

ANALISA STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK PADA COPPER-IRON MELALUI PROSES MECHANICAL MILLING DAN CONTINUOUS SINTERING

Asep Suhandi^{1,a}, Lydia Anggraini²

¹Program Sarjana Teknik Mesin, Universitas Presiden, Jawa Barat, Indonesia

²Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Presiden, Jawa Barat, Indonesia

^aasep_suhandi@yahoo.co.id, ^blydia.anggra@president.ac.id

Abstrak. *Mechanical Alloying (MA) / Mechanical Milling (MM)* adalah proses pengolahan serbuk logam padatan meliputi penyatuan dan penghancuran ulang partikel serbuk dengan menggunakan *high-energy ball mill*. Perbedaan nya tergantung pada apakah transfer material terlibat atau tidak selama pemrosesan. Penelitian dilakukan dengan menganalisa pengaruh proses mechanical milling dengan membandingkan struktur mikro dan sifat mekanik pada *copper-iron* antara yang sebelum *milling* (sampel 1) dan setelah di *milling* selama 2 jam (sampel 2). Sampel di buat menjadi *green compact* proses *cold pressing* dengan sistem penekanan menggunakan mekanisme mekanik dan teknik penekanan ganda. Proses *sintering* menggunakan mesin tipe kontinu dengan konveyor sabuk mesh dan tipe *furnace* adalah *muffle*. Setelah itu didinginkan dengan proses *natural water jacket*. Pengujian kekerasan *vicker* dan pengujian kekuatan (*tensile strength test*) dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik paduan *copper-iron* yang terjadi. Nilai rata-rata kekerasan sampel 1 (sebelum *milling*) adalah 39,8 HV. Nilai rata-rata kekerasan sampel 2 (setelah *milling*) adalah 74,9 HV. Nilai *yield strength* (σ) sampel 1 adalah 17,597MPa, dan nilai *ductility* (ϵ) adalah 0,119. Nilai *yield strength* (σ) sampel 2 adalah 18,547MPa, dan nilai *ductility* (ϵ) adalah 0,073. Pengamatan struktur mikro dilakukan bertujuan untuk mengetahui fisiologis permukaan paduan yang terbentuk dan mengetahui persebaran komposisi yang terjadi. Pengamatan struktur mikro sampel 1 menunjukkan terbentuknya fasa solid ϵ (warna silver) merupakan area unsur *iron* yang terbentuk dengan ukuran besar. Fasa solid γ (warna orange) merupakan area unsur *copper* yang terbentuk dengan ukuran besar. Unsur-unsur yang terlihat adalah *copper* (Cu) dan *iron* (Fe) yang memiliki persentase besar terbentuk dengan ukuran besar ($>50 \mu\text{m}$), dan pori yang terjadi juga berukuran besar ($>50 \mu\text{m}$). Untuk unsur karbon (C), terlihat berwarna abu-abu, dengan jumlah sedikit. Untuk unsur lain, seperti seng (Zn), fosfor (P), dan Tin (Sn), umumnya, unsur-unsur tersebut berada di batas butir unsur *iron* (Fe) dan *copper* (Cu). Pengamatan struktur mikro sampel 2 menunjukkan terbentuknya fasa solid ϵ (warna silver) menunjukkan area unsur *iron* yang terbentuk dengan ukuran yang lebih kecil. Fasa solid γ (warna putih) menunjukkan area unsur *copper* yang terbentuk dengan ukuran yang lebih kecil. Unsur-unsur yang terlihat adalah *copper* (Cu) dan *iron* (Fe) dengan ukuran kecil ($<50 \mu\text{m}$), dan pori yang terjadi berukuran kecil. Dari hasil pengujian dan analisa menunjukkan bahwa dengan mengecilkan ukuran serbuk logam dengan di *milling* selama 2 jam dapat meningkatkan kekerasan dan *yield strength* produk. Walaupun produk mejadi lebih getas yang di tunjukkan oleh nilai *ductility* menurun.

Kata kunci. *mechanical milling, copper-iron, struktur mikro, sifat mekanik*

Abstract. *Mechanical Alloying (MA) / Mechanical Milling (MM)* is a process of processing of solid metal powders including the union and re-destruction of powder particles by using *high-energy ball mill*. The difference depends on whether material transfer is involved or not during processing. The study was conducted by analyzing the effect of the mechanical milling process by comparing the microstructure and mechanical properties of the *copper-iron* between the ones before milling (sample 1) and after milling for 2 hours (sample 2). The sample was made into a *green compact cold pressing* process with an emphasis system using mechanical mechanisms and dual emphasis

techniques. Sintering process using continuous type machine with conveyor belt mesh and furnace type is muffle. After that cooled with natural water jacket process. Vicker hardness testing and strength testing (tensile strength test) is performed to determine the mechanical properties of copper-iron alloys that occur. The mean value of sample 1 hardness (before milling) was 39.8 HV. The mean value of sample hardness 2 (after milling) was 74.9 HV. The value of the yield strength (σ) of sample 1 is 17.597MPa, and the value of ductility (ϵ) is 0.119. The value of the yield strength (σ) of sample 2 is 18.547MPa, and the value of ductility (ϵ) is 0.073. The observation of micro structure was done to know the physiological surface of the alloy formed and to know the distribution of the composition. Observation of sample microstructure 1 shows solid phase formation ϵ (silver color) is an area of iron element formed with large size. Solid phase γ (orange color) is an area of copper element formed with large size. The visible elements are copper (Cu) and iron (Fe) which have a large percentage formed with large size ($> 50 \mu\text{m}$), and the pore is also large ($> 50 \mu\text{m}$). For carbon element (C), it looks gray, with a small amount. For other elements, such as zinc (Zn), phosphorus (P), and Tin (Sn), generally, they are at the grain boundary of iron (Fe) and copper (Cu) elements. Observation of sample microstructure 2 shows solid phase formation ϵ (silver color) showing iron area area formed with smaller size. The solid phase γ (white color) shows the copper element area formed with a smaller size. The elements seen are copper (Cu) and iron (Fe) with a small size ($<50 \mu\text{m}$), and small pores occur. From the test results and analysis showed that by shrinking the size of metal powder by milling for 2 hours can increase the hardness and yield strength of the product. Although the product becomes more brittle which is indicated by the decreased ductility value.

