



**TUGAS AKHIR – TL 141584**

**PENGARUH VARIASI TEKANAN DAN TEMPERATUR  
WARM COMPACTION TERHADAP STRUKTUR MIKRO  
DAN SIFAT MEKANIK KOMPOSIT Cu-10%Sn + 0,5%  
ZINC STEARATE SEBAGAI MATERIAL PELURU  
FRANGIBLE.**

NANDA HENDRA PRATAMA  
NRP. 2712100008

Dosen Pembimbing  
Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si  
Rindang Fajarin, S.Si.,M.Si

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT – TL 141584**

**EFFECT OF PRESSURE AND WARM COMPACTION  
TEMPERATURE VARIATIONS ON MICROSTRUCTURE  
AND MECHANICAL PROPERTIES OF Cu-10%Sn + 0,5%  
ZINC STEARATE COMPOSITE AS FRANGIBLE BULLET  
MATERIAL**

NANDA HENDRA PRATAMA  
NRP. 2712100008

Advisor

Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si

Rindang Fajarin, S.Si.,M.Si

DEPARTMENT OF MATERIALS AND  
METALLURGICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

**PENGARUH VARIASI TEKANAN DAN TEMPERATUR  
WARM COMPACTION TERHADAP STRUKTUR MIKRO  
DAN SIFAT MEKANIK KOMPOSIT Cu-10%Sn + 0,5%  
ZINC STEARATE SEBAGAI MATERIAL PELURU  
FRANGIBLE.**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Material Inovatif  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Nanda Hendra Pratama  
NRP. 2712100008**

**Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :**

Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si

.....( Pembimbing I )

Rindang Fajarin, S.Si.,M.Si

.....( Pembimbing II )



**PENGARUH VARIASI TEKANAN DAN TEMPERATUR  
WARM COMPACTION TERHADAP STRUKTUR MIKRO  
DAN SIFAT MEKANIK KOMPOSIT Cu-10%Sn + 0,5%  
ZINC STEARATE SEBAGAI MATERIAL PELURU  
FRANGIBLE.**

Nama : Nanda Hendra Pratma  
NRP : 2712 100 008  
Dosen Pembimbing : Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si  
Rindang Fajarin, S.Si.,M.Si

**ABSTRAK**

Karakterisasi material peluru *frangible* dengan pembuatan komposit Cu-10%Sn menggunakan *warm compaction* telah dilakukan. Pembuatan komposit ini menggunakan metode metalurgi serbuk dengan kadar kemurnian serbuk 99,7%. Metode *warm compaction* merupakan metode penambahan temperatur pada saat kompaksi. Hal ini bertujuan untuk menghilangkan proses *sintering*. Prosedur pembuatan komposit ini adalah pencampuran serbuk dengan tujuan menghomogenkan dan kompaksi serbuk dengan menambahkan temperatur. Penelitian ini menggunakan variasi tekanan 300, 400, 500 dan 600 MPa serta variasi temperatur kompaksi 100 dan 200°C. Kedua temperatur menghasilkan nilai densitas yang tertinggi pada tekanan 600 MPa dengan temperatur 100°C dan 200°C berturut – turut adalah 8,33 dan 8,31 g/cm<sup>3</sup>. Dari hasil pengujian sifat mekanik didapatkan nilai kekerasan maksimum pada tekanan 600 MPa, temperatur 200°C yaitu 195,814 HV dan kekuatan tekan didapatkan nilai maksimum 481,453 MPa pada tekanan 600 MPa, temperatur 200°C. Metode yang digunakan dalam pembuatan komposit Cu-10%Sn ini mampu menghasilkan senyawa Cu<sub>3</sub>Sn dan Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>.

**Katakunci:** *frangible*, metalurgi serbuk, Cu-Sn, *warm compaction*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**EFFECT OF PRESSURE AND WARM COMPACTION  
TEMPERATURE VARIATIONS ON MICROSTRUCTURE  
AND MECHANICAL PROPERTIES OF Cu10%Sn+0,5%  
ZINC STEARATE COMPOSITE AS FRANGIBLE BULLET  
MATERIAL**

Name of Student : Nanda Hendra Pratma  
NRP : 2712 100 008  
Advisor : Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si  
Rindang Fajarin, S.Si.,M.Si

**ABSTRACT**

Frangible bullet material using Cu10%Sn Composite with warm compaction method characterization has been done. This composite is made by a powder metallurgy method with 99,7% purity. Warm compaction method is a method of adding the temperature at the time of compaction. It aims to eliminate the sintering process. The procedures for making these composites is mixing the powder with the aim of homogenising and compacting the powder by adding temperature. This research use pressure variations 300, 400, 500, 600 MPa and compaction temperature variations 100 and 200°C. The highest density noted on 200°C from compaction temperature variations. It shows 8.33 and 8.31 g/cm<sup>3</sup>. As the result of mechanical testing, the highest hardness noted on 600 MPa and 200°C. This method confirmed to form Cu<sub>3</sub>Sn and Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> intermetallics.

**Keywords :** frangible, powder metallurgy, Cu-Sn, compaction temperature

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikumWr. Wb.

Dengan menyebut nama Allah SWT yang Maha Pengasih lagi Maha Panyayang, kami panjatkan puja dan puji syukur atas kehadirat-Nya, yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, dan inayah-Nya kepada kami, sehingga kami dapat laporan tugas akhir. Adapun laporan ini disusun dan diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan studi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya.

Adapun laporan tugas akhir dengan judul “**Pengaruh Variasi Tekanan Dan Temperatur *Warm Compaction* Terhadap Struktur Mikro Dan Sifat Mekanik Komposit Cu-10%Sn Dengan 0,5% *Zinc Stearate* Sebagai Material Peluru *Frangible*.**” telah kami usahakan semaksimal mungkin dan tentunya dengan bantuan berbagai pihak, sehingga dapat memperlancar pembuatan laporan ini. Untuk itu kami tidak lupa menyampaikan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu kami dalam pembuatan laporan ini.

Namun tidak lepas dari semua itu, kami menyadari sepenuhnya bahwa ada kekurangan baik dari segi penyusun bahasa maupun segi lain. Penyusun mengharapkan semoga dari laporan kerja praktik ini dapat diambil hikmah dan manfaat sehingga dapat memberikan inspirasi terhadap pembaca.

