

Pengaruh Komposisi Cu dan Variasi Tekanan Kompaksi Terhadap Densitas dan Kekerasan pada Komposit W-Cu untuk Proyektil Peluru dengan Proses Metalurgi Serbuk

Gita Novian Hermana dan Widyastuti

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—Dalam penggunaannya peluru memiliki beberapa bagian yaitu proyektil (*bullet*), kelongsong (*bullet base*), mesiu (*propellant*), dan pematik (*rim*). Proyektil menjadi penting karena proyektil adalah bagian yang menuju sasaran untuk menembus atau melumpuhkan. Bagian proyektil pada umumnya terbuat dari material yang berat jenisnya relatif tinggi, sehingga mampu menghasilkan peluru yang memiliki momentum yang besar dan jangkauan yang lebih jauh. Tungsten dipilih sebagai pengganti timbal karena tungsten memiliki densitas lebih besar dari timbal dan juga tidak memiliki sifat racun terhadap manusia. Proses pembuatannya melalui proses metalurgi serbuk dengan komposisi tembaga sebanyak 20, 30, 40 wt% dan tekanan kompaksi sebesar 200, 400, dan 600 MPa. Kemudian dilakukan sintering pada temperatur 900°C selama 1 jam. Hasil terbaik didapatkan pada W-20wt%Cu dengan nilai *green density* dan *sinter density* sebesar 12,09 g/cm³ dan 14,14 g/cm³ serta memiliki kekerasan, *compressive strength*, dan modulus elastisitas sebesar 32 HRB, 220,89 MPa dan 55,68 GPa.

Kata Kunci—Proyektil, metalurgi serbuk, W-Cu

I. PENDAHULUAN

Proyektil merupakan bagian peluru yang menuju sasaran untuk menembus atau melumpuhkan. Proyektil terdiri dari beberapa bagian yaitu ujung (*nose*), jaket, dan inti (*core*). Proyektil dioptimalkan untuk meminimalkan waktu pergerakan, dispersi minimum, energi kinetik maksimum, dan membatasi jangkauan maksimum. Sifat proyektil yang berat didesain untuk meminimalkan gesekan dengan udara. Bagian inti dari proyektil pada umumnya terbuat material yang berat jenisnya relatif lebih tinggi, sehingga mampu menghasilkan peluru yang memiliki momentum yang besar dan jangkauan yang lebih jauh. Proses manufaktur proyektil biasanya menggunakan metode *casting*, *rolling*, maupun *deep drawing*.

Timbal telah menjadi bahan untuk peluru selama berabad-abad dan di pilih untuk aplikasi tersebut karena rapat, mudah dibentuk, dan ketersediaannya luas [1]. Peluru yang mengandung timbal (Pb) menyebabkan masalah bagi lingkungan dan kesehatan. Masalah kesehatan tersebut timbul karena adanya debu dari timbal yang terhirup setelah peluru tersebut ditembakkan. Terhadap lingkungannya, timbal hasil dari proyektil yang telah ditembakkan terakumulasi dalam

tanah dan dapat larut ke dalam permukaan air dan air dalam tanah [2].

Untuk menggantikan posisi timbal sebagai material peluru, sekarang mulai dikembangkan penggunaan tungsten atau dikenal juga dengan istilah “Green Bullet”. Dengan sifat mekanik yang superior dan sifat *thermal* dan listrik yang sangat baik, komposit tungsten-tembaga (W-Cu) adalah salah satu material yang menjanjikan untuk aplikasi militer seperti, amunisi, dan *armor penetrator* [3]. Tungsten (W) mulai digunakan untuk menggantikan posisi timbal (Pb) karena tungsten lebih berat daripada timbal, dengan densitas 0,697 pounds/inch³ (berlawanan dengan timbal yang memiliki berat 0,479 pounds/inch³), serta stabil pada temperatur tinggi. Penggunaan tungsten sebagai peluru menawarkan beberapa keuntungan teoritis, yaitu tungsten tidak bersifat racun pada manusia, jadi debu hasil dari penekanan core peluru tungsten lebih aman dibandingkan core peluru timbal konvensional [4]. Material pengganti timbal (Pb) untuk peluru seperti tungsten (W) memiliki densitas antara 7,7 gr/cc hingga 18 gr/cc, dan akan lebih baik lagi jika densitas antara 8,5-15 gr/cc. Tetapi sebaiknya densitas yang dimiliki mendekati timbal sekitar 10 hingga 13 gr/cc, 10,5-12 gr/cc, dan akan lebih baik jika densitas yang dimiliki adalah sekitar 11,1-11,3 gr/cc [5].