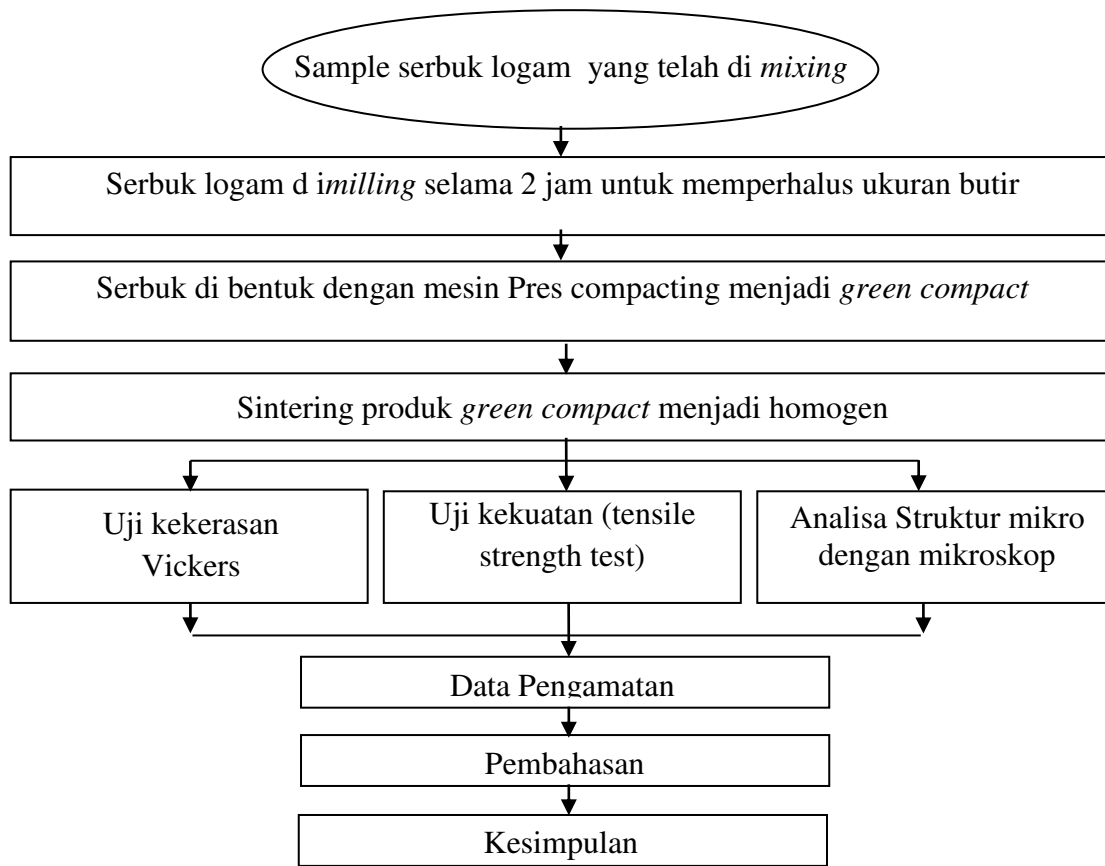
Keywords. mechanical milling, copper-iron, microstructure, mechanical properties

I. PENDAHULUAN

Industri otomotif merupakan industri utama di Indonesia. Salah satu industri pendukungnya adalah industri komponen otomotif. Proses manufaktur komponen berusaha membuat produk dengan massa lebih ringan, performa yang baik, durability dan realibility yang baik. Salah satu bagian yang digunakan di kendaraan roda empat adalah komponen electric starter. Salah satu komponen yang ada di electric starter adalah bearing starter. Proses pembuatan electric starter menggunakan bahan baku serbuk logam (powder metallurgy).

Perkembangan teknologi powder metallurgy bertujuan untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi dari produk yang dibuat. Salah satu perkembangan terkini adalah dengan mengecilkan ukuran butir serbuk logam. Beberapa proses mengecilkan ukuran serbuk logam antara lain dengan mechanical milling yang bertujuan untuk membentuk serbuk logam dengan ukuran yang lebih kecil, sehingga dapat diperoleh kualitas yang lebih baik saat manufaktur dengan menggunakan teknologi powder metallurgy. Salah satu proses mechanical milling adalah high energy ball milling yang menggunakan bola-bola baja untuk menumbuk serbuk logam. Serbuk logam copper-iron yang telah di milling, digunakan sebagai bahan penelitian. Penelitian dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat mekanik yang terjadi pada produk dengan ukuran serbuk logam yang lebih kecil. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai referensi untuk meningkatkan kualitas produk dengan bahan baku serbuk logam copper-iron.

II. METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 2.1 Diagram Alir Proses

Sampel serbuk logam *copper-iron* telah dalam bentuk campuran (*mixing*) 100 gram. Serbuk logam dipisahkan menjadi 2 bagian (@50 gram). Satu bagian di *milling* dan satu bagian samadengan kondisi awal. Serbuk logam *copper-iron* di *milling* dengan metoda *ball milling*. Parameter *milling* yang digunakan ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 2.1 parameter *milling* serbuk logam *copper-iron*

Type <i>milling</i>	LIPI High Energy Milling E3D (HEM-E3D)
Lama waktu <i>milling</i>	2 jam
Kecepatan <i>milling</i>	700 ~ 1400 rpm
Media <i>grinding</i>	Stainless steel ball
Diameter bola	5 mm
BPR	5 : 1
Volume di kontainer	50 ml

Pembuatan sampel *green compact* menggunakan mesin *compacting Yoshizuka SP-20 High Speed Compacting Press* dengan jenis *cold pressing* karena dilakukan di suhu ruangan. Untuk penggerak dan distribusi gaya, mesin *compacting* yang digunakan menggunakan mekanisme mekanik (*mechanical press*), yaitu memanfaatkan *cam* sebagai distribusi penggerak utama. Teknik penekanan produk menggunakan teknik penekanan ganda (*double acting pressing*). Peralatan *die compacting* adalah peralatan yang di pasang di *die set*, antara lain *die*, *upper punch*, *lower punch*, dan *core rod*.

Sampel green compact di sintering dengan mesin *sintering TSFE7-6W Mesh belt sintering furnace*. Tipe *sintering* adalah kontinu dengan konveyor sabuk mesh. Lebar sabuk mesh adalah 7 inch (178 mm). Pengaturan dan parameter sintering dapat dilihat tabel berikut :

Tabel 2.2 pengaturan dan parameter sintering

Tipe mesin	konveyor sabuk <i>mesh</i>
Temperatur zona <i>burn-off</i>	650 °C
Temperatur zona suhu tinggi	850 °C
Panjang zona <i>burn-off</i>	768 mm
Panjang zona suhu tinggi	2364 mm
Panjang zona pendingin	2500 mm
Kecepatan konveyor <i>mesh</i>	65 mm/min
Kecepatan pemanasan	69 °C/menit
Lama waktu <i>sintering</i>	± 36 min
Kecepatan pendinginan	21 °C/menit
Atmosfer	N ₂ ; H ₂
Tipe <i>furnace</i>	<i>muffle</i>
Tipe pendingin	<i>natural water jacket</i>

Uji kekerasan ini dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik dari paduan menggunakan alat uji kekerasan Vickers Mitutoyo tipe AVK-CO berindentor intan dengan beban 5 kilogram dan *hold time* selama 5 detik. Pengujian dilakukan berulang kali untuk mencari nilai hasil uji kekerasan yang dianggap mewakili nilai kekerasan dari paduan.

Uji kekuatan ini dilakukan menggunakan alat uji *Universal testing Gotech tipe AI-70005 servo control* dengan beban 5 kN dan *software* pengolah data *U60 Gotech*. Pengujian dilakukan satu kali karena sampel akan patah dalam satu kali pengujian.

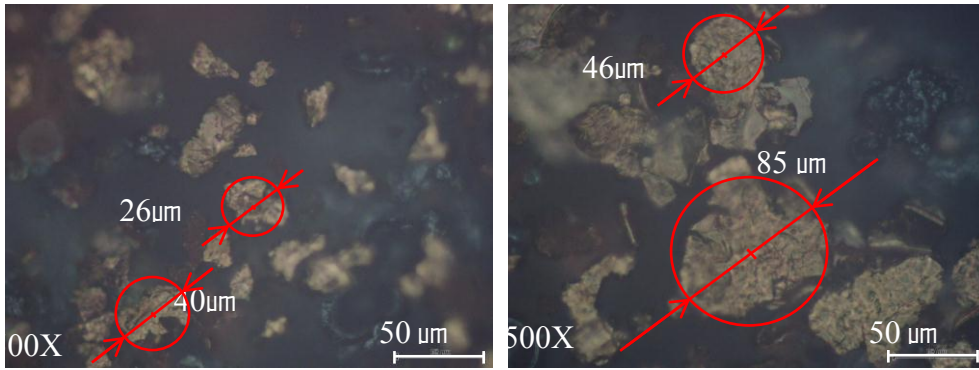
Studi metalografi produk sinter sangat penting untuk mempelajari jenis dan morfologi struktur mikro sampel. Sehingga dapat di ketahui pengaruh proses produksi sampel terhadap sifat material sampel. Pengujian mikrostruktur material di mulai dari persiapan sampel, mounting sampel, proses grinding & polishing, etching dengan bahan kimia (FeCl₃), kemudian di analisa dengan menggunakan mikroskop kamera digital Olympus tipe DP21 dengan perbesaran 500x.

III. HASIL, PEMBAHASAN DAN ANALISA

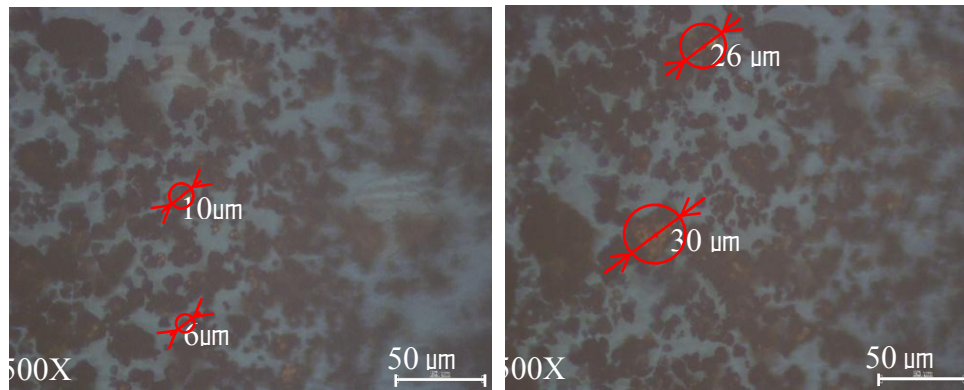
Material serbuk logam yang digunakan sebagai bahan baku adalah campuran serbuk logam dengan komposisi ditunjukkan tabel berikut :

