

Pengaruh Variasi Temperatur Sintering dan Waktu Tahan Sintering Terhadap Densitas dan Kekerasan pada Mmc W-Cu Melalui Proses Metalurgi Serbuk

Mohammad Safrudin Yafiedan Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: wiwid@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—Proyektil adalah bagian dari peluru yang dioptimalkan agar peluru memiliki jangkauan dan daya tembus yang tinggi. Untuk itu material yang biasa digunakan adalah material yang memiliki densitas yang tinggi seperti timbal. Namun, timbal memiliki tingkat kontaminasi yang tinggi. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dibuat komposit W-Cu (Tungsten-Copper) sebagai material alternatif untuk core proyektil.

Pembuatan dilakukan dengan proses metalurgi serbuk dengan komposisi fraksi berat 70% W dan 30% Cu serta tekanan kompaksi 400 MPa. Sedangkan temperatur sintering dan waktu tahan sintering dilakukan dengan beberapa variasi yaitu 700, 800, 900°C dan 1,2,3 jam, secara berturut-turut. Untuk mengidentifikasi digunakan beberapa pengujian seperti uji densitas, uji kekerasan, SEM, XRD dan uji tekan. Berdasarkan hasil pengujian, fasa yang terbentuk dari hasil XRD adalah W dan Cu, sinter density tertinggi sebesar 12.78 g/cm³ dan porositas terkecil sebesar 10.82% pada 900°C-2 jam, kekerasan tertinggi sebesar 34.7 HRB pada 900°C-2 jam, kekuatan tekan tertinggi sebesar 156.71 MPa pada 800°C-3 jam, modulus elastisitas tertinggi sebesar 50.23 GPa pada 800°C-3 jam.

Kata Kunci—core proyektil, komposit W-Cu, metalurgi serbuk

I. PENDAHULUAN

Proyektil adalah bagian peluru yang akan menjangkau dan mengenai target. Proyektil dioptimalkan untuk memiliki momentum dan daya jangkau yang tinggi. Dalam banyak kasus peluru akan menembus target ketika tidak bertumbukan dengan sesuatu yang keras seperti tulang [1]. Selain dalam segi material, proses manufaktur juga mempengaruhi karakteristik produk yang dihasilkan. Saat ini, umumnya proyektil diproduksi dengan proses *casting*. Namun, proses *casting* memiliki beberapa kelemahan seperti segregasi, *machining*, dan toleransi produk akhir yang hal itu bisa dihindari dengan proses metalurgi serbuk. [2].

Berdasarkan material penyusunnya, proyektil terbagi menjadi *non-jacketed bullets* dan *jacketed bullets* dan terbagi menjadi *round nosed lead* dan *full-metal jacketed* berdasarkan bentuk hidungnya [1]. Proyektil tanpa jaket atau yang biasa disebut *lead bullet* terbuat dari timbal seluruhnya, sedangkan proyektil yang berjaket memiliki lapisan di bagian terluar. Lapisan ini biasanya terbuat dari tembaga dan berguna untuk meningkatkan kekerasan dari peluru dan mencegah terjadinya

kerusakan pada peluru saat mesiu diledakkan [3]. Umumnya proyektil terbuat dari timbal karena densitasnya yang tinggi. Akan tetapi, timbal termasuk kedalam golongan logam berat yang memiliki racun yang tinggi. Timbal adalah material yang dapat merusak sistem syaraf jika terakumulasi di dalam tubuh manusia untuk waktu yang lama [4]. Selain material timbal ada material lain yang memiliki sifat yang dapat menggantikan timbal serta memiliki tingkat racun yang lebih rendah dibandingkan timbal, seperti: *copper*, *tungsten*, *tin*, *bismuth*, *nickel*, dll. Namun biasanya material-material ini memiliki harga yang lebih mahal [5].