Material komposit merupakan kombinasi makroskopik dari dua atau lebih material yang tidak saling melarutkan satu sama lain [6]. Dalam merancang material komposit, para ilmuwan dan insinyur mengkombinasikan beberapa logam, keramik, dan polimer. Kebanyakan komposit diciptakan untuk meningkatkan kekakuan, ketangguhan, dan kekuatan pada temperatur tinggi [7]. Pemilihan suatu material tentunya akan mengikuti tujuan dari penggunaan material tersebut, sehingga dapat menentukan sifat apa yang akan diperlukan dari material komposit tersebut. Komponen penyusun suatu komposit pada umumnya mempunyai peranan sebagai matriks yaitu bagian dari material komposit yang memberikan bentuk terhadap material komposit tersebut dan mengikat komponen lain yang berfungsi sebagai penguat. Penguat yaitu komponen material komposit yang berfungsi sebagai penguat pada material komposit tersebut [8]. Fraksi volume, fraksi berat, dan modulus elastisitas komposit dapat dinyatakan dengan persamaan di bawah ini [7].

$$Vf = \frac{Vf}{Vc} \quad Vm = \frac{Vm}{Vc} \quad (1)$$

$$\rho f = \frac{mf}{mc}; \quad \rho m = \frac{Vm}{Vm} \quad (2)$$

Dengan,

$$Vf = \frac{mf}{\rho f \cdot Vc}; \quad Vm = \frac{mm}{\rho m \cdot Vm} \quad (3)$$

$$m_f = V_f \cdot \rho_f \cdot V_c; \quad m_m = V_m \cdot \rho_m \cdot V_c \quad (4)$$

di mana:

V_m = Fraksi volume matrik

V_f = Fraksi volume penguat

V_c = Fraksi volume komposit

m_f = Massa penguat (gr)

m_m = Massa matrik (gr)

m_c = Massa komposit (gr)

Besarnya porositas pada komposit dapat diketahui dari densitas teoritik dan densitas sinter pada komposit tersebut. Perhitungannya dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\Phi = 1 - (\rho_s / \rho_t) \quad (5)$$

di mana;

Φ = Porositas

ρ_s = Sinter Density (gr/cm³)

ρ_t = densitas teoritik (gr/cm³)

Metalurgi serbuk merupakan proses pembuatan benda komersial dengan menggunakan serbuk sebagai material awal sebelum proses pembentukan. Prinsip dalam pembentukan serbuk adalah memadatkan serbuk logam menjadi serbuk yang diinginkan kemudian memanaskannya di bawah temperatur lelehnya. Sehingga partikel-partikel logam memadu karena mekanisme transformasi massa akibat difusi atom antar permukaan partikel. Pemanasan dalam pembuatan serbuk dikenal dengan *sinter* yang menghasilkan ikatan partikel yang halus, sehingga kekuatan dan sifat fisisnya meningkat [9].

Proses kompaksi membuat serbuk menjadi suatu komponen dengan menggunakan cetakan tertentu. Tekanan yang diberikan saat proses kompaksi digunakan untuk memberikan kepadatan yang tinggi. Dengan semakin naiknya tekanan yang diberikan maka densitas serbuk akan naik dan porositas menurun. Setelah proses kompaksi selesai dilakukan diharapkan mendapatkan densitas yang homogen tetapi hal tersebut sangat sulit didapatkan karena adanya gesekan antara partikel dengan partikel maupun partikel dengan dinding cetakan [10]. Untuk meminimalisir terjadinya gesekan tersebut maka perlu ditambahkan *zinc stearate* sebagai *lubricant*. Proses selanjutnya adalah *sintering* yaitu perlakuan panas yang mengakibatkan terjadinya mekanisme terjadinya ikatan antar partikel menjadi susunan struktur yang kohern pada temperatur di bawah temperatur lebur melalui transport massa dalam skala atomik yang terjadi pada permukaan partikel [11].