Table 3.1 komposisi serbuk logam

Unsur	Komposisi
Besi (Fe)	47.54%
Tembaga (Cu)	46.9%
Seng (Zn)	2.0%
Fosfor (P)	0.37%
Tin (Sn)	2.1%
Karbon (C)	0.49%
<i>Lube</i>	0.6%



Gambar 3.1 Ukuran serbuk logam sebelum di *milling*



Gambar 3.2 Ukuran serbuk logam setelah di *milling*

Serbuk yang digunakan memiliki ukuran butir bervariasi. Ukuran dan bentuk serbuk logam di analisa menggunakan mikroskop. Gambar 3.1 menunjukkan variasi serbuk logam *copper-iron* sebelum di *milling*. Ukuran serbuk logam antara 26 μm sampai dengan 85 μm. Bentuk serbuk tidak beraturan dan permukaan serbuk tidak rata. Gambar 3.2 menunjukkan ukuran serbuk logam *copper-iron* setelah di *milling* menjadi lebih kecil. Ukuran serbuk logam antara 6 μm sampai dengan 30 μm. Bentuk serbuk lebih teratur dan bulat dan permukaan serbuk lebih merata.

Serbuk logam dibentuk menggunakan mesin pres *compacting* menjadi produk *green compact*. Parameter mesin yang digunakan adalah sama antara sampel 1 dan sampel 2, sehingga dimensi sampel 1 dan sampel 2 adalah sama. Produk yang telah dibuat, di ukur *density*nya. Menghitung *density* produk, menggunakan prinsip *archimides*. Nilai *green density* di tunjukan tabel 3.2.

$$Density = \frac{A}{B - C} \times \rho$$

Dimana,

A = massa produk di udara.

B = massa produk di udara (setelah pori-pori dipermukaan part ditutup, produk di rendam di dalam oli kemudian di *vacuum*).

C = massa produk di air (setelah di *vacuum* dengan oli).

'ρ = massa jens air (1 g/cm³)

Table 3.2 *Green density* sampel 1 (sebelum *milling*) dan sampel 2 (setelah *milling*)

No.	Massa (gram)			Density (g/cm ³)
	A	B	C	
1	1,952	2,013	1,695	6,138
2	1,913	1,982	1,673	6,191

Sampel produk yang telah di *sintering*, di ukur *density*nya untuk memeriksa perubahan *density* yang terjadi. Dari hasil pengukuran, diperoleh nilai *sinter density* ditunjukan tabel berikut.

Table 3.2 *Sinter density* sampel 1 (sebelum *milling*) dan sampel 2 (setelah *milling*)

No.	Massa (gram)			Density (g/cm ³)
	A	B	C	
1	1,935	1,995	1,681	6,162
2	1,890	1,952	1,649	6,238

Proses *sintering* menyebabkan penurunan volume sampel produk karena adanya penyusutan pori (*shrinkage*). Nilai *shrinkage* dihitung dengan membandingkan dimensi sampel setelah *sintering* terhadap sampel sebelum *sintering* (*green compact*). Persentase *shrinkage* dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Shrinkage = \frac{A-B}{B} \times 100\%$$

Dimana :

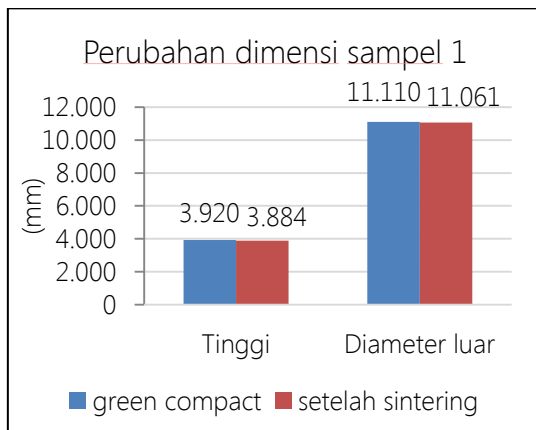
A = Dimensi sebelum *sintering*

B = Dimensi setelah *sintering*

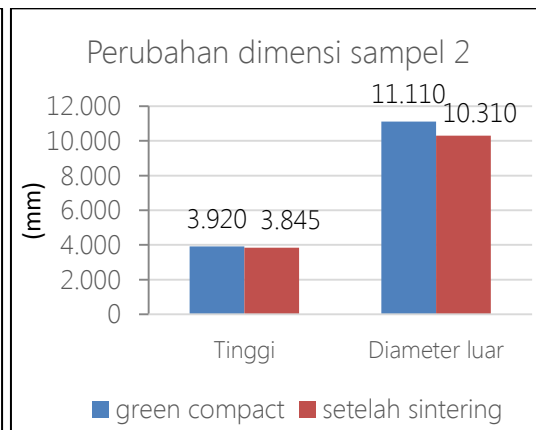
Perubahan dimensi untuk sampel 1 ditunjukkan gambar 3.3 dan gambar 3.4 menunjukkan perubahan dimensi untuk sampel 2.

$$Shrinkage \text{ tinggi sampel 1} = \frac{3,920-3,884}{3,920} \times 100\% = 0,91\%$$

$$Shrinkage \text{ diameter luar sampel 1} = \frac{11,110-11,061}{11,110} \times 100\% = 0,44\%$$



Gambar 3.3 Perubahan dimensi sampel 1 (sebelum *milling*)



Gambar 3.4 Perubahan dimensi sampel 2 (setelah *milling*)

$$Shrinkage \text{ tinggi sampel 2} = \frac{3,920-3,845}{3,920} \times 100\% = 1,91\%$$

$$Shrinkage \text{ diameter luar sampel 2} = \frac{11,110-10,310}{11,110} \times 100\% = 7,2\%$$

Identifikasi komposisi kimia pada paduan dilakukan untuk mengetahui persentase unsur yang terdapat pada paduan setelah di *sintering*. Tabel 4.6 menunjukkan jumlah komposisi kimia, dimana ada sedikit perubahan dibandingkan dengan komposisi kimia serbuk logam sebelum di *sintering*. ini karena sejumlah *lubricant* terbakar dan menguap selama proses *sintering*.