Komposit didefinisikan sebagai material baru yang merupakan campuran dari dua material atau lebih yang memiliki sifat dan struktur yang berbeda yang dicampur secara fisik sehingga memiliki ikatan mekanik dan memiliki struktur yang homogen secara makroskopik dan heterogen secara mikroskopik [6]. Sifat suatu komposit adalah perpaduan dari sifat material-material penyusunnya. Dengan mengetahui sifat material penyusunnya maka sifat dari komposit dapat dihitung dengan *Rule of Mixture*.

$$\rho_c = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f \quad (1)$$

Dimana:

ρ_c	= densitas komposit
ρ_m	= densitas matriks
ρ_f	= densitas reinforced
V_m	= fraksi volume matriks
V_f	= fraksi volume reinforced

Dengan persamaan (1) dapat diketahui sifat dari komposit dengan memasukkan besaran yang ingin diketahui. Sedangkan untuk perhitungan porositas pada komposit dapat diketahui dari densitas teoritik dan densitas pascasintering pada komposit tersebut. Perhitungannya dapat menggunakan persamaan (2)

$$\Phi = 1 - (\rho_s / \rho_t) \quad (2)$$

Dimana:

Φ	= porositas (%)
ρ_s	= densitas sinter (g/cm ³)
ρ_t	= densitas teoritik (g/cm ³)

Selain rumus di atas, Nematzadeh, 2012 [7] dalam penelitiannya menyatakan hubungan antara modulus elastisitas dan *compressive strength* yang dinyatakan dengan persamaan (3). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dijelaskan

bahwa dengan persamaan (3) hasil yang diperoleh akan lebih mendekati hasil eksperimen.

$$E = 22000 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (3)$$

Dengan:

$$\begin{aligned} E &= \text{modulus elastisitas (GPa)} \\ f_{cm} &= \text{Compressive strength (MPa)} \end{aligned}$$

Salah satu material komposit adalah W-Cu. Komposit W-Cu memiliki sifat mekanik, termal dan elektrik yang sangat baik. Material ini adalah salah satu material yang sangat menjanjikan dalam aplikasi militer seperti energi kinetik peluru, amunisi dan *armor penetrator* [10].

Metalurgi serbuk adalah salah satu proses manufaktur barang komersil dari bahan logam dengan bahan berbentuk serbuk. Prinsip dari proses ini adalah dengan memadatkan bahan yang telah berbentuk serbuk dengan cara menekan (*compaction*) kemudian dipanaskan dibawah titik lelehnya yang disebut proses *sintering*. Sehingga serbuk-serbuk logam akan memadu karena adanya mekanisme transformasi massa akibat difusi dari atom-atom di permukaan serbuk. Dengan adanya difusi ini maka akan terbentuk ikatan-ikatan partikel yang halus antar permukaan serbuk yang dapat meningkatkan kekuatan dan sifat fisisnya [8]. Adapun proses metalurgi meliputi beberapa tahapan seperti, *mixing*, kompaksi dan *sintering*.

Proses kompaksi adalah salah satu tahapan didalam proses metalurgi serbuk yang dilakukan guna memadatkan serbuk dan membuat ikatan secara mekanik antar serbuk dengan memberikan tekanan dari luar terhadap serbuk yang telah dimasukkan ke dalam suatu cetakan yang memiliki bentuk sesuai dengan yang diinginkan, serbuk yang telah dikompaksi akan membentuk suatu komponen sesuai dengan bentuk dari cetakan itu sendiri. Proses kompaksi ini digunakan untuk mendapatkan densitas yang tinggi [9]. Proses selanjutnya adalah *Sintering* yaitu proses yang digunakan untuk membentuk ikatan antar partikel/serbuk setelah proses kompaksi. Proses ini dilakukan dengan memberikan panas/memanaskan sampel pada temperatur di bawah *melting point*-nya hingga terjadi transfer massa pada permukaan serbuk sehingga terbentuk ikatan bersama antar serbuk [9].

II. METODE PENELITIAN

A. Persiapan Bahan

Pengayakan serbuk Tembaga (Cu) untuk mereduksi perbedaan ukuran antara tungsten dan tembaga menggunakan alat *sieving*. Serbuk tungsten (W) yang digunakan berukuran rata-rata 3 μ m dan serbuk Cu berukuran rata-rata 12 μ m. serbuk yang telah diayak akan ditimbang sesuai perhitungan yaitu tungsten 21.6076 gram (70%wt) dan tembaga 9.2604 gram (30%wt).

