy*) dengan tahapan sistematis yang meliputi persiapan material, pencampuran, kompaksi, sintering, dan penyempurnaan permukaan (*finishing*). Setiap tahap proses berperan penting dalam menentukan kualitas akhir material yang dihasilkan, baik dari segi struktur, densitas, maupun karakteristik permukaannya.

Tahap pencampuran (*mixing*) menggunakan V-blender selama delapan jam dengan kecepatan 60 rpm terbukti efektif dalam menghasilkan homogenitas campuran serbuk Cu-Fe-C-MoS₂-SiO₂. Homogenitas ini berpengaruh langsung terhadap keseragaman difusi atom saat sintering.

Tahap kompaksi (*compaction*) dengan tekanan 650 MPa selama 30 detik menghasilkan green compact yang kuat dan seragam, tanpa retak atau deformasi, menunjukkan bahwa tekanan tersebut berada pada rentang optimum untuk menghasilkan densitas awal tinggi (sekitar 80–85% dari densitas teoritis).

Proses sintering pada suhu 950 °C selama tiga jam dalam atmosfer nitrogen menghasilkan peningkatan densitas, penurunan porositas, serta pembentukan ikatan metalurgi yang kuat antar-partikel logam. Hasil sintering memperlihatkan stabilitas geometris tinggi, tidak terdapat retak permukaan, dan terbentuk struktur homogen. Proses ini juga memunculkan tribo-film alami dari partikel grafit dan MoS₂ yang berpotensi meningkatkan ketahanan aus dan kestabilan gesekan pada aplikasi pengereman.

Tahap finishing melalui *grinding* dan *polishing* bertingkat menghasilkan permukaan spesimen yang halus, rata, dan bebas cacat, dengan kekasaran di bawah 1,5 μm . Permukaan akhir yang homogen menunjukkan keberhasilan proses densifikasi sebelumnya, sekaligus memastikan spesimen siap untuk tahap uji mekanik dan tribologi lanjutan.

Secara keseluruhan, kombinasi parameter proses-waktu pencampuran 8 jam, tekanan kompaksi 650 MPa, suhu sintering 950 °C, dan waktu tahan 3 jam - terbukti optimal untuk menghasilkan *brake pad* berbasis tembaga dengan struktur padat, permukaan halus, dan potensi performa gesek yang baik. Penelitian ini menunjukkan bahwa metode metalurgi serbuk mampu menghasilkan material *brake pad* yang memenuhi karakteristik fungsional untuk aplikasi sistem pengereman berkecepatan tinggi serta dapat menjadi dasar pengembangan produk lokal berteknologi tinggi.

Ucapan Terima Kasih

Kami menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih kepada LPDP/Kedaireka yang telah memberikan dukungan terhadap penelitian ini hingga selesai.

Daftar Pustaka

- [1] L. Zhang, J. Li, X. Wang, and Q. Zhao, "Friction and wear behavior of Cu-based brake pads for high-speed trains," *Wear*, vol. 456–457, p. 203418, 2020, doi: 10.1016/j.wear.2020.203418.
- [2] S. Ding and X. Zuo, "Design optimization of braking systems for high-speed railways," *Railw. Eng. Rev.*, vol. 41, no. 3, pp. 115–129, 2022.
- [3] C. Menapace, G. Straffelini, S. Gialanella, and R. Ciudin, "Thermal degradation of phenolic resins in friction materials," *Compos. Part B Eng.*, vol. 176, p. 107218, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107218.
- [4] H. Wu, D. Zhang, Y. Li, and C. Tang, "High-temperature friction stability of Cu-graphite composites for railway braking," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 24, pp. 384–397, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.03.012.
- [5] H. Chen, Y. Liu, and Z. Wang, "Thermal and structural stability of copper-based composites under cyclic braking loads," *Mater. Sci. Forum*, vol. 1105, pp. 231–240, 2023, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1105.231.
- [6] C. Bellini, M. Rossi, and S. Gialanella, "Oxidation behavior and wear resistance of copper matrix composites reinforced with FeCr particles," *Tribol. Int.*, vol. 182, p. 108292, 2023, doi: 10.1016/j.triboint.2023.108292.
- [7] R. M. German, *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing*. Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, 2014.
- [8] Y. Ma, H. Li, and X. Chen, "Sintering mechanisms and tribological characteristics of Cu-MMC composites for friction materials," *Mater. Today Proc.*, vol. 30, no. 5, pp. 1458–1465, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.476.
- [9] Z. Liu, P. Han, and X. Sun, "Microstructural control in powder metallurgy composites: A review," *J. Alloys Compd.*, vol. 901, p. 163720, 2022, doi: 10.1016/j.jallcom.2021.163720.
- [10] J. Lan, L. Gao, and Y. Zhao, "Effect of MoS₂ addition on friction and wear performance of Cu-Fe composites," *Wear*, vol. 476, p. 203739, 2021, doi: 10.1016/j.wear.2021.203739.
- [11] C. H. Ortega-Jiménez, A. Torres, and R. Romero, "Systematic Review of Powder Metallurgy: Current Overview of Manufactured Materials and Challenges for Future Research," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 14, pp. 1901–1918, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.05.087.
- [12] O. O. Edosa, F. K. Tekweme, and K. Gupta, "A review on the influence of process parameters on powder metallurgy parts," *Eng. Appl. Sci. Res.*, vol. 49, no. 1, pp. 68–79, 2022, doi: 10.52716/easr.2022.49.1.68.
- [13] C. Bellini, M. Martínez, and F. Rossi, "Oxidation behavior and wear resistance of Cu-FeCr composites fabricated by powder metallurgy," *Tribol. Int.*, vol. 182, p. 108292, 2023, doi: 10.1016/j.triboint.2023.108292.
- [14] H. Wu, S. Zhang, and X. Li, "High-temperature friction stability of Cu-graphite composites for railway braking applications," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 24, pp. 384–397, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.05.033.
- [15] S. Rao, A. Singh, and D. Patel, "Influence of compaction pressure on densification and microstructure in Cu-Fe composites," *J. Alloys Compd.*, vol. 853, p. 157081, 2021, doi: 10.1016/j.jallcom.2020.157081.
- [16] B. Denkena, A. Krödel, and M. Wilms, "Influence of the Powder Metallurgy Route on the Mechanical Properties of Cu-Cr-Diamond Composites," *SN Appl. Sci.*, vol. 4, no. 5, p. 1204, 2022, doi: 10.1007/s42452-022-05048-2.
- [17] Y. Zhou, Y. Zhang, X. Zhang, J. Liu, and M. Wang, "Effect of Sintering Temperature on the Microstructure and Mechanical and Tribological Properties of Copper Matrix Composite for Brake Pads," *Metals (Basel)*, vol. 14, no. 9, p. 1048, Sep. 2024, doi: 10.3390/met14091048.
- [18] J. Li, X. Wang, and P. Liu, "Thermal behavior and frictional characteristics of Cu-based sintered friction materials under cyclic braking loads," *Tribol. Int.*, vol. 160, p. 107078, 2021, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107078.
- [19] R. Kumar, R. Singh, and S. Das, "Role of Graphite and MoS₂ in Enhancing Frictional Stability of Cu-Fe Composites Prepared by Powder Metallurgy," *J. Alloys Compd.*, vol. 957, p. 170732, 2023, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.170732.
- [20] V. Natarajan, J. Prakash, and P. Gopalakrishnan, "Surface finishing and its impact on tribological response of metallic composites," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 30, pp. 6421–6432, 2021, doi: 10.1007/s11665-021-05892-3.