Table 3.3 komposisi paduan

Unsur	Komposisi
Besi (Fe)	48.31%
Tembaga (Cu)	46.77%
Seng (Zn)	1.99%
Fosfor (P)	0.43%
Tin (Sn)	2.01%
Karbon (C)	0.49%

Uji kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan dari paduan. Pengujian dilakukan sebanyak sepuluh kali untuk mencari nilai hasil uji kekerasan yang dianggap mewakili nilai kekerasan dari paduan. Data hasil pengujian di peroleh lebar diagonal hasil penjejakan. Rata-rata lebar diagonal digunakan untuk menghitung nilai kekerasan *vickers* dengan menggunakan rumus [6]:

$$HV = \frac{2F \sin(\frac{\theta}{2})}{D^2}$$

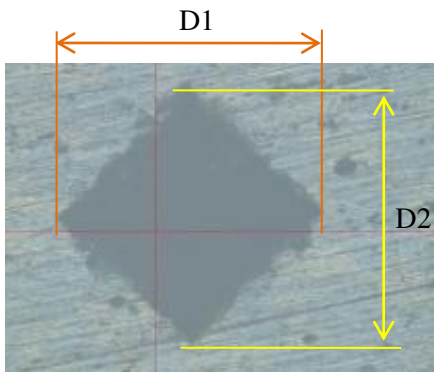
$$HV = \frac{1,854F}{D^2}$$

Dimana :

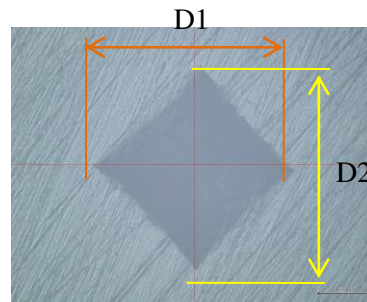
F = Beban yang diberikan (kg)

D = Diagonal rata-rata hasil penekanan indenter

' θ ' = Sudut permukaan indenter intan (136°)

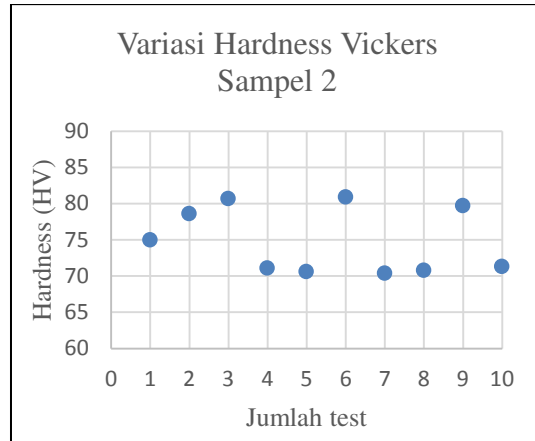
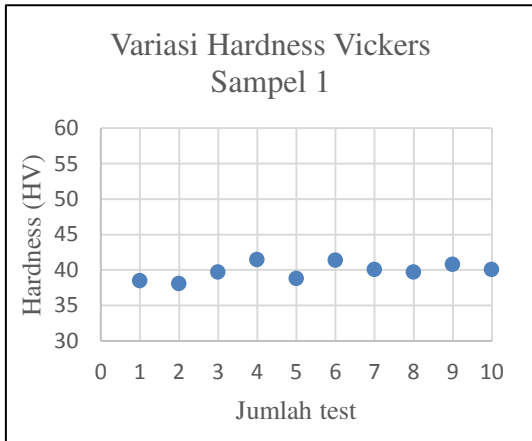


Gambar 3.5 Foto mikro sampel 1 (sebelum *milling*) uji kekerasan *Vickers*



Gambar 3.6 Foto mikro sampel 2 (sebelum *milling*) uji kekerasan *Vickers*

Pengujian kekerasan dilakukan sebanyak 10 kali pengambilan data. Dengan tujuan untuk mendapatkan nilai yang mewakili nilai kekerasan dari paduan.



Gambar 3.7 menunjukkan nilai kekerasan sampel 1. Nilai terendah adalah 38,1 HV dan nilai kekerasan tertinggi adalah 41,5 HV. Rata-rata nilai kekerasan sampel 1 adalah 39,8 HV. Gambar 3.8 menunjukkan nilai kekerasan sampel 2. Nilai terendah adalah 70,6 HV dan nilai kekerasan tertinggi adalah 80,9 HV. Rata-rata nilai kekerasan sampel 1 adalah 74,9 HV. Dari data hasil pengujian hardness vickers diatas menunjukkan nilai kekerasan sampel 2 lebih tinggi dari pada sampel 1. Menunjukkan produk dengan bahan baku serbuk logam yang lebih kecil ukuran butirnya memiliki nilai kekerasan *vickers* yang lebih besar.