B. Proses Percobaan

Pencampuran serbuk W dan Cu dilakukan dengan menggunakan alat *magnetic stirrer* selama 30 menit dengan metode *wet mixing* karena perbedaan densitas yang tinggi dari kedua bahan. Sebelum dilakukan proses kompaksi cetakan diberi *lubricant* (zinc stearat) agar sampel mudah dikeluarkan.

Proses kompaksi dilakukan dengan tekanan sebesar 400 MPa. Pengukuran densitas setelah kompaksi (*green density*) dilakukan dengan menimbang dan mengukur volume sampel menggunakan jangka sorong. Proses selanjutnya adalah *sintering*. Proses ini dilakukan dengan temperatur dan waktu tahan yang bervariasi yaitu 700, 800, 900°C dan 1,2,3 jam, secara berturut-turut. Proses *sintering* dilakukan dalam atmosfer argon guna menghindari oksidasi pada sampel. Pengukuran densitas setelah *sintering* (*sinter density*) menggunakan prinsip archimedes.

C. Preparasi Sampel Pengujian

Preparasi sampel dilakukan sebelum pengujian SEM dan XRD. Masing-masing pengujian menggunakan sembilan sampel (seluruh variasi). Pada pengujian XRD sampel harus memiliki tinggi dibawah 5mm sehingga diperlukan pemotongan sampel. Sedangkan pengujian SEM harus halus agar interaksi antar partikel tampak jelas sehingga dilakukan *grinding*.

D. Pengujian Sampel

Pengujian yang dilakukan meliputi densitas, SEM, XRD, kekerasan dan tekan. Pengujian densitas menggunakan prinsip Archimedes, pengujian SEM menggunakan alat SEM, pengujian XRD menggunakan alat XRD, pengujian kekerasan menggunakan alat kekerasan universal dengan metode *Hardness Rockwell tipe B* (HRb) dengan beban 100kg dan pengujian tekan menggunakan alat UTM (*Universal Testing Machine*) dengan ukuran sampel 1:1 untuk tinggi dan diameternya.

III. HASIL DAN DISKUSI

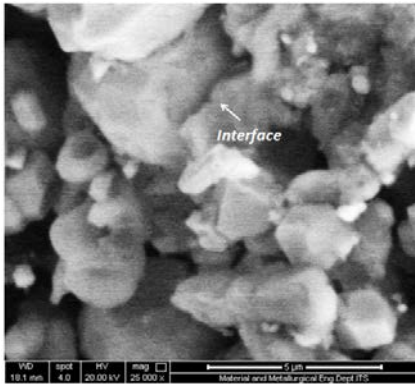
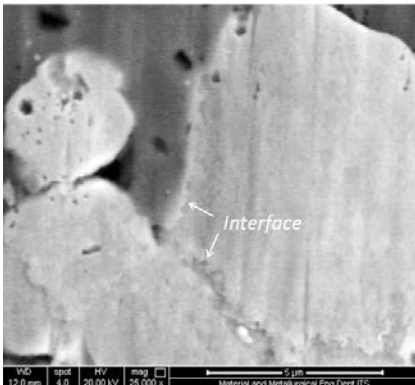
A. Proses Pembuatan Komposisi W-Cu dengan Proses Metalurgi Serbuk

Proses metalurgi serbuk diawali dengan proses *sieving* untuk menghomogenkan ukuran serbuk. Awalnya serbuk tembaga berukuran 70 μ m dan tungsten 3 μ m, setelah *sieving* ukuran tembaga menjadi 12 μ m. Serbuk ditimbang dan dicampur menggunakan metode *wet mixing* karena perbedaan densitas bahanyang tinggi. Sampel dikompaksi dengan tekanan yang tetap yaitu 400 MPa. Pengukuran densitas dilakukan setelah kompaksi dan *sintering*. Proses *sintering* dilakukan dengan temperatur dan waktu tahan yang bervariasi untuk mengetahui pengaruhnya.

B. Pengaruh Variasi Temperatur Sintering dan Waktu Tahan Sintering Terhadap Densitas dan Porositas Komposit W-Cu

Densitas dan porositas adalah dua sifat material yang saling mempengaruhi, dimana bila porositas suatu material tinggi maka densitas material tersebut akan lebih rendah dibandingkan bila material tersebut memiliki porositas yang lebih rendah, begitu juga sebaliknya.