II. METODE PENELITIAN

A. Persiapan Bahan

Pengayakan serbuk timbal (W) untuk mendapatkan ukuran serbuk yang sama yaitu 4 μ m. Serbuk tembaga (Cu) yang digunakan berukuran 12 μ m menggunakan alat *sieving*. Selanjutnya serbuk ditimbang menggunakan neraca analitik berdasarkan komposisi masing-masing yaitu 20,30, dan 40wt% Cu sedangkan untuk W sebesar 80, 70, dan 60wt%.

B. Proses Percobaan

Pencampuran serbuk W dan Cu dilakukan menggunakan etanol untuk mencegah oksidasi pada serbuk atau dikenal dengan nama *wet mixing*. Proses pencampuran tersebut dilakukan dengan menggunakan *magnetic stirrer* selama 30 menit. Setelah itu dilakukan proses kompaksi dengan memberikan *zinc stearate* pada *dies* untuk mengurangi gesekan antara serbuk dengan serbuk maupun serbuk dengan dinding *dies*. Kompaksi dilakukan dengan variasi tekanan 200, 400, dan 600 MPa. Pengukuran densitas setelah kompaksi (*green density*) dilakukan dengan menimbang massa sampel, mengukur tinggi serta diameter sampel untuk mendapatkan volume sampel. Proses sintering dilakukan pada temperatur dan waktu tahan yang konstan yaitu 900^oC selama 1 jam menggunakan *horizontal furnace*. Temperatur dan waktu tahan diatur terlebih dahulu setelah sampel sudah dimasukkan dalam *furnace*. Pada penggunaan *furnace* ini pengambilan sampel harus dilakukan hingga temperatur *furnace* mencapai temperatur kamar. *Sinter density* merupakan densitas setelah proses sintering yang dilakukan dengan menimbang massa sampel pada kondisi kering dan di dalam fluida sehingga didapatkan pengurangan massa kemudian sampel dikeringkan.

C. Preparasi Sampel Pengujian

Preparasi sampel dilakukan pada beberapa sampel untuk pengujian. Pengujian XRD dan SEM menggunakan 9 buah sampel untuk masing-masing variabel. Sampel yang berbentuk silinder dengan diameter 14 mm dan tinggi 14 mm dipotong secara melintang untuk mengetahui persebaran *filler* pada matrik dan porositas. Sampel yang dilakukan uji SEM dan XRD permukaannya harus rata sedangkan untuk pengujian SEM harus halus, oleh karena itu dilakukan *grinding*.

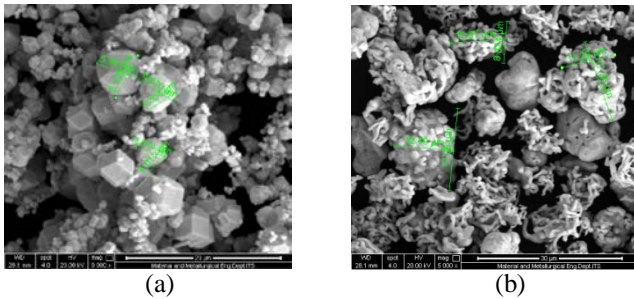
D. Pengujian Sampel

Pengujian terhadap sampel dilakukan dengan uji densitas, XRD, SEM, dan pengujian *hardness*. Sampel untuk uji densitas berdiameter 14 mm dan tinggi 14 mm. Pengujian SEM dan XRD menggunakan alat *PAN Analytical*. Pengujian tekan dilakukan pada sampel yang memiliki tinggi dan diameter 14 mm. Pengujian ini dilakukan menggunakan alat UTM (*Universal Testing Machine*) dengan cara pembebanan hingga sampel mengalami kerusakan.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Karakteristik Serbuk

Serbuk tungsten (W) dengan ukuran 2-6 μ m digunakan pada penelitian. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 (a),



Gambar 1. Pengamatan bentuk partikel menggunakan SEM pada serbuk (a).Tungsten. (b). Tembaga.

Tabel. 1
Hubungan antara Tekanan Kompaksi terhadap *green density* (g/cm^3) pada W-Cu

Komposisi Cu (wt%)	Tekanan Kompaksi (Mpa)		
	200	400	600
20	10,82	11,45	12,09
30	9,92	10,44	11,09
40	9,48	9,93	10,56

serbuk Tungsten tersebut memiliki bentuk poligonal. Sedangkan serbuk tembaga yang digunakan berukuran $12 \mu m$ dengan bentuk *irregular* dan *sponge* seperti ditunjukkan pada Gambar 1 (b).