Uji kekuatan dilakukan satu kali karena karena sampel akan patah dalam satu kali pengujian. Pengujian dilakukan dengan cara sampel ditekan menggunakan mesin uji kekuatan sampai tercapai nilai *yield strength* dari sampel. Data hasil pengujian adalah nilai beban yang di berikan dan nilai panjangnya penekanan (ΔL). Dari data hasil pengujian dihitung nilai *Strength* (σ) dan *ductility* (ϵ) menggunakan rumus :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Dimana :

' σ = *Strength* (N/mm²)

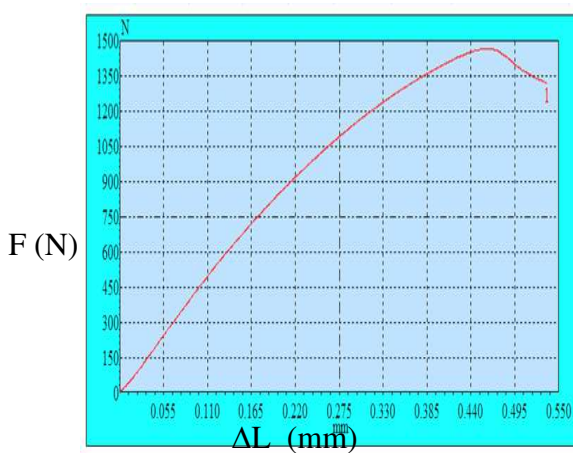
' ϵ = *Ductility*

F = Beban penekanan (N)

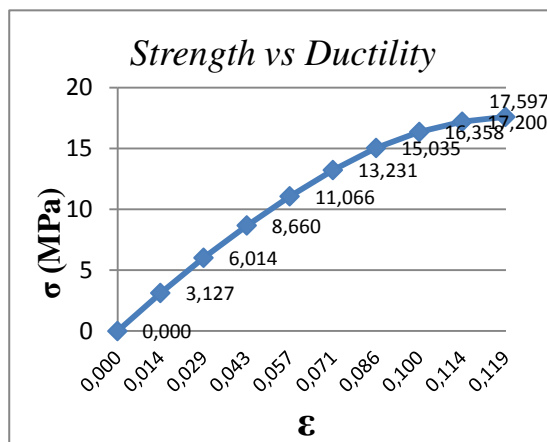
A = Luas area (mm²)

ΔL = Panjang penekanan (mm)

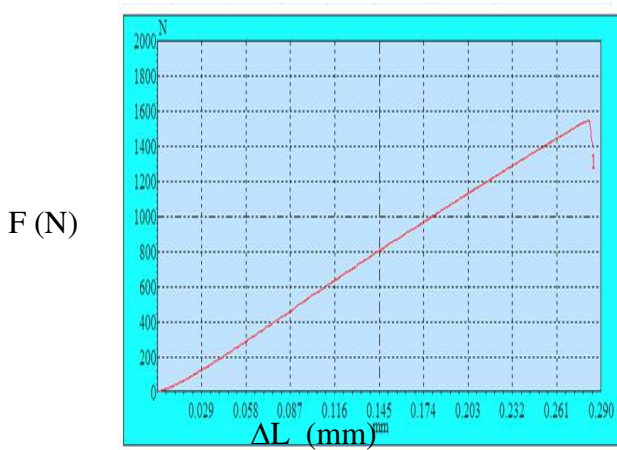
L = Panjang sampel (mm)



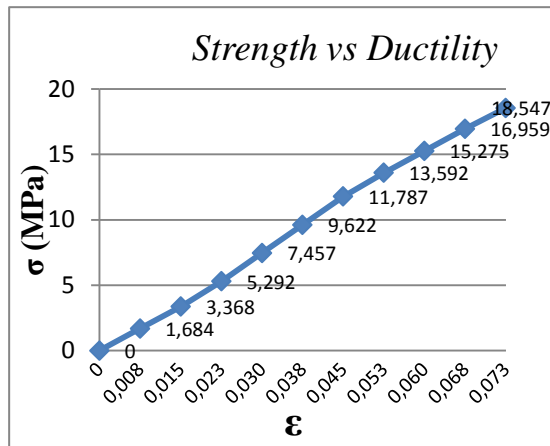
Gambar 3.9 Grafik variasi nilai kekerasan *Vickers* sampel 1



Gambar 3.10 Grafik variasi nilai kekerasan *Vickers* sampel 1



Gambar 3.11 Grafik variasi nilai kekerasan *Vickers* sampel 1

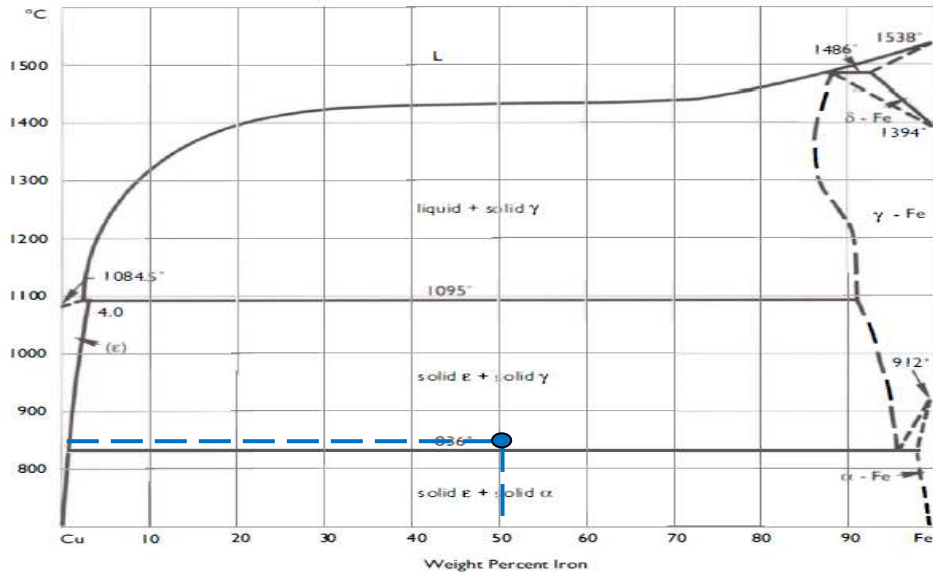


Gambar 3.12 Grafik variasi nilai kekerasan *Vickers* sampel 1

Dari data diatas dapat disimpulkan nilai kekuatan sampel 2 lebih tinggi daripada sampel 1. Nilai kekuatan maksimum sampel 1 adalah 17,597 Mpa, sedangkan Nilai kekuatan maksimum sampel 2 adalah 18,547 Mpa. Akan tetapi, nilai *ductility* sampel 2 lebih kecil dari pada sampel 1. Ini menunjukkan sampel 2 lebih getas dari pada sampel 1.