Dengan dilakukannya proses kompaksi akan didapatkan bentuk kesatuan yang padat dari serbuk tungsten dan tembaga dengan bentuk *pellet*. Meski secara visual hasil kompaksi ini tampak padat dan menyatu. Namun, sebenarnya penyatuan

Gambar 1. Pengamatan *Interface* PascakompaksiGambar 2. Pengamatan *Interface* Pascasintering Pada T=900°C-3 jam

antar serbuk ini hanya secara mekanik saja sehingga sifatnya pun sangat rapuh. Interaksi antar permukaan serbuk hasil proses kompaksi dapat dilihat pada Gambar 1. Pada Gambar 1 tersebut juga terlihat perbedaan antar serbuk tungsten dan tembaga dimana serbuk tungsten (matriks) ditunjukkan oleh gambar yang berwarna lebih terang dan serbuk tembaga (*filler*) ditunjukkan oleh gambar yang berwarna lebih gelap.

Pellet hasil proses kompaksi akan dilakukan proses selanjutnya yakni proses sintering. Proses sintering merupakan proses pemanasan pada temperatur tertentu dengan waktu tahan tertentu dengan tujuan memperkuat ikatan antar permukaan serbuk yang telah dikompaksi karena adanya difusi atom di daerah *interface* serbuk. Besarnya laju difusi atom ini dipengaruhi oleh besarnya energi bebas yang dimiliki oleh suatu material [11].

Seperti halnya pada proses kompaksi, proses sintering juga menghasilkan material dengan densitas yang baru yang disebut dengan *sinter density*. Pengukuran *sinter density* ini dilakukan dengan menggunakan prinsip Archimedes yang melibatkan massa kering dan massa basah dari sampel.

Dari Tabel 1 terlihat adanya kenaikan nilai *sinter density* yang selaras dengan kenaikan temperatur dan waktu tahan sintering. Dimana nilai *sinter density* tertinggi terjadi pada temperatur sintering 900°C dengan waktu tahan 2 jam yaitu 12.78 g/cm³. Hal ini disebabkan semakin tinggi temperatur yang diberikan kepada suatu material maka semakin tinggi pula energi yang dimiliki oleh material tersebut. Namun pada temperatur 900°C-3 jam terjadi penurunan densitas, dimana

Tabel 1.
Hubungan Temperatur dan Waktu Tahan Sintering Terhadap *Sinter Density* (g/cm³)

Waktu Tahan (jam)	Temperatur Sintering (°C)		
	700	800	900
1	10.12	10.816	11.65
2	11.26	12.45	12.78
3	11.91	12.70	12.29

densitas dari 900°C-3 jam lebih rendah dari densitas 900°C-2 jam. Penurunan ini bisa dikarenakan adanya kandungan zinc stearat yang berlebih sehingga ketika dipanaskan akan terbentuk poros dari daerah-daerah yang ditinggalkan oleh zinc stearat yang menguap. Fenomena tersebut juga serupa dengan yang terjadi pada penelitian Li et al, 2006 [12] yaitu sebagian besar Cu *sweats* atau menyebar keluar dari sampel, sehingga menghasilkan poros yang besar dan menurunkan densitasnya.

Poros merupakan daerah kosong atau rongga yang terbentuk pada proses kompaksi yang menyebabkan adanya gas yang terjebak antara serbuk saat proses sintering. Adanya poros didalam suatu material akan mempengaruhi sifat mekaniknya, hal ini dikarenakan poros akan menyebabkan adanya konsentrasi tegangan sehingga mudah berdeformasi plastis dan lokalisasi tegangan [16]. Pengaruh temperatur sintering dan waktu tahan sintering terhadap porositas dapat dilihat pada gambar 3 secara visual melalui pengamatan SEM.

Dari Gambar 3 dapat dilihat adanya perubahan jumlah porositas disetiap variasi temperatur dan waktu tahan yang diberikan. Dari gambar tersebut terlihat bahwa pada peningkatan temperatur sintering (vertikal) terjadi penurunan jumlah poros atau porositas. Hal itu juga terjadi pada peningkatan waktu tahan (horisontal) yang menunjukkan penurunan jumlah poros atau porositas. Selain dari Gambar 3, dapat pula dilihat pengaruh temperatur sintering dan waktu tahan sintering terhadap porositas pada Tabel 2 secara kuantitatif. Adapun perhitungan nilai porositas dilakukan dengan menggunakan persamaan (2).