B. Pengaruh Variasi Komposisi Cu dan Tekanan Kompaksi W-Cu terhadap Densitas

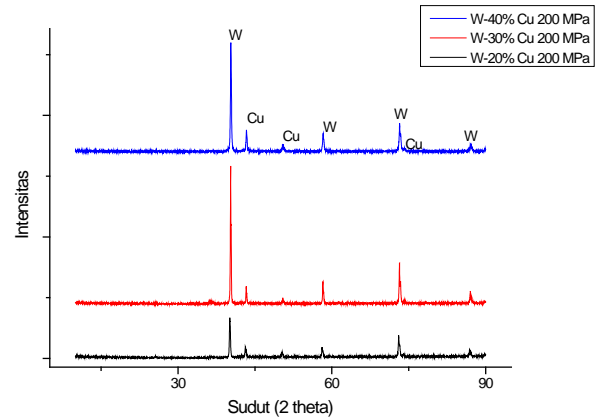
Kompaksi merupakan proses pemampatan serbuk menjadi *green compact* sehingga densitas setelah proses kompaksi dinamakan *green density*. Pada proses kompaksi, terjadi deformasi elastis pada serbuk yang saling bersentuhan dan menyebabkan partikel dapat bergeser melewati partikel yang lainnya dan terjadi penyusunan partikel. Jika tekanan yang diberikan lebih tinggi lagi maka tidak terjadi lagi penyusunan partikel sehingga diperoleh bentuk yang lebih padat [11].

Tabel 1 menunjukkan *green density* tertinggi pada saat tekanan kompaksi 600 MPa dengan penambahan 20%wt Cu pada komposit W-Cu. Kenaikan *green density* sebanding dengan variasi peningkatan tekanan. Semakin tinggi tekanan kompaksi maka semakin tinggi pula *green density* [10]. Hal itu terjadi pada masing-masing penambahan Cu yang berbeda, semakin banyak penambahan Cu maka *green density* pada komposit lebih rendah. Hal tersebut dikarenakan Cu yang bertindak sebagai filler memiliki densitas lebih rendah yaitu $8,96 g/cm^3$ daripada W yang mempunyai densitas sebesar $19,3 g/cm^3$.

Pada proses sintering terdapat interaksi antar permukaan sehingga kerapatan yang dihasilkan memiliki perbedaan daripada setelah kompaksi. Kerapatan yang didapatkan tersebut dinamakan *sinter density*. *Sinter density* dapat diketahui dengan menggunakan prinsip *Archimedes* yaitu dengan melakukan pengukuran massa sampel dalam keadaan kering dengan massa sampel saat berada pada fluida, dalam penelitian ini fluida yang digunakan adalah air.

Tabel 2
Hubungan antara Komposisi Cu Terhadap *Sinter Density* (g/cm^3) pada W-Cu

Komposisi Cu (wt%)	Tekanan Kompaksi (Mpa)		
	200	400	600
20	11,39	13,34	14,14
30	10,84	11,89	12,53
40	10,11	10,59	11,59



Gambar 2. Grafik Analisa XRD sampel W-20, 30, dan 40wt%Cu dengan Tekanan Kompaksi 200 MPa

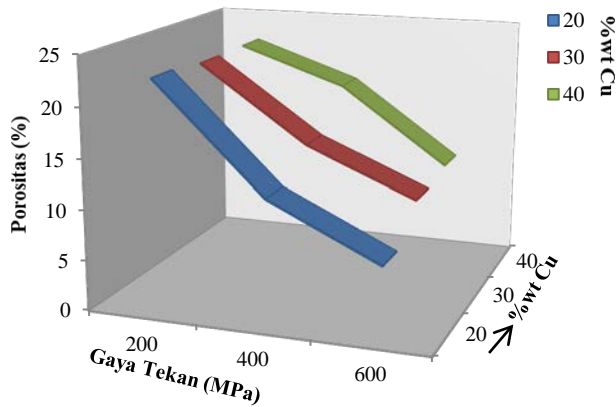
Sinter density optimal terjadi pada sampel 20wt% Cu yang dilakukan kompaksi dengan tekanan sebesar 600 MPa yaitu sebesar $14,14 g/cm^3$. *Sinter density* juga semakin meningkat dengan semakin meningkatnya tekanan kompaksi. Hal tersebut disebabkan karena semakin tinggi tekanan kompaksi mengakibatkan jarak interaksi antar partikel lebih dekat sehingga memperbesar *interlocking* antar partikel [10].

Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui fasa-fasa yang terbentuk pada komposit W-Cu. *Peak* pada hasil XRD menunjukkan *peak* W dan Cu, tidak terdapat senyawa lain yang terbentuk berdasarkan analisa tersebut. Hasil dari XRD ditunjukkan pada Gambar 2.

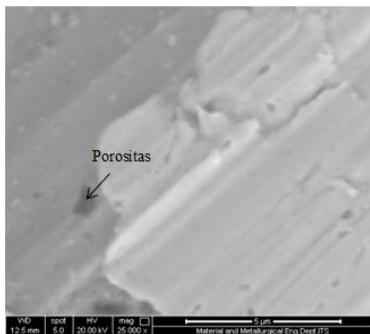
Berdasarkan perbandingan kurva hasil XRD seperti pada Gambar 2 dapat diketahui bahwa *peak* tertinggi pertama yang berkisar 2θ antara $40,1074^\circ - 40,2841^\circ$ sedangkan nilai 2θ mendekati puncak kurva tertinggi ICDDPDF 00-004-0806 dan 01-089-3659 untuk tungsten saat 2θ sebesar $40,2841^\circ$ dan $40,1074^\circ$, sedangkan untuk Cu nilai 2θ yang berkisar antara $43,1457^\circ - 43,3384^\circ$ yang nilainya mendekati ICDDPDF 01-071-4611 dan 01-071-3761.

C. Pengaruh Komposisi Cu dan Tekanan Kompaksi terhadap Porositas

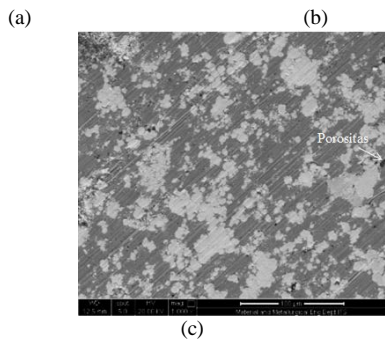
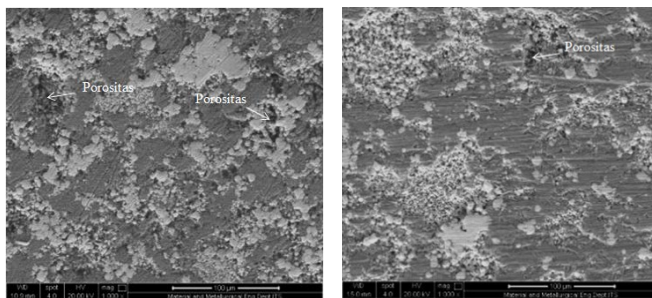
Porositas mengindikasikan adanya kekosongan setelah proses sintering pada beberapa daerah tertentu. Nilai porositas berbanding terbalik dengan nilai *sinter density*. Semakin tinggi nilai *sinter density* maka porositas semakin rendah.



Gambar 3. Pengaruh tekanan kompaksi dan komposisi Cu terhadap porositas pada W-Cu



Gambar 4. Pengamatan porositas menggunakan SEM pada bagian melintang sampel W-40wt% Cu, Tekanan Kompaksi 600 MPa dengan perbesaran 25.000x.



Gambar 5. Pengamatan porositas dengan menggunakan SEM pada bagian melintang sampel 40wt% Cu dengan tekanan kompaksi (a) 200 MPa (b) 400 MPa dan (c) 600 MPa pada perbesaran 1000x

Setelah proses sintering terjadi pengurangan porositas sehingga menghasilkan material yang lebih tinggi kerapatannya dibandingkan sebelum dilakukan sintering. Hal ini menunjukkan bahwa *sinter density* berhubungan dengan