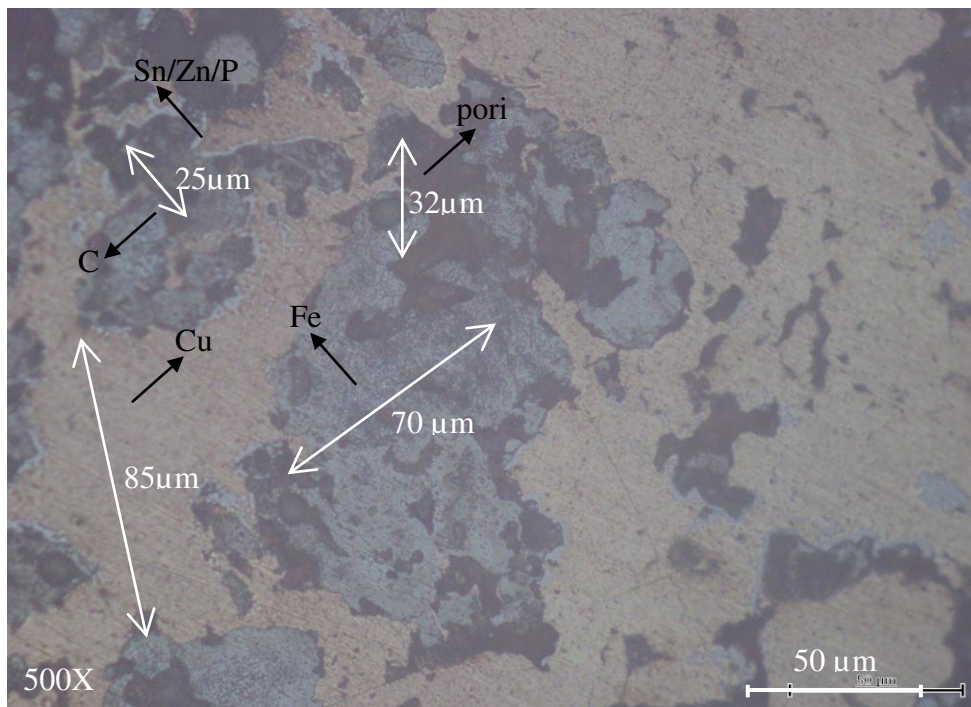
Pengamatan struktur mikro dilakukan bertujuan untuk mengetahui fisiologis permukaan paduan yang terbentuk dan mengetahui persebaran komposisi yang terjadi. Sampel 1 dan sampel 2 yang akan di uji terlebih dahulu di *mounting* untuk memudahkan dalam melakukan proses pengamatan struktur mikro. Kemudian di *grinding* permukaannya menggunakan material abrasif ampelas hingga grid 1500. Setelah itu di *polishing* dengan bahan *polish* dan pasta alumina untuk mendapatkan permukaan yang halus dan tidak ada goresan. Permukaan sampel di etsa menggunakan 25 gr $FeCl_3$, 25mL HCl, dan 100 mL aquades [7]. Permukaan paduan diperbesar 500x untuk dianalisa.

Copper-iron yang di *sintering*, umumnya menunjukkan unsur-unsur yang tidak terlarut. Dengan persentase *copper* dan *iron* yang besar, maka fasa *copper* dan fasa *iron* akan terpisah [10]. Gambar 3.13 menunjukkan diagram fasa *Cu-Fe alloy*. Secara teoritis, berdasarkan diagram fasa, proses *sintering* sampel 1 dan sampel 2 pada temperatur 850 °C, *iron* akan terjadi fasa solid ϵ dan *copper* akan terjadi fasa solid γ . Pada gambar 3.14 struktur mikro permukaan sampel 1 (sebelum *milling*) proses *sintering* 850 °C, fasa solid ϵ ditunjukkan oleh area warna silver, menunjukkan area unsur *iron* yang terbentuk dengan ukuran besar. Fasa solid γ ditunjukkan oleh area warna orange (kuning ke merah), menunjukkan area unsur *copper* yang terbentuk dengan ukuran besar. Gambar 3.15 struktur mikro permukaan sampel 2 (setelah *milling*) proses *sintering* 850 °C, fasa solid ϵ ditunjukkan oleh area warna silver menunjukkan area unsur *iron* yang terbentuk dengan ukuran yang lebih kecil. Fasa solid γ ditunjukkan oleh warna putih menunjukkan area unsur *copper* yang terbentuk dengan ukuran yang lebih kecil.