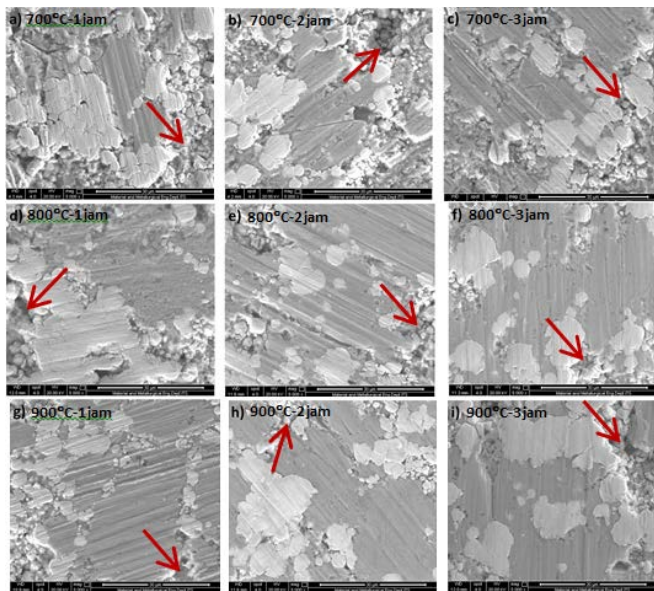
Pada Tabel 2 terlihat bahwa porositas tertinggi dihasilkan pada sampel dengan proses sintering menggunakan variasi temperatur sintering 700°C dan waktu tahan sintering 1 jam yaitu sebesar 29.38%. Hal ini menunjukkan adanya keterbalikan antara porositas dan densitas, dimana sampel yang memiliki nilai densitas terendah akan memiliki nilai porositas tertinggi.

Fasa yang terbentuk dalam komposit W-Cu adalah fasa W dan Cu. Hal ini dapat dilihat pada hasil analisa XRD pada Gambar 3.

Hasil ini juga menunjukkan bahwa proses sintering berjalan sesuai harapan yakni hanya memperkuat ikatan antar serbuk pascakompaksi dan tidak menghasilkan fasa baru, hal ini ditunjukkan dengan adanya fasa sebelum dan sesudah sintering tetap sama yaitu fasa W dan fasa Cu. Adanya fasa baru berupa *intermetallic* didalam komposit yang bersifat getas akan mengurangi sifat mekanik komposit [15].

C. Pengaruh Variasi Temperatur Sintering dan waktu Tahan Sintering Terhadap Sifat Mekanik Komposit W-Cu

Pada penelitian ini akan dibuat komposit W-Cu dengan tungsten sebagai matriks dan tembaga sebagai *filler*.

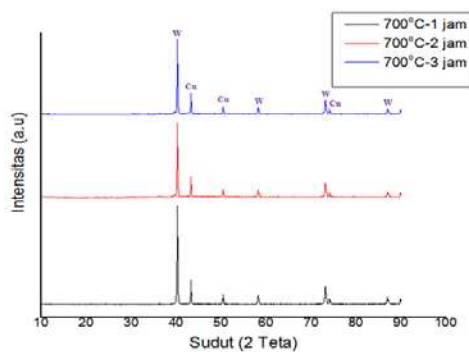


Gambar 3. Pengamata Porositas Komposit W-Cu Pada Kenaikan Temperatur (ke Kanan) dan Kenaikan Waktu Tahan (ke Bawah)

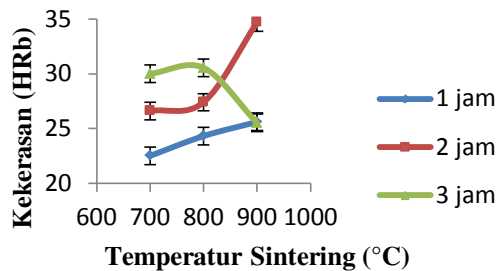
Tabel 2

Pengaruh Temperatur Sintering dan Waktu Tahan Sintering Terhadap Porositas (%)