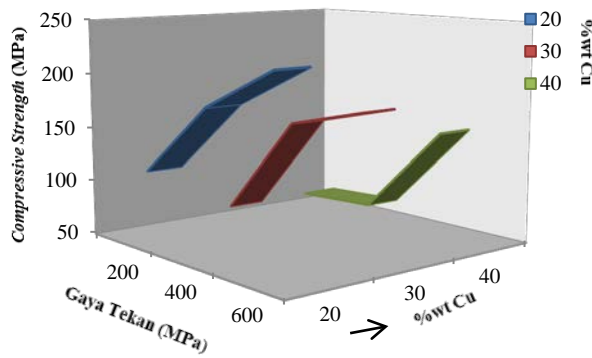
banyaknya porositas yang terjadi setelah proses sintering. Nilai porositas akan semakin kecil dengan semakin tinggi tekanan kompaksi. Tekanan kompaksi yang lebih tinggi menyebabkan interaksi gesekan antar partikel lebih tinggi sehingga mengurangi porositas. Porositas berpengaruh terhadap sifat mekanik, adanya porositas dapat menurunkan sifat mekanik karena porositas dapat mengakibatkan konsentrasi tegangan sehingga mudah untuk berdeformasi plastis.

Gambar 4 menunjukkan adanya porositas setelah dilakukan sintering. Porositas ini disebabkan karena adanya rongga saat kompaksi yang menyebabkan adanya gas yang terjebak di antara partikel saat proses sintering.

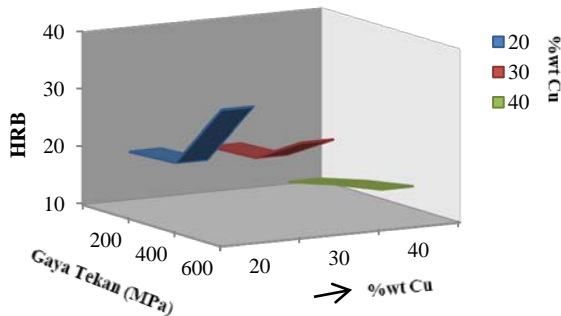
Morfologi hasil pembuatan komposit W-Cu berdasarkan pengamatan SEM menunjukkan bahwa porositas pada tekanan 600 MPa lebih sedikit bila dibandingkan dengan tekanan 200 maupun 400 MPa. Dengan bertambahnya tekanan kompaksi maka porositas berangsur-angsur semakin menurun. Saat penekanan pada proses kompaksi, serbuk akan saling mengunci (*interlocking*). Semakin tinggi gaya yang diberikan maka kontak antar permukaan semakin luas. Persebaran penguat pada matrik juga dipengaruhi ukuran butir. Semakin kecil ukuran butir maka gaya gesek antar partikel semakin besar dan luas permukaan kontak antar partikel lebih banyak saat dilakukan kompaksi sehingga akan menaikkan ikatan antar partikel saat difusi pada proses sintering. Difusi atom merupakan proses perpindahan atom pada zat padat akibat adanya kenaikan temperatur. Difusi terjadi karena partikel berpindah secara acak dari area yang memiliki konsentrasi tinggi ke konsentrasi yang lebih rendah. Besarnya laju difusi berkaitan dengan besarnya energi bebas yang dimiliki oleh suatu material. Berdasarkan variasi tekanan kompaksi pada penelitian ini, akan mempengaruhi laju difusi atomik saat proses sintering. Sampel yang diberikan tekanan kompaksi lebih tinggi akan menyimpan energi bebas yang lebih tinggi sehingga laju difusi atomik akan lebih cepat terjadi dengan adanya energi yang masih tersimpan [11].

D. Pengaruh Komposisi Cu dan Tekanan Kompaksi terhadap Sifat Mekanik

Pada aplikasi peluru, W sangat bagus digunakan karena memiliki densitas yang tinggi. Tetapi W murni kurang cocok digunakan karena sangat getas. Selain itu W murni memerlukan temperatur sintering yang tinggi. Untuk memperbaiki sifat mekaniknya maka W dipadukan dengan unsur lain [12]. Oleh karena itu untuk menambahkan keuletan pada tungsten ditambahkan tembaga. Sifat mekanik komposit W-Cu selain kekerasan dapat diketahui berdasarkan hasil pengujian tekan (*compressive test*). Uji tekan merupakan pengujian untuk mendapatkan sifat mekanik suatu material selain uji tarik. Pengujian ini dilakukan karena dimensi sampel yang kecil sehingga lebih cenderung untuk dilakukan uji tekan daripada uji tarik.