Surabaya, 25 Juli 2016

Penulis

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

	hal
Halaman Judul .....	i
Lembar Pengesahan.....	v
Abstrak .....	vii
Abstract .....	ix
Kata Pengantar .....	xi
Daftar Isi .....	xiii
Daftar Gambar .....	xv
Daftar Tabel .....	xix

### BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3

### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakterisasi Material Peluru <i>Frangible</i> .....	5
2.2 Material .....	6
2.2.1 Cu dan Sn .....	6
2.2.2 Oksidasi Cu-Sn .....	10
2.3 Metalurgi Serbuk .....	14
2.3.1. Perhitungan porositas .....	14
2.3.2. <i>Warm Compaction</i> .....	15
2.3.3. <i>Lubricant</i> .....	21
2.4 Difusi.....	24
2.5 Penelitian sebelumnya.....	26

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bahan .....	31
3.2 Alat .....	33
3.3 Diagram Alir Penelitian .....	37
3.3.1 Preparasi Bahan .....	39

3.3.2	Proses Penelitian .....	39
3.3.3	Pengujian .....	40

#### **BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

4.1.	Analisa Data .....	45
4.1.1.	Proses pembuatan komposit Cu-Sn .....	45
4.1.2.	Karakterisasi Komposit Cu-10%Sn .....	49
4.1.2.1.	Aanalisa XRD .....	49
4.1.2.2.	Analisa SEM-EDX .....	53
4.1.3.	Analisa Densitas dan Porositas Komposit Cu-Sn .....	57
4.1.4.	Analisa Sifat Mekanik Komposit Cu-Sn .....	63
4.2.	Pembahasan .....	68

#### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1	Kesimpulan .....	71
5.2	Saran .....	71

#### **DAFTAR PUSTAKA**

#### **LAMPIRAN**

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Diagram fasa Cu-Sn .....	8
<b>Gambar 2. 2</b>	Struktur mikro dari komposit Cu-Sn (a) tanpa etsa (b) sampel etsa .....	9
<b>Gambar 2. 3</b>	(a,b) SEM dari oksidasi Sn di udara pada T=1000°C selama 1 jam (c) Spectrum EDX dan nilai tiap elemen pada struktur oksida timah.....	13
<b>Gambar 2. 4</b>	(a) SEM dari oksida timah dengan pada T=1000°C dengan waktu tahan 1 jam (b)Spectrum EDX.....	13
<b>Gambar 2. 5</b>	(a) SEM dari oksida timah dengan pada T=1000°C dengan waktu tahan 2 jam (b)Spectrum EDX.....	14
<b>Gambar 2. 6</b>	Single dan double action compaction .....	16
<b>Gambar 2. 7</b>	Ilustrasi proses Warm compaction.....	16
<b>Gambar 2. 8</b>	Perbedaan green densitas kompaksi konvensional dengan warm compaction .....	19
<b>Gambar 2. 9</b>	Perbedaan green densitas kompaksi konvensional (AncorMax 200) dengan warm die compaction (Acrawax C).....	19
<b>Gambar 2. 10</b>	Pengaruh Jumlah Pelumas Terhadap Apparent Density .....	22
<b>Gambar 2. 11</b>	Pengaruh Zinc stearate terhadap (1) densitas, (2) Total Porosity, (3) Open Porosity, dan (4) Closed Porosity .....	23
<b>Gambar 2. 12</b>	Efek penambahan lubricant pada proses penekanan .....	24
<b>Gambar 2. 13</b>	(a) Zona difusi dari Cu-Ni (b) Representasi dari difusi dari atom Cu (berwarna) dan Ni (abu-abu) (c) Profil konsentrasi Cu-Ni dengan fungsi posisi. ....	26
<b>Gambar 2. 14</b>	Distribusi komponen kompaksi serbuk pada (a) 650°C ; (b) 500°C .....	27

<b>Gambar 2. 15</b>	Hubungan antara densitas kompaksi dengan tekanan pada temperatur kamar .....	28
<b>Gambar 2. 16</b>	Hubungan antara temperatur kompaksi dengan densitas kompaksi .....	28
<b>Gambar 2. 17</b>	Efek temperatur terhadap densitas sebagai fungsi tekanan kompaksi .....	29
<b>Gambar 3. 1</b>	Serbuk Tembaga .....	31
<b>Gambar 3. 2</b>	Serbuk Timah .....	32
<b>Gambar 3. 3</b>	Zink Stearat .....	32
<b>Gambar 3. 4</b>	Spatula.....	33
<b>Gambar 3. 5</b>	Beakier Glass .....	33
<b>Gambar 3. 6</b>	Sarung Tangan dan Masker.....	34
<b>Gambar 3. 7</b>	Cetakan.....	34
<b>Gambar 3. 8</b>	Magnetic Stirrer .....	34
<b>Gambar 3. 9</b>	Alat Kompaksi .....	35
<b>Gambar 3. 10</b>	Alat Pemanas Cetakan/dies .....	36
<b>Gambar 3. 11</b>	Neraca Digital .....	36
<b>Gambar 3. 12</b>	Diagram Alir Penelitian .....	38
<b>Gambar 4. 1</b>	Hasil XRD serbuk (a) Cu dan (b) Sn .....	46
<b>Gambar 4. 2</b>	Hasil pengujian SEM, a) Serbuk Cu; b) Serbuk Sn.....	47
<b>Gambar 4. 3</b>	Serbuk (a) tembaga (Cu), (b) timah (Sn), dan (c) Cu-Sn setelah di mixing.....	48
<b>Gambar 4. 4</b>	Sampel pengujian hasil kompaksi.....	49
<b>Gambar 4. 5</b>	Hasil pengujian XRD dengan temperatur (a) 100°C dan (b) 200°C.....	51
<b>Gambar 4. 6</b>	Presentasi kuantitatif senyawa pada temperatur 100°C dengan variasi tekanan .....	52
<b>Gambar 4. 7</b>	Presentasi kuantitatif senyawa pada temperatur 200°C dengan variasi tekanan .....	53
<b>Gambar 4. 8</b>	Hasil SEM (a) temperatur 100°C dan (b) temperature 200°C dengan perbesaran 3000x.....	55
<b>Gambar 4. 9</b>	Hasil SEM EDX (a) Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub> (b) Cu <sub>3</sub> Sn (c) Cu .....	58

<b>Gambar 4. 10</b>	Pengaruh temperatur hot compaction dengan (a) temperatur 100°C, dan (b) temperatur 200°C terhadap densitas dan porositas .....	60
<b>Gambar 4. 11</b>	Hasil pengamatan porositas SEM perbesaran 300x pada temperatur 100°C dengan tekanan (a) 300; (b) 400; (b) 500; dan (d)600 MPa.....	63
<b>Gambar 4. 12</b>	Hasil pengamatan porositas SEM perbesaran 300x pada tekanan 600 MPa dengan temperature (a) 100 dan (b) 200°C .....	64
<b>Gambar 4. 13</b>	Pengaruh tekanan terhadap nilai kekerasan dengan temperatur 100°C dan 200°C .....	66
<b>Gambar 4. 14</b>	Pengaruh tekanan terhadap kekuatan tekan dan modulus elastisitas pada temperatur (a) 100°C dan (b) 200°C .....	69