Waktu Tahan (jam)	Temperatur Sintering (°C)		
	700	800	900
1	29.38	24.52	18.70
2	21.42	13.12	10.82
3	16.89	11.37	14.24

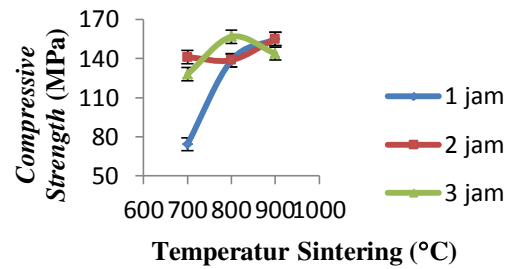


Gambar 4. Grafik XRD pada Temperatur 700°C



Gambar 5. Grafik Pengaruh Temperatur Sintering dan Waktu Tahan Sintering Terhadap Kekerasan (HRb)

Penambahan tembaga pada tungsten akan mempengaruhi nilai kekerasan, *compressive strength* maupun modulus elastisitasnya. Berikut akan ditampilkan hasil uji kekerasan pada komposit W-Cu dengan menggunakan metode Rockwell hardness tipe B (HRb) dengan beban 100kg.



Gambar 6. Grafik Pengaruh Temperatur Sintering dan Waktu Tahan Sintering Terhadap *Compressive Strength* pada Komposit W-Cu (MPa)

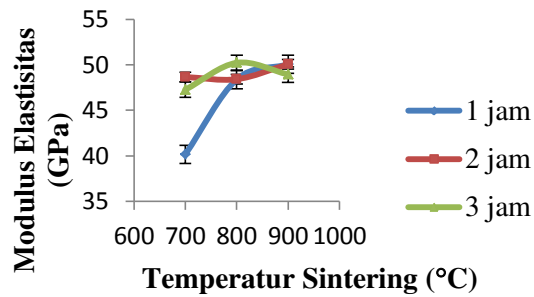
Berdasarkan hasil uji XRD pada Gambar 4 dapat diketahui bahwa ketiga sampel dengan temperatur sinteing 700°C variasi waktu tahan 1,2 ,3 jam memiliki *peak* dengan nilai 2θ yang hampir sama pada sudut $40.2757^\circ-40.3541^\circ$, $58.2569^\circ-58.3346^\circ$, $74.1119-74.1883^\circ$, dan $87.0154^\circ-87.0676^\circ$ yang mendekati nilai 2θ dari kartu PDF 01-089-2767 sebesar 40.2672° , 58.2591° , 73.1953° , dan 87.0103° . Hal ini menunjukkan bahwa sampel mempunyai fasa tungsten (W).sedangkan *peak* lain yang tidak teridentifikasi sebagai fasa W mempunyai nilai yang mendekati nilai 2θ dari kartu PDF 01-074-5761 yang menunjukkan adanya fasa tembaga (Cu) pada sampel.

Dari hasil analisa XRD di atas telah menunjukkan bahwa komposit W-Cu terdiri dari dua fasa yaitu fasa W dan Cu seperti yang ditunjukkan oleh analisa XRD. *Peak-peak* yang ada menunjukkan *peak* dari fasa W dan fasa Cu, dan tidak menunjukkan adanya fasa lain di dalam komposit.

Hal ini tampak dari sampel 900°C-2 jam yang memiliki nilai porositas terkecil tetapi nilai kekerasannya tertinggi yaitu 34.7 HRb. Sifat kekerasan sangat sensitive terhadap poros yang terdapat di dalam sampel [13]

Adapun penurunan nilai kekerasan pada kenaikan temperatur pada waktu tahan 3 jam memiliki kesamaan dengan hasil yang didapat pada penelitian yang dilakukan oleh Ardestani et al, 2009 [14]. Fenomena tersebut dikarenakan adanya daerah-daerah mikro dari fasa Cu sehingga didapat nilai kekerasan yang lebih rendah. Hal tersebut selaras dengan hasil dari penelitian ini, hanya saja daerah yang terbentuk tidak hanya Cu tetapi juga banyaknya poros.