Gambar 6. Hubungan tekanan kompaksi dan komposisi penambahan Cu terhadap *Compressive Strength*.

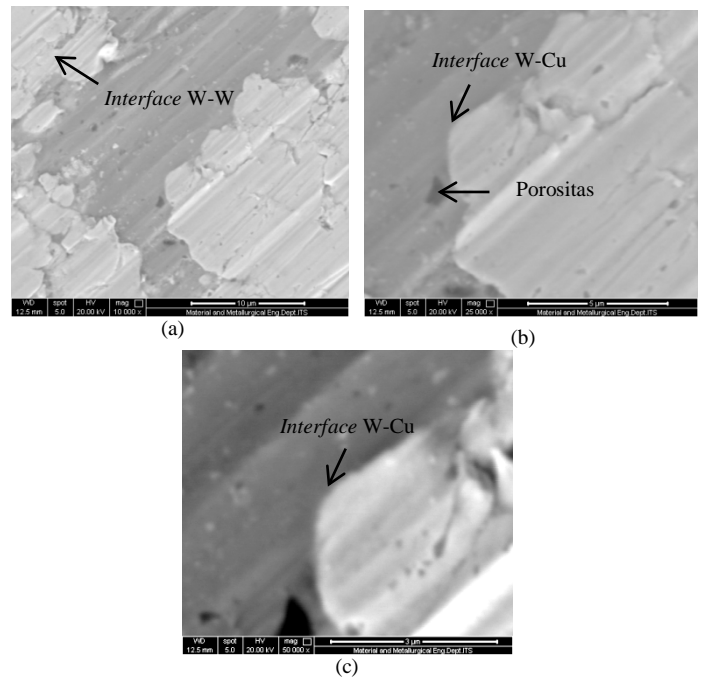


Gambar 7. Hubungan tekanan kompaksi dan komposisi penambahan Cu terhadap Kekerasan

Compressive strength yang dihasilkan dari komposit W-Cu berbanding lurus dengan tekanan kompaksi dan berbanding terbalik dengan penambahan Cu. *Compressive strength* paling tinggi diperoleh saat penambahan Cu sebanyak 20wt% yang dikompaksi dengan tekanan 600 MPa yaitu 220,89 MPa. Hal tersebut berbanding lurus dengan porositasnya. Semakin banyak porositas maka *compressive strength* akan semakin kecil karena porositas merupakan tempat terjadinya konsentrasi tegangan.

Selain kekuatan tekan perlu dilakukan pengujian kekerasan. Pengujian kekerasan ditunjukkan pada Gambar 7. Pada pengujian kekerasan menggunakan metode Rockwell B. Indentor yang digunakan berupa bola baja berdiameter 1/16” dan beban utama 100 kg.

Berdasarkan Gambar 7 menunjukkan nilai kekerasan W-Cu optimal pada saat 20wt % Cu dengan tekanan kompaksi 600 MPa. Tetapi kekerasan cenderung berkurang dengan bertambahnya komposisi Cu karena Cu memiliki sifat yang lebih lunak daripada W [13]. Kekerasan paling tinggi terjadi pada komposisi W-20wt%Cu dengan tekanan kompaksi 600 MPa sebesar 32 HRB selanjutnya komposisi W-30wt%Cu dengan tekanan kompaksi sebesar 600 MPa yaitu mempunyai kekerasan sebesar 25 HRB. Sedangkan kekerasan paling rendah saat komposisi 40wt%Cu dengan tekanan kompaksi 200 MPa yakni sebesar 12 HRB dan paling rendah kedua saat komposisi 40wt%Cu dengan tekanan kompaksi 400 MPa yakni sebesar 14 HRB.



Gambar 8 . Hasil pengamatan SEM pada bagian *interface* komposit W-40wt% Cu P= 400 MP dengan perbesaran (a) 10.000x (b) 25.000x (c) 50.000x

E. Analisa Antar Muka pada Komposit W-Cu

Komposit merupakan material yang terbentuk dari kombinasi dua atau lebih material yang berbeda yang tercampur secara makroskopik untuk menghasilkan material dengan sifat yang diinginkan. Perbedaan dari dua material itu akan menyebabkan daerah batasan. Daerah batasan atau yang dikenal dengan istilah *interface* (daerah antar muka) merupakan daerah yang mengidentifikasi ikatan antar *matrik* dan *filler*, setelah proses sintering. Pada Gambar 8 menunjukkan *interface* dari hasil SEM W-40wt% Cu dengan tekanan kompaksi 600 MPa. Pada gambar tersebut tampak bahwa pada *interface* juga terlihat adanya rongga. Rongga tersebut merupakan porositas seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 8 (c).