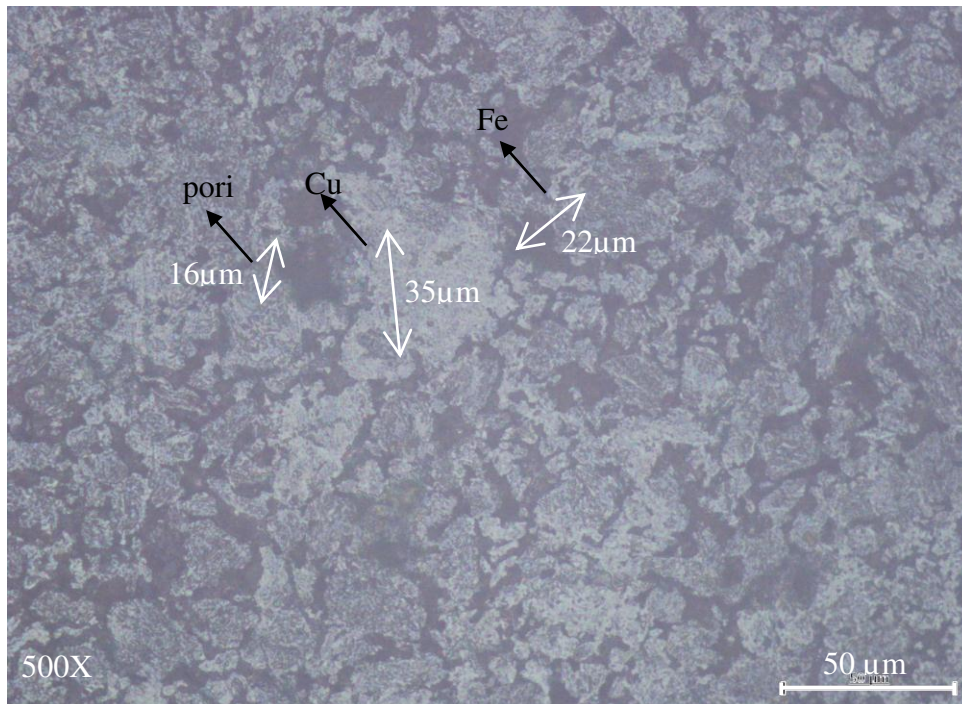


Gambar 3.13 Diagram fasa Cu-Fe Alloy [8]

Gambar 3.14 menunjukkan struktur mikro sampel 1 (sebelum *milling*) setelah proses *sintering* 850 °C. Unsur-unsur yang terlihat adalah *copper* (Cu) dan *iron* (Fe) yang memiliki persentase besar (lihat tabel 3.3) terbentuk dengan ukuran besar (>50 μm), dan pori yang terjadi juga berukuran besar (>50 μm). Untuk unsur karbon (C), terlihat berwarna abu-abu, dengan jumlah sedikit. Untuk unsur lain, seperti seng (Zn), fosfor (P), dan Tin (Sn), umumnya, unsur-unsur tersebut berada di batas butir unsur iron (Fe) dan copper (Cu) [10].



Gambar 3.14 Struktur mikro permukaan sampel 1 (sebelum *milling*) proses *Sintering* 850 °C



Gambar 3.15 Struktur mikro permukaan sampel 2 (setelah *milling*) proses *Sintering* 850 °C

Gambar 3.15 menunjukkan struktur mikro permukaan sampel 2 (setelah *milling*) proses *sintering* 850 °C. Unsur-unsur yang terlihat adalah *copper* (Cu) dan *iron* (Fe) yang terbentuk dengan ukuran kecil (<50 μm), dan pori yang terjadi berukuran kecil.

IV. KESIMPULAN

Setelah dilakukan penelitian, pengujian dan analisa perbedaan sifat mekanik dan struktur mikro produk dengan bahan baku serbuk logam iron-copper dengan perbedaan ukuran butirnya, maka dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Ukuran butir serbuk logam diperkecil dengan cara di *milling*, dari ukuran 26 μm sampai dengan 85 μm menjadi 6 μm sampai dengan 30 μm.
2. Nilai kekerasan produk meningkat dari rata-rata 39,8HV menjadi 74,9 HV.
3. Nilai *yield strength* (σ) meningkat dari 17,597MPa menjadi 18,547MPa.
4. Nilai *ductility* (ϵ) menurun dari 0,119 menjadi 0,073, sehingga lebih getas.
5. Kelebihan produk dengan menggunakan bahan baku material serbuk logam yang telah di *milling* (ukuran butir lebih kecil) adalah meningkatnya nilai kekerasan dan nilai kekuatan sehingga performa produk akan menjadi lebih baik.

Dengan proses *milling* pada bahan baku serbuk logam akan menambah biaya proses produksi di industri manufaktur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Groover, Mikell P. 2010. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4th ed.* USA : John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Upadhyaya, G. S. 2002. *Powder Metallurgy Technology.* England : Cambridge International Science Publishing.
- [3] Suryanarayana, C. 2007. *Mechanical alloying and milling.* USA : Progress in Materials Science.
- [4] Los Alamos National Laboratory's Chemistry Division. 2001. *A Periodic Table of the Elements.* USA : Los Alamos National Laboratory.

- [5] Höganäs. 2013. *Production of Sintered Components*. Sweden : Höganäs AB.
- [6] ASTM. *ASTM E3-01 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. USA : ASTM.
- [7] ASTM. *ASTM E 407-99 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. USA : ASTM
- [8] Scott, David A. 1991. *Metallography and microstructure of ancient and historic metals*. Singapore : The J. Paul Getty Trust.
- [9] ASM International. 1998. *Metals Handbook Desk Edition, Second Edition*. ASM International Handbook Committee.
- [10] ASM International. 2004. *ASM Handbook Volume 9 Metallography and Microstructures*. ASM International Handbook Committee.
- [11] ASM International. 2000. *ASM Handbook Volume 8 Mechanical Testing and Evaluation*. ASM International Handbook Committee.
- [12] ASM International. 1998. *ASM Handbook Volume 7 Powder Metal Technologies and Applications*. ASM International Handbook Committee.
- [13] Davenport, W.G., M. King, M. Schlesinger, A.K. Biswas. 2002. *Extractive Metallurgy of Copper, fourth edition*. UK : Pergamon.
- [14] Ramakrishnan, P. 2013. *Automotive applications of powder metallurgy*. India : Woodhead Publishing Limited.
- [15] Ugarteche, Caroline Velasques. 2015. *Journal Effect of Microstructure on the Thermal Properties of Sintered Iron-copper Composites*. Brazil : Material research.
- [16] Morakotjinda, Monnapas. 2008. *Journal Sintered Fe-Cu-C materials*. Thailand : Journal science.