Selain mempengaruhi nilai kekerasan, temperatur sintering dan waktu tahan sintering juga mempengaruhi nilai kekuatan tekan. Adapun nilai kekuatan tekan dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 7. Grafik Pengaruh Temperatur Sintering dan Waktu Tahan Sintering Terhadap Modulus Elastisitas pada Komposit W-Cu (GPa)

Nilai kekuatan tekan tertinggi yang didapatkan dalam penelitian ini adalah sebesar 156.71 MPa, nilai tersebut didapat pada sampel dengan temperatur sintering 800°C dengan waktu tahan 3 jam. Sedangkan nilai terendah diperoleh pada sampel dengan temperatur sintering 700°C dengan waktu tahan 1 jam yaitu sebesar 74.26 MPa.

Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan adanya hubungan sifat mekanik (kekuatan tekan dan modulus elastisitas) dengan densitas, dimana dengan densitas yang tinggi akan didapat sifat mekanik yang tinggi pula. Abbaszadeh et al, 2012 [13] menyatakan dalam penelitiannya bahwa ada hubungan langsung antara densitas relatif dan sifat mekanik, semakin tinggi densitas akan semakin baik kekuatan dan kekerasannya.

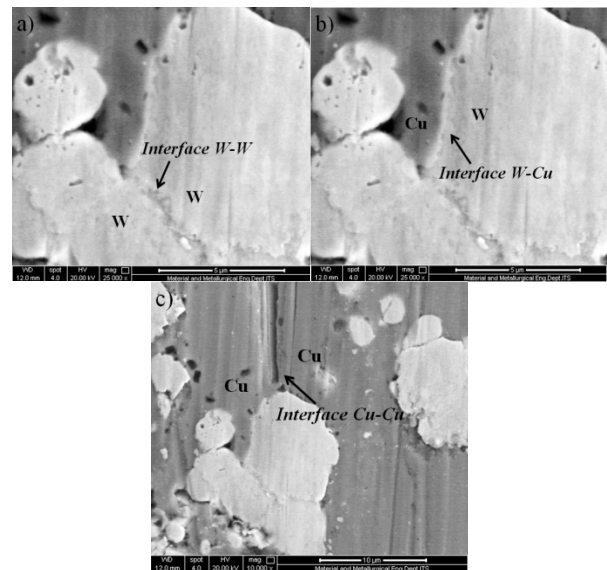
Adapun pengaruh temperatur sintering dan waktu tahan sintering terhadap modulus elastisitas juga sebanding dengan pengaruh terhadap kekuatan tekan. Nilai Modulus elastisitas tertinggi diperoleh pada sampel dengan temperatur sintering 800°C dan waktu tahan 3 jam yaitu sebesar 50.23 GPa.

D. Analisa Interface Komposit W-Cu

Interface merupakan daerah pertemuan antar serbuk didalam komposit, dimana daerah tersebut menunjukkan adanya ikatan antar serbuk. Adanya ikatan antar serbuk merupakan syarat untuk terbentuknya suatu material komposit dalam proses metalurgi serbuk.

Dalam komposit W-Cu terdapat tiga jenis interface. Selain adanya ikatan antara matriks dan penguat yaitu antara serbuk W dan serbuk Cu, juga ada ikatan antar serbuk W dan ikatan antar serbuk Cu. Ikatan-ikatan tersebut dapat dilihat pada Gambar 8 a, b dan c secara berturut-turut.

Didalam suatu material komposit interface berperan sebagai daerah yang mentransmisikan tegangan dari bagian matriks ke bagian penguat sehingga tegangan luar yang diberikan ke material komposit dapat diterima bersama oleh bagian matriks dan penguat. Sebagai media transmisi tegangan, maka semakin baik daerah interface akan semakin baik pula proses transmisi tegangan sehingga kekuatan komposit tersebut semakin baik pula. Dengan pengoptimalan parameter maka mobilitas dari Cu menjadi lebih baik dan difusi antara W dan Cu semakin tinggi, sehingga kombinasi antara W dan Cu menjadi kuat [15].



Gambar 8. Daerah Interface Pascasintering, a) AntarSerbuk W, b) Antara Serbuk W dan Cu, c) antar Serbuk Cu

Tabel 3.