Selain adanya daerah batasan antara matrik dengan *filler* juga terdapat daerah antar muka antara serbuk W dengan serbuk W seperti yang ditunjukkan Gambar 8 (a) dan (b). Persyaratan dasar kekuatan komposit terletak pada kekuatan antar muka matrik dan *filler*. Ikatan antar muka inilah yang menjadi jembatan transmisi tegangan luar yang diberikan dari matrik menuju partikel *filler*. Jika ikatan antarmuka terjadi dengan baik maka transmisi tegangan ini dapat berlangsung dengan baik pula [11].

IV. KESIMPULAN

Pada variasi komposisi penambahan Cu sebesar 20, 30, dan 40wt% dengan variasi tekanan kompaksi 200, 400, dan 600 MPa, didapatkan nilai *green density* dan *sinter density* paling tinggi pada W-20wt% dengan tekanan kompaksi 600 MPa sebesar 12,09 g/cm³ dan 14,14 g/cm³. Pada variasi komposisi penambahan Cu sebesar 20, 30, dan 40wt% dengan variasi tekanan kompaksi 200, 400, dan 600 MPa, didapatkan

nilai kekerasan dan *compressive strength* paling tinggi pada W-20wt% dengan tekanan kompaksi 600 MPa sebesar 32 HRB dan 220,89 MPa.

UCAPAN TERIMA KASIH

“Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing Dr. Widyastuti,S.Si., M.Si. atas dukungan dan motivasinya, serta kedua orang tua tercinta yang telah membuat penulis semangat mengerjakan penelitian ini, serta teman-teman yang sering membantu dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fryxell, Glen. E, dan Applegate. R. L, *From Ingot to Target: A Cast Bullet Guide for Handgunners*. USA (2011).
- [2] Mravic. B, “Lead-Free Bullet,” United States Patent 5,399,187, March 21, (1995)
- [3] Chen. P, Shen. Q, Luo. G, Li. M., Zhang. L, “The mechanical properties of W–Cu composite by activated sintering”. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 36 (2013): 220–224
- [4] Corbin. D. R, *Using Tungsten Powder in Small Arms Projectiles*. USA: Corbin Manufacturing & Supply, Inc (1998).
- [5] Amick. D. D, “Methods for Producing Medium-Density Articles from High-Density Tungsten Alloy,” United States Patent 6,447,715 B1, September 10 (2002).
- [6] Kaw. A. K, *Mechanics of Composite Materials Second Edition*. New York: Taylor & Francis Group (2006).
- [7] Callister. W. D, *Materials Science and Engineering: An Introduction*. USA: John Wiley & Sons, Inc (2007).
- [8] Ruwaida. Arfina. F, “Sintesis MMCs Cu-Al₂O₃ Melalui Proses Metalurgi Serbuk dengan Variasi Fraksi Volum Al₂O₃ dan Temperatur Sintering,” Tugas Akhir, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (2010).
- [9] Jones. W. D, *Fundamental Principles of Powder Metallurgy*, Edward Aronold. London (1960).
- [10] German. R. M, *Powder Metallurgy Science*. USA : Metal powder Industries Federation (1998).
- [11] Setyowati. Vuri. A, “Pengaruh Komposisi Sn dan Variasi Tekanan Kompaksi Terhadap Densitas dan Modulus Elastisitas Pada MMC Pb-Sn untuk Core Proyektil Peluru dengan Proses Metalurgi Serbuk,” Tugas Akhir, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (2012).
- [12] Kock et al, “Powder Comprising Coated Tungsten Grains,” United States Patent 4,498,395, February 12, (1985)
- [13] Upadhyaya. A, Ghosh. C, “Effect of Coating and Activators on Sintering of W-Cu Alloys,” *Powder Metallurgy Progress* Vol 2 (2002) 98-110