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b>	Karakterisasi peluru frangible .....	5
<b>Tabel 2. 2</b>	Sifat Fisik dan Mekanik tembaga dan timah .....	7
<b>Tabel 2. 3</b>	Rentang Temperatur Homolog untuk Berbagai Proses .....	20
<b>Tabel 2. 4</b>	Sifat dari Beberapa Pelumas yang Umum Dipakai dalam Metalurgi Serbuk .....	21
<b>Tabel 3. 1</b>	Besar Beban Utama dan Jenis Indentor untuk metode Rockwell .....	44
<b>Tabel 4. 1</b>	Hubungan antara variasi tekanan dengan persentasi kuantitatif (%) senyawa pada temperatur 100°C .....	52
<b>Tabel 4. 2</b>	Hubungan antara variasi tekanan dengan persentasi kuantitatif (%) senyawa pada temperatur 200°C .....	53
<b>Tabel 4. 3</b>	Hubungan antara Tekanan Kompaksi terhadap green density dan porositas pada komposit Cu- Sn .....	59
<b>Tabel 4. 4</b>	Hubungan antara Tekanan Kompaksi terhadap kekerasan (HV) pada komposit Cu-Sn .....	65
<b>Tabel 4. 5</b>	Hubungan antara Tekanan Kompaksi terhadap Kekuatan tekan (MPa) pada komposit Cu-Sn.....	68
<b>Tabel 4. 6</b>	Hubungan antara Tekanan Kompaksi terhadap modulus elastisitas (MPa) pada komposit Cu-Sn ...	68

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB I PENDAHULUAN

### I.1. Latar Belakang

Kompaksi pada metalurgi serbuk memiliki dua jenis yaitu *die compaction* dan *isostatic compaction*. Kedua jenis kompaksi tersebut dapat dibagi menjadi dua metode berdasarkan temperatur yaitu *cold compaction* dan *warm/hot compaction* (Viplava,2015). Proses yang dilakukan pada *cold compaction* memiliki tiga proses yaitu *mixing*, *compaction* dan *sintering*. Hal ini berbeda dengan *warm/hot compaction* yang hanya memiliki dua proses yaitu *mixing* dan *compaction*. Terjadi penggabungan antara *sintering* dan kompaksi sehingga waktu pengerjaan relatif singkat. Faktor yang mempengaruhi *hot compaction* adalah tekanan, temperatur, *lubricant*, ukuran partikel dan fraksi komposisi. Dari keenam faktor tersebut yang paling berpengaruh pada metode *hot compaction* adalah tekanan dan temperatur. Hal ini karena kedua variabel tersebut mampu menghasilkan material yang lebih padat sehingga memiliki densitas yang lebih daripada *cold compaction*.

Penelitian mengenai *hot compaction* ini dilakukan pada material besi (Fe). Ngai Twang Wei, 2005, menyatakan bahwa *hot compaction* ini tidak hanya diterapkan pada besi tetapi juga pada logam tembaga (Cu). Penelitian yang dilakukan adalah memberikan pengaruh tekanan pada sampel tembaga dengan temperatur 145°C dan didapatkan densitas semakin naik hingga tekanan mencapai 700 MPa. Selain itu, Ngai Twang Wei menyebutkan bahwa komposisi *lubricant* perlu dikontrol karena akan mempengaruhi densitas sampel (Ngai, 2005). Feng, 2011, menyatakan bahwa densitas dan kekerasan semakin meningkat seiring penambahan tekanan kompaksi dengan temperatur *sintering* 900°C. Hal ini didukung dengan Ping Han, 2013, yang



menyatakan bahwa nilai densitas dan kekerasan juga akan meningkat seiring bertambahnya temperatur kompaksi dengan tekanan yang rendah.

Dari penelitian sebelumnya menyatakan bahwa tekanan dan temperatur sangat berpengaruh terhadap densitas dan sifat mekanik. Akan tetapi ketiga penelitian tersebut menggunakan tekanan yang tinggi dan temperatur yang tinggi serta menggunakan sintering. Oleh karena itu, penelitian ini mencoba menggabungkan keduanya untuk mendapatkan densitas dengan tekanan dan temperatur *hot compaction* tanpa menggunakan *sintering*.

### **I.2. Perumusan Masalah**

Berdasarkan penjelasan pada latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana pengaruh variasi tekanan dan temperatur *warm compaction* terhadap karakteristik struktur mikro komposit Cu-Sn sebagai material peluru *frangible*?
2. Bagaimana pengaruh variasi tekanan dan temperatur *warm compaction* terhadap sifat mekanik komposit Cu-Sn sebagai material peluru *frangible*?

### **I.3. Batasan Masalah**

Dalam penelitian ini diberikan batasan agar dicapai hasil yang sesuai dengan tujuan penelitian serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Kondisi lingkungan tidak berpengaruh;
2. Laju pemanasan dianggap konstan;
3. Distribusi serbuk dianggap homogen;
4. Pengotor diabaikan;



5. Dimensi sampel homogen.

#### **I.4. Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian yaitu :

1. Menganalisis pengaruh variasi tekanan dan temperatur *warm compaction* terhadap karakteristik struktur mikro komposit Cu-Sn sebagai material peluru *frangible*.
2. Menganalisis pengaruh variasi tekanan dan temperatur *warm compaction* terhadap sifat mekanik komposit Cu-Sn sebagai material peluru *frangible*.

#### **I.5. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan alternatif metode pembuatan dan material yang aman untuk lingkungan sekitar dalam pembuatan peluru *frangible*. Selain itu, penelitian ini diharapkan mampu menjadi referensi dalam penelitian peluru *frangible* dalam pengembangan kualitas peluru. Sehingga dapat menjadikan Indonesia mampu memproduksi peluru *frangible* guna mewujudkan kemandirian teknologi pertahanan dan keamanan nasional.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Karakterisasi Material Peluru *Frangible*

Peluru *frangible* adalah peluru yang didesain untuk hancur menjadi bagian-bagian yang kecil. Peluru *frangible* digunakan untuk meminimalisir adanya kecelakaan akibat adanya pantulan peluru atau *ricochet* (Mates, 2006). Ricochet memiliki kemungkinan arah pantulan peluru yang beragam, memantul kembali serong keatas hingga sampai kembali kearah penembak atau bisa disebut “*splashback*”. Dengan penggunaan peluru *frangible* maka kemungkinan untuk terjadi ricochet atau splashback dapat diminimalisir dengan hancurnya peluru menjadi bagian-bagian yang kecil (Mullins, 2001).

Peluru *frangible* dibuat dari komposit matrik logam dengan bahan logam atau paduan logam berupa tembaga, besi, nikel, emas, perak, timbal, krom, dan paduan mereka, namun sangat disarankan untuk memakai tembaga atau paduan tembaga. Karakteristik Peluru *frangible* ditunjukkan dengan Tabel 2.1:

**Tabel 2. 1** Karakterisasi peluru *frangible*

No	Karakteristik	Nilai	Sumber
1	Massa Jenis	1,75 – 8,25 g/cc	Hansen (2008)
2	Kekuatan Tekan	31– 310 Mpa	Kruachatturat, dkk (2009)
3	Kekerasan	54 - 119 HV	



## 2.2. Material

Komposit logam (*metal matrix composite*) telah diaplikasikan dalam kehidupan sehari – hari. Material seperti *cast iron* dengan karbon (grafit) atau besi yang mengandung karbida tinggi, seperti tungsten karbida, yang mengandung karbida serta pengikat logam, juga termasuk salah satu jenis komposit logam. Komposit ini bertujuan untuk mendapatkan sifat yang menguntungkan seperti koefisien fibrasi yang baik, ketahanan abrasi yang tinggi, modulus young, spesifik grafitasi rendah dan koefisien termal rendah (Sobczak, 2001).

### 2.2.1 Cu dan Sn

Tembaga adalah logam *non-polymorphous* dengan struktur kristal *face centered cubic* (FCC). Tembaga murni memiliki warna merah, warna kuning merupakan penambahan dari unsur zinc dan nikel memberikan warna silver. Temperatur lebur tembaga adalah  $1083^{\circ}\text{C}$  dan densitas berkisar  $8900\text{kg}/\text{cm}^3$  yang mana tiga kali lebih berat daripada aluminium. Tembaga murni memiliki konduktivitas elektri yang baik sehingga digunakan sebagai evaluasi logam lain serta karakteristik paduan (Skočovský, 2006). Tembaga merupakan logam yang ulet dan mampu ditempa dengan baik (Metrim, 2015).

Tembaga memiliki ketahanan terhadap oksidasi, tetapi, sangat reaktif dengan sulfur dan akan terbentuk tembaga sulfida. Selain oksigen, fosfor dan besi merupakan unsur yang tidak dikehendaki. Karena tembaga sangat reaktif, maka kerusakan permukaan, porositas dan rongga dalam sangatlah tinggi (Radomila Konečná, 2012).



Pada tahun 1988, tembaga telah diproduksi dalam bentuk serbuk dan menempati tempat kedua setelah serbuk besi dan baja di Amerika Utara. Konsumsi serbuk tembaga diaplikasikan dalam pembentukan perunggu, paduan tembaga, material friksi, sikat tembaga karbon dan tembaga dengan konduktifitas elektrik tinggi (ASM Metal Handbook Vol.2). Telah dinyatakan bahwa struktur terbuka dan berporos dari tembaga didapatkan dari densitas arus yang tinggi yang idealnya digunakan sebagai elektroda pada perangkat elektrokimia seperti *fuel cell*, baterai dan sensor kimia (Nikolic,2007). Sifat yang berbeda dapat diperoleh dengan elektrodposisi dari larutan elektrolit berbeda dibawah operasi yang berbeda. Efek yang sama bisa juga diperoleh dengan mengubah lebih dari bentuk gelombang potensial selama deposisi potensial tinggi yang menjaga agar kondisi tidak berubah (Popov, 1989).

**Tabel 2. 2** Sifat Fisik dan Mekanik tembaga dan timah (Li, 2012)

No.	Sifat	Cu	Sn
1	Nomor Atom	29	50
2	Massa Atom	63.54 g/mol	118,71 g/mol
3	Titik leleh	1083 °C	231,9°C
4	Densitas	8.96 g/cm <sup>3</sup>	5,77 g/cm <sup>3</sup>
5	Hardness	37 HRB	3,9HB
6	Yield Strength	68.95 Mpa	
7	Modulus Young	118.6 Gpa	49,9GPa

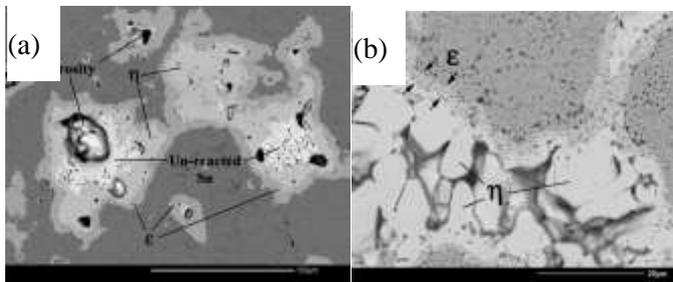
Timah (Sn) merupakan logam berwarna putih keperakan yang dapat ditempa. Timah agak sedikit ulet dan memiliki struktur yang sangat kristalin. Ketika dipanaskan di udara





Komposit Cu-Sn merupakan komposit yang terdiri atas campuran logam Cu (tembaga) dan Sn (Timah). Susunan dua logam dalam komposit ini disebut Metal Matriks Komposit (MMCs). Susunan dua logam ini biasa disebut sebagai perunggu. Karakteristik yang ingin dicapai sangat dipengaruhi oleh struktur mikro, khususnya porositas terbuka (Bondan, 1996). Material ini memiliki beberapa keuntungan seperti ketahanan aus, ketahanan korosi, dan ekspansi termal yang rendah (Liao Xiang, 2012).

Proses pembentukan komposit ini menggunakan metode metalurgi serbuk (Banovic, 2008). Komposit ini diproduksi melalui metode konvensional seperti *sintering* yang akan membentuk fase *liquid* yang memiliki beberapa kerugian seperti tingginya derajat *liquiation* pada paduan tembaga dan timah. Fase liquid inilah yang menyebabkan porositas pada perunggu (Acharya, 1999). Komposit ini menghasilkan lapisan – lapisan intermetallik seperti yang tertera pada Gambar 2.2.



**Gambar 2. 2** Struktur mikro dari komposit Cu-Sn (a) tanpa etsa (b) sampel etsa (Banovic, 2007)

Untuk mendukung data eksperimen yang didapat, maka perlu untuk mendapatkan data teoritis dari komposit. Untuk mendapatkan densitas dari komposit bisa menggunakan *Rule of Mixture* dengan persamaan sebagai berikut :

$$\rho_c = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f \quad (2.1)$$

Dimana:

$$\rho_c = \text{densitas komposit}$$



$$\begin{aligned}
 \rho_m &= \text{densitas matriks} \\
 \rho_f &= \text{densitas penguat} \\
 V_m &= \text{fraksi volume matriks} \\
 V_f &= \text{fraksi volume penguat} \\
 \rho &= \frac{m}{v} \quad (2.2)
 \end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned}
 \rho &= \text{densitas} \\
 m &= \text{massa} \\
 v &= \text{volum}
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan rumus densitas (2.2) maka akan diperoleh fraksi massa.

Dengan perumusan berikut,

$$m_m = a \cdot m_c \text{ dan } m_f = b \cdot m_c \quad (2.3)$$

Dimana :

$$\begin{aligned}
 m_m &= \text{massa matrik} \\
 m_f &= \text{massa penguat} \\
 m_c &= \text{massa komposit} \\
 a &= \text{fraksi massa matrik} \\
 b &= \text{fraksi massa penguat}
 \end{aligned}$$

Data teoritis dari massa setiap fraksi (matriks atau reinforced) dapat dicari menggunakan persamaan berikut :

- Massa matriks

$$m_m = a \cdot \frac{\rho_m \cdot \rho_f}{a \cdot \rho_f + b \cdot \rho_m} \cdot v_c \quad (2.4)$$

- Massa *reinforced*

$$m_f = b \cdot \frac{\rho_m \cdot \rho_f}{a \cdot \rho_f + b \cdot \rho_m} \cdot v_c \quad (2.5)$$

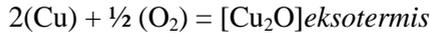
Dimana :  $v_c$  = volume komposit

### 2.2.2 Oksidasi Cu dan Sn

Terapat dua jenis oksidasi dalam serbuk tembaga yaitu  $\text{Cu}_2\text{O}$  dan  $\text{CuO}$ . Pada temperatur tinggi, oksidasi terjadi secara parabolik, dimana ketebalan lapisan film bertambah dengan akar

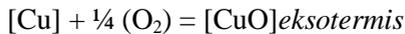


pangkat dua dari waktu. Pada temperatur rendah, oksidasi terjadi secara linier, logaritma dan kubus. Reaksi oksidasi tembaga terjadi pada reaksi berikut :



$$\Delta G = -41,166 - 1,27 \times 10^{-3} T \ln T + 3,7 \times 10^{-3} T^2 - 1,8 \times 10^{-7} T^3 + 27,881 T \quad (2.6)$$

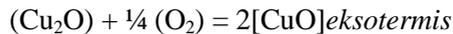
Dimana  $\Delta G$  merupakan energi bebas dengan satuan kalori/gram.mol, T adalah absolut temperatur dengan satuan Kelvin, R merupakan konstanta gas. Dalam logaritma natural :



$$\Delta G = -37,353 - 0,16 T \ln T + 1,69 \times 10^{-3} T^2 - 9 \times 10^{-8} T^3 + 25,082 \quad (2.7)$$

$$\Delta H = -38,170 + 1,3 T + 0,99 \times 10^{-3} T^2 + 0,57 \times 10^{-5} T^{-1} \quad (2.8)$$

Dimana  $\Delta H$  adalah panas dengan satuan kalori/gram/mol;



$$\Delta G = 33,550 - 0,95 T \ln T - 3,75 \times 10^{-3} T^2 + 22,340 T \quad (2.9)$$

$$\Delta H = -33,710 + 3,28 T - 0,4 \times 10^{-3} T^2 - 0,20 \times 10^5 T^{-1} \quad (2.10)$$

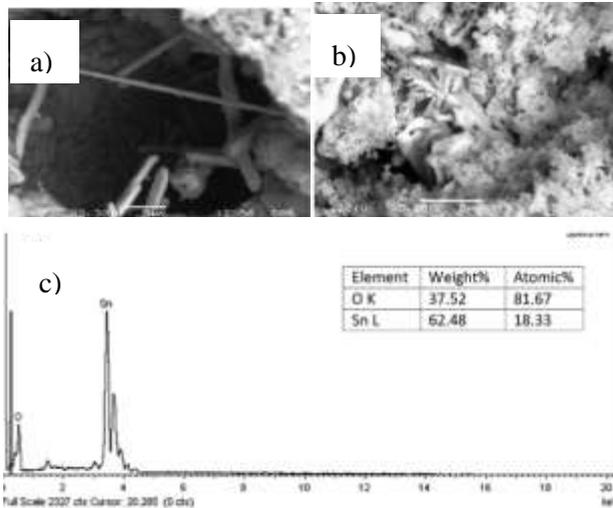
Oksidasi dari serbuk tembaga dalam kondisi komersial biasanya terjadi pada temperatur diatas 650°C. Oksidasi dalam rotari kiln menghasilkan laju oksidasi yang tinggi sebagai hasil dari meningkatnya kontak antara serbuk dan gas oksidasi. Akan tetapi, oksidasi yang kuat disebabkan oleh alam. Operasi ini sangat sulit dikontrol daripada pembakaran dalam *conveyer furnace*. Kedua oksida tembaga (Cu<sub>2</sub>O dan CuO) sangat bersifat getas dan mudah untuk ditumbuk atau digiling untuk mendapatkan ukuran partikel dibawah 150µm dan bersifat poros (Oleg D. Neikov,2009).

Timah akan teroksidasi menjadi tin oksida (SnO<sub>2</sub>). Oksidasi timah terjadi pada temperatur 1000°C selama 1 jam. Hal

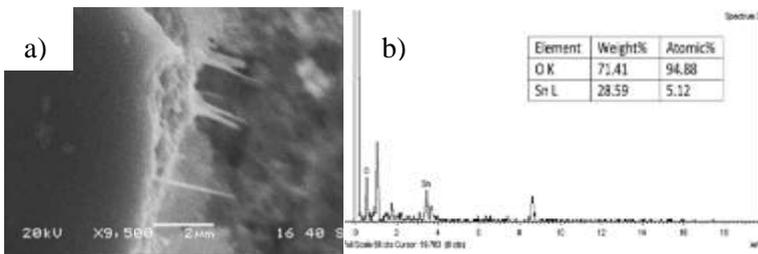


ini ditunjukkan pada susunan batangan timah oksida dan struktur nano. Titik leleh timah adalah  $232^{\circ}\text{C}$  dimana memiliki titik didih sebesar  $2603^{\circ}\text{C}$ . Pada temperatur  $1000^{\circ}\text{C}$ , Sn leleh secara sempurna. Akan tetapi, ini akan menjadi *liquid state* sebagai uap pada temperatur yang lebih tinggi. Pada Gambar 2.3 menunjukkan batangan  $\text{SnO}_2$  yang terbentuk dari pemanasan furnace pada temperatur  $1000^{\circ}\text{C}$  selama satu jam di udara. Batangan  $\text{SnO}_2$  ini ditemukan sangat panjang dengan ukuran 30 – 40  $\mu\text{m}$ .

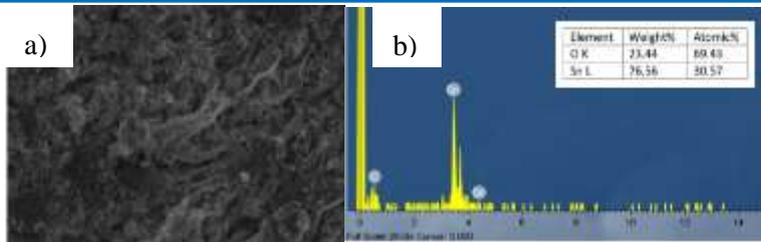
Pada Gambar 2.3 (c), terlihat bahwa persent atom oksigen sangat tinggi. Tin oksida tidak terbentuk secara stokiometrik. Struktur oksida timah ini ditemukan dalam bentuk batangan triangular. Meskipun pada temperatur  $1000^{\circ}\text{C}$  dan waktu tahan selama 1 jam, struktur oksida timah sangatlah rendah. Akan tetapi, oksida timah akan terlihat pada ukuran  $2\mu\text{m}$  dan memiliki persen atom yang tinggi yaitu 94,88% (Manas kumar, 2013). Tidak hanya itu, oksida juga terjadi pada temperatur yang sama dan waktu tahan selama 2 jam. Akan tetapi, pada waktu tahan tersebut, persen atom oksigen semakin berkurang menjadi 69,43%.



**Gambar 2. 3** (a,b)Gambar SEM dari oksidasi Sn di udara pada  $T=1000^{\circ}\text{C}$  selama 1 jam (c) Spectrum EDX dan nilai tiap elemen pada struktur oksida timah (Manas Kumar, 2013)



**Gambar 2. 4** (a) Gambar SEM dari oksida timah dengan pada  $T=1000^{\circ}\text{C}$  dengan waktu tahan 1 jam (b)Spectrum EDX (Manas Kumar, 2013)



**Gambar 2. 5** (a) Gambar SEM dari oksida timah dengan pada  $T=1000^{\circ}\text{C}$  dengan waktu tahan 2 jam (b)Spectrum EDX (Manas Kumar, 2013)

### 2.3. Metalurgi Serbuk

Metalurgi serbuk adalah teknik pembentukan material dalam keadaan padat, di mana bahan material dibuat dari serbuk dengan partikel yang halus. Proses pembentukan adalah bahan serbuk dimasukkan ke dalam cetakan kemudian dilakukan kompaksi. Setelah dilakukan kompaksi, serbuk membentuk *green body* yang sesuai dengan bentuk cetakan yang diinginkan. *Green body* tersebut kemudian diberi perlakuan sintering. Tujuannya adalah agar terjadi proses difusi antar partikel serbuk sehingga partikel akan menyatu dan terbentuk logam yang padat. Proses metalurgi serbuk biasanya akan menimbulkan porositas, hal tersebut berpengaruh pada berat jenisnya (Rusianto, 2005).

#### 2.3.1. Perhitungan Porositas

Salah satu metode dalam pembuatan material berpori adalah metalurgi serbuk (P.S. Liu, 2002). Proses metalurgi serbuk ini dipersiapkan dengan melakukan pencampuran serbuk, pencetakan dan sintering (P.S. Liu, 2014). Porositas didefinisikan sebagai rasio dari volume pori ke seluruh nominal volume tubuh berpori, dan umumnya dinyatakan sebagai salah persentase atau desimal (P.S. Liu, 2005). Ini adalah parameter dasar untuk material berpori dan faktor kunci dalam menentukan sifat fisik dan mekanik. Sifat dari material berpori sangat tergantung pada porositas jika dibandingkan dengan faktor lain (Gibson, 1999).



Berdasarkan definisi, porositas dapat dihitung dengan

$$\theta = \left(\frac{V_p}{V_t}\right) \times 100\% = \left(\frac{V_p}{V_s + V_p}\right) \times 100\% \quad (2.11)$$

Di mana  $V_p$  adalah volume pori ( $\text{cm}^3$ ),  $V_t$  adalah volume total dari volume badan pori dan volume padatan.

Perbandingan konsep dari porositas adalah “*relative density*,” yang diekspresikan sebagai perbandingan densitas nominal dengan densitas padatan:

$$\rho_r = \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \times 100\% \quad (2.12)$$

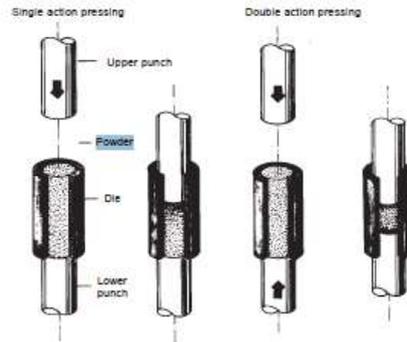
Di mana  $\rho_r$  densitas relatif (tanpa dimensi),  $\rho^*$  densitas nominal dari badan pori ( $\text{g/cm}^3$ ), dan  $\rho_s$  adalah densitas padatan badan pori ( $\text{g/cm}^3$ ). Berikut adalah hubungan antara porositas  $\theta$  dan densitas relatif  $\rho_r$ , densitas nominal  $\rho^*$  dan densitas padatan  $\rho_s$ :

$$\theta = (1 - \rho_r) \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \times 100\% \quad (2.13)$$

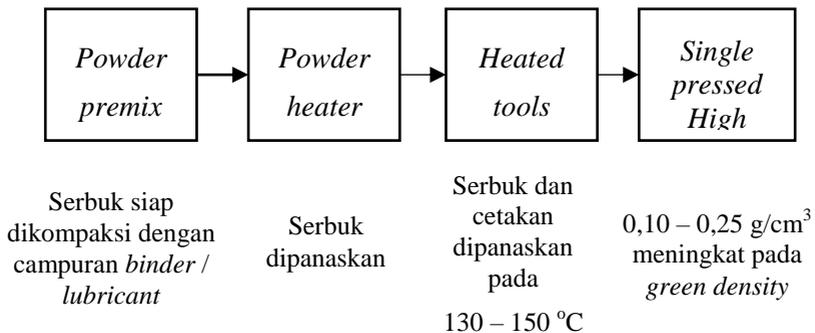
### 2.3.2. Warm Compaction

Kompaksi adalah suatu proses pembentukan atau pemampatan terhadap serbuk murni, komposit atau campuran dari berbagai jenis serbuk sehingga mempunyai bentuk tertentu dan mempunyai kekutan yang cukup untuk mengalami proses selanjutnya. Kompaksi dari serbuk metal memiliki beberapa fungsi yaitu :

1. untuk memadatkan serbuk ke bentuk yang diinginkan;
2. untuk memberikan bentuk dengan pertimbangan yang diinginkan karena setiap perubahan dimensi yang dihasilkan dari sintering;
3. untuk memberikan bentuk dan jenis porositas yang diinginkan;
4. untuk memberikan kekuatan yang memadai untuk penanganan selanjutnya (Upadhyaya, 2002)



**Gambar 2. 6** Single dan double action compaction (Upadhyaya, 2002)



**Gambar 2. 7** Ilustrasi proses Warm compaction (Francis, 1998)

Kompaksi dapat dilakukan melalui penekanan dingin (*cold compaction*) dan penekanan panas (*warm or hot compaction*) baik dengan penekanan satu arah (*single end compaction*) ataupun penekanan dua arah (*double end compaction*) (Upadhyaya, 2002). Pada penekanan satu arah, penekan bagian atas bergerak ke bawah, sedangkan pada penekanan dua arah terdapat dua penekan, yaitu penekan atas dan penekan bawah yang bergerak secara bersamaan dengan arah berlawanan.



Dalam penambahan densitas, terdapat beberapa proses yaitu *forging*, *double press/double sinter* (DP/DS) dan infiltrasi tembaga (Cu) (Ngai, 2007). Namun dikarenakan metode – metode tersebut menggunakan proses sekunder, maka kita akan menjumpai kelebihan biaya. Sehingga terdapat proses yang merupakan teknik untuk mendapatkan densitas seperti DP/DS dan properti mekanik yang baik dalam satu proses kompaksi (Francis, 1998). Dalam proses ini menggunakan pemanasan terhadap serbuk dan alat yang digunakan dalam proses kompaksi secara umumnya untuk mendapatkan densitas yang tinggi.

Howard Rutz dan Francis Hanejko menuliskan bahwa kompaksi yang diberikan perilaku panas menaikkan densitas suatu material (Howard, 1997). Penelitian yang dilakukan adalah membandingkan *warm compaction* dan *forging* pada produksi turbin. Hasil penelitian tersebut adalah meningkatkan densitas turbin dari  $6,6 - 7,1 \text{ g/cm}^3$  menjadi  $7,06 - 7,32 \text{ g/cm}^3$ . Hal ini tidak hanya berpengaruh pada densitas turbin, tetapi juga berpengaruh terhadap *tensile strength*, *impact strength*, dan sifat mekanik lainnya (Howard Rutz, 1997). Sehingga sesuai dengan teori bahwa material akan memiliki kombinasi yang unik dalam kekuatan dan sifat lainnya ketika diberikan perlakuan panas (Cimino, 1995).

Temperatur di atas temperatur ruang dan di bawah area tempa telah digunakan pada baja menuju muatan tempa yang rendah dan meminimalisir distorsi. Memanaskan serbuk sebelum dikompaksi akan menjadi sesuatu yang menarik jika dibandingkan dengan serbuk tanpa dipanaskan (Bocchini, 1998). Pada Gambar 2.7 merupakan ilustrasi dari proses *warm compaction*. Pada setiap kenaikan  $100^\circ\text{C}$  pada temperatur kompaksi, menghasilkan  $0,08 \text{ g/cm}^3$  meningkat pada *green density* (Chagnon, 1995).

*Green density* dapat dicapai melalui teknik metalurgi serbuk bergantung jumlah dan tipe dari zat aditif. Untuk

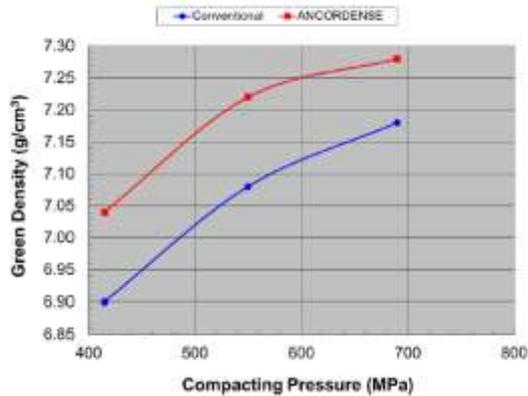


menghitung kepadatan hijau dan sinter maksimum dicapai, hal ini berguna untuk meninjau konsep kepadatan pori-bebas (PFD). Density pori-bebas didefinisikan sebagai densitas kompak hijau di mana semua porositas interparticle dihilangkan. PFD ini dapat ia dihitung dari kepadatan tertentu dan persentase masing-masing aditif dalam premix ini. Perhitungan PFD diberikan sebagai berikut:

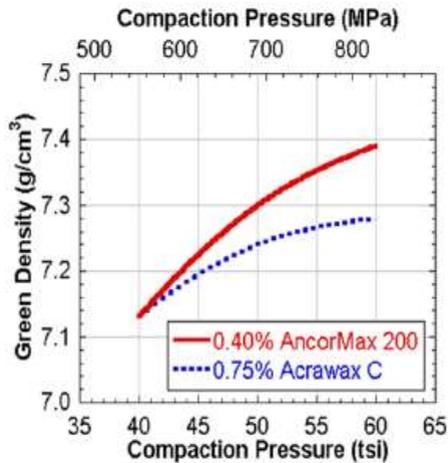
$$PFD = 1 / [\sum(\% \text{element in premix} / \text{specific gravity of additive})] \quad (2.14)$$

Telah dijelaskan bahwa *hot compaction* atau *warm compaction* memiliki ilustrasi pada Gambar 2.9 yang mana memiliki proses pemanasan untuk serbuk, muncul penelitian baru dengan tidak perlu melakukan pemanasan terhadap serbuk dan hanya memanaskan cetakan saja. Metode ini disebut juga dengan *hot/warm die compaction* (Hanejko, 2007). Metode ini bertujuan untuk mendapatkan *green density* yang tinggi pada tingkat yang sama seperti yang diperoleh saat menggunakan *lubricant* yang berbeda (Hanejko, 2006).

Brian James, 2007, melakukan penelitian mengenai perbedaan kompaksi konvensional dengan *warm compaction* dan *warm die compaction*. Pada *warm compaction*, serbuk dan peralatan kompaksi diberi perlakuan panas dengan rentang temperatur 120°C – 145°C. Alat yang digunakan sebagai *warm compaction* adalah ANCORDENSE ®. Sedangkan *warm die compaction* tidak perlu memanaskan serbuk dan hanya perlu memanaskan peralatan kompaksi serta menggunakan sistem AcraWax C. Gambar 2.8 dan 2.9 menunjukkan perbedaan nilai *green density* antara konvensional kompaksi dengan *warm* dan *warm die compaction*.



**Gambar 2. 8** Perbedaan green densitas kompaksi konvensional dengan warm compaction (Hanejko, 2007)



**Gambar 2. 9** Perbedaan *green* densitas kompaksi konvensional (AncorMax 200) dengan warm die compaction (Acrawax C) (Hanejko, 2007)



Sebagai hasil dari *hot compaction*, terdapat pengurangan volume pada bahan awal dan penambahan densitas bersamaan dengan kepadatan partikel serbuk. Parameter yang digunakan pada *hot compaction* meliputi : temperatur, tekanan, unit pukulan dan durasi tekanan (Wojtaszek M, 2001).

Terdapat perbedaan teknologi dalam proses seperti *cold*, *warm* atau *hot working*. Contoh, perbandingan antara produk *cold* dengan *hot*, secara umum memiliki akurasi yang kurang karena tidak meratanya ekspansi termal dan kontraksi selama proses serta kekasaran permukaan karena lapisan oksida yang dihasilkan dari pemanasan. Hal penting lainnya dalam karakterisasi manufaktur seperti pembentukan, *machinabilit*, dan *weldability* sangat dipengaruhi oleh *cold*, *warm* dan *hot working* dengan variasi temperatur (Serope, 1991).

Ketika deformasi plastis terjadi pada temperatur ruang, maka hal ini disebut dengan *cold working* dan ketika bekerja diatas temperatur rekristalisasi, maka disebut dengan *hot working*. Sehingga pemahaman tentang *warm working* adalah bekerja pada temperatur diatas temperatur ruang dan dibawah temperatur rekristalisasi. Rentang temperatur diberikan pada Tabel 2.3:

**Tabel 2. 3** Rentang Temperatur Homolog untuk Bermacam Proses (Serope, 1991)

Proses	T/T <sub>m</sub>
<i>Cold woking</i>	<0.3
<i>Warm working</i>	0.3 – 0.5
<i>Hot working</i>	>0.6

$T$  merupakan temperatur kerja,  $T_m$  adalah titik lebur pada material. Meskipun tanpa satuan dimensi, rasio tersebut diketahui sebagai temperatur *homologous*.



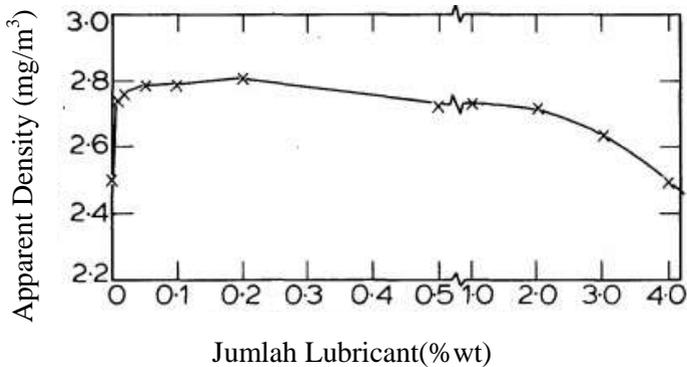
### 2.3.3. Lubricant

Dalam pengerjaan metalurgi serbuk, untuk mengurangi gaya gesek antar partikel ketika kompaksi, maka diperlukan pelumas untuk mengurangi gaya gesek yang terjadi pada serbuk. Pelumas ini berupa serbuk yang biasanya dicampurkan dalam serbuk logam pada langkah terakhir sebelum penekanan. Serbuk pelumas ini biasanya terdiri dari serbuk stearat berbasis Al, Zn, Li, Mg, atau Ca. ukuran pelumas yang biasanya dipakai rata-rata  $30\mu\text{m}$  dan pemakaiannya tidak boleh lebih dari 2%. Pelumas ini umumnya memiliki titik leleh yang rendah. Sifat – Sifat dari beberapa pelumas metalurgi serbuk seperti ditampilkan pada Tabel 2.4 (German,1984).

**Tabel 2. 4** Sifat dari Beberapa Pelumas yang Umum Dipakai dalam Metalurgi Serbuk (German,1984)

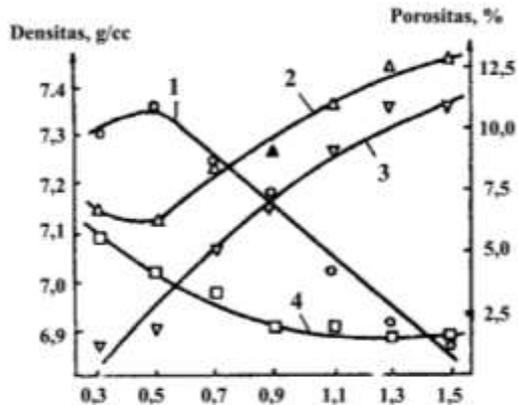
Nama Umum	Temp. Pelunakan ( $^{\circ}\text{C}$ )	Temp. leleh ( $^{\circ}\text{C}$ )	Densitas ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
Zinc stearate	100-120	130	1.09
Calcium stearate	115-120	160	1.03
Lithium Stearate	195-200	220	1.01

Pengaruh penambahan pelumas terhadap sifat mekanik hasil metalurgi serbuk bervariasi. Dengan penambahan pelumas (*Lithium Stearate*) maka terjadi penurunan *apparent density* akibat volume yang sama diisi oleh lithium stearate yang memiliki massa jenis rendah. hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Ward (1979) dengan meningkatnya *zinc stearate* maka terjadi penurunan *apparent density* dari hasil metalurgi serbuk seperti pada Gambar 2.10.



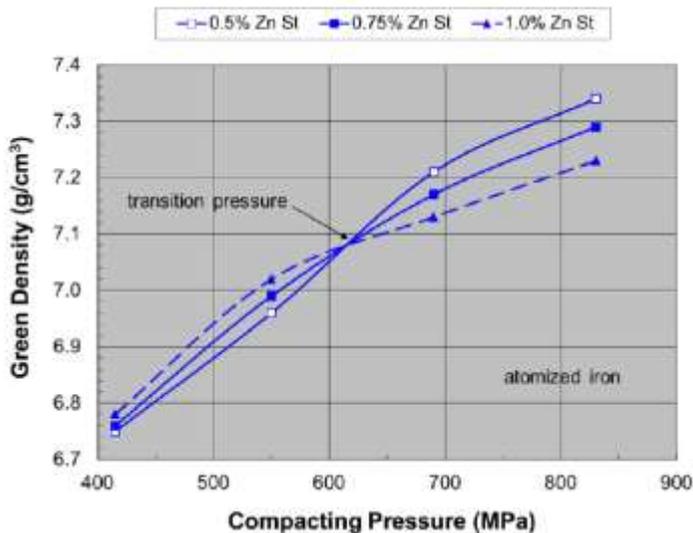
**Gambar 2. 10** Pengaruh Jumlah Pelumas Terhadap Apparent Density (Ward, 1979)

Densitas dan porositas mempunyai hubungan yang berbanding terbalik. Semakin besar densitas komposit maka semakin kecil porositas yang terjadi pada komposit. Ketika komposit mencapai *full density*, maka komposit tersebut tidak mempunyai porositas lagi (Fany, 2015). Beberapa faktor yang mempengaruhi densitas dan porositas dari suatu komposit. Diantaranya adalah partikel size, temperatur pemanasan, dan pelumas. Kontribusi pelumas terhadap porositas terjadi karena adanya gas hasil penguapan pelumas yang terperangkap didalam material ketika dipanaskan. Sehingga gas yang terperangkap tersebut akan membentuk lubang-lubang yang tidak terisi oleh material dan menjadi porositas (Ibrahim,2009).



**Gambar 2. 11** Pengaruh Zinc stearate terhadap (1) densitas, (2) Total Porosity, (3) Open Porosity, dan (4) Closed Porosity (Gaidarov,1988)

Pelumas *Zinc stearate* juga bisa menjadi agen pembentuk porositas dan menurunkan densitas seperti yang dilakukan oleh Gaidarov (1988), pengaruh ini ditunjukkan dengan Gambar 2.11. Pada tekanan kompaksi yang rendah dan tingginya persentasi *lubricant* akan memungkinkan mendapatkan densitas yang tinggi. Sebagai tekanan kompaksi yang meningkat, transisi tekanan akan tercapai dimana penambahan *lubricant* akan menghambat proses pepadatan dan mencegah tingginya *green density* (Brian James, 2007).



**Gambar 2. 12** Efek penambahan lubricant pada proses penekanan  
(Brian James, 2007)

## 2.4. Difusi

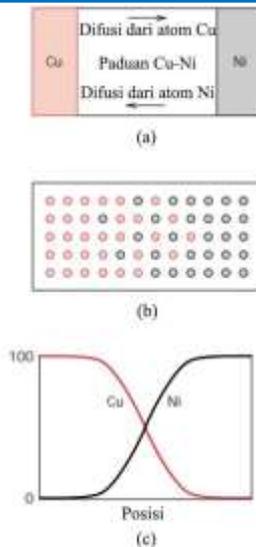
Difusi adalah fenomena dari perpindahan material dalam skala atomik. Dalam percobaan menempelkan dua logam Cu dan Ni dan dipanaskan dibawah temperatur melting kedua logam dalam beberapa waktu, diketahui terjadi perpindahan massa tembaga ke dalam atom nikel. Dimana hasil yang terjadi adalah bagian dari tembaga, bagian dari nikel, dan bagian paduan tembaga-nikel. Proses berpindahnya atom tembaga kedalam atom nikel ini dinamakan *interdiffusion* (Callister, 2001). Secara umum percepatan difusi sebanding dengan gradient konsentrasi. Diterangkan pada hukum fick's yang dillustrasikan pada Gambar 2.13 tersebut dengan plat baja kontak langsung dengan gas hidrogen pada