Data Hasil Pengujian Densitas, Kekerasan dan Tekan Pada Komposit W-Cu						
T (°C)	t (jam)	ρ (g/cm ³)	Porositas (%)	Kuat Tekan (MPa)	Hardness (HRb)	ε (GPa)
700	1	10.12	29.38	74.26	22.5	40.15
	2	11.26	21.42	141.12	26.6	48.67
	3	11.91	16.89	128.03	30	47.27
800	1	10.82	24.52	138.5	24.31	48.40
	2	12.45	13.12	138.81	27.4	48.43
	3	12.70	11.37	156.71	30.54	50.23
900	1	11.65	18.70	155.02	25.6	50.06
	2	12.78	10.82	155.03	34.7	50.07
	3	12.29	14.24	143.82	25.5	48.95

IV. KESIMPULAN

Semakin tinggi temperatur sintering atau semakin lama waktu tahan yang diberikan maka akan diperoleh nilai sinter density yang semakin tinggi, porositas yang semakin kecil, kekerasan yang semakin tinggi, kekuatan tekan yang semakin tinggi dan modulus elastisitas yang semakin tinggi. Variasi temperatur dan waktu tahan sintering yang menghasilkan nilai densitas dan kekerasan yang optimal adalah 900°C-2 jam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis M.S.Y. mengucapkan terima kasih kepada DIKTI Kementerian pendidikan Nasional Melalui Hibah Penelitian Prioritas Nasional Masterplan Percepatan dan Perluasan Pembangunan Ekonomi Indonesia 2011-2025 (PENPRINAS MP3EI 2011-2025) tahun 2012 yang telah memberikan dana penelitian pada penulis, dosen pembimbing Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. atas dukungan dan motivasi beserta kedua orang tua tercinta yang telah membuat penulis semangat mengerjakan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Doyle. J. S.(2011). *BulletBasics*. <<http://www.firearmsid.com/bullets/bullet1.htm>>.
- [2] German R.M., *Powder Metallurgy Science*. USA: Metal Powder Industries Federation(1984).
- [3] Carlucci, dan Donald E, *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*. New Jersey (2012).
- [4] BPLHD Jawa Barat. (2009). *Pencemaran Pb (Timbal)*. <http://www.bplhdjabar.go.id/index.php/bidang-pengendalian/subid-pemantauan-pencemaran/168-pencemaran-pbtimbal?%20showall=1>.
- [5] Walter M., "Colour Contrast in Ballistic Gelatine," *Forensic Science International*, 197 (2010). 114-118.
- [6] Sulistijono, *Mekanika Material Komposit*. Surabaya : itspress. (2012).
- [7] Nematzadeh M., "Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Freshly Compressed Concrete," *Contruction and Building Materials*. (2012). 34. 476-485.
- [8] Jones W. D., *Fundamental Principles of Powder Metallurgy*. Edward Aronold. London.(1960).
- [9] German R. M., *Powder Metallurgy Science*. USA: Metal Powder Industries Federation. (1984).
- [10] Ahmadi E, Malekzadeh M, Sadrnezhaad S.K. 2010. W-15wt%Cu Nano-composite Produced by Hydrogen-reduction/Sintering of WO₃-CuO Nano-powder. . *Int. J Refract Met Hard Mater*.28:441-5.
- [11] Emmanuel. S, "Diffusion in Multicomponent System: a free energy approach". *Chemistry Physics*. (2004). 302.21-30.
- [12] Li Shi-Bo, dan Xie Jian-Xin. Processing and microstructure of functionally graded W/Cu composites fabricated by multi-billet extrusion using mechanically alloyed powders. *Comp Sci Tech*. 66 (2006) 2329-2336
- [13] Abbaszadeh H., et al. Investigation on the characteristics of micro- and nano-structured W-15wt%Cu composite prepared by power metallurgy route. *Int. J Refract Met Hard Mater*. 30 (2012)145-151.
- [14] Ardestani M., et al. The effect of sintering temperature on densification of nanoscale dispersed W-20-40%wt Cu composite powders. *Int. J Refract Met Hard Mater*. 27 (2009) 862-867
- [15] Chen Piang, et al. The mechanical properties of W-Cu composite by activated sintering. . *Int. J Refract Met Hard Mater*.36 (2013)220-224
- [16] Bourcier." Deformation and Fracture at Isolated Holes in Plane-Strain Tension". *International Journal Fracture* (1984).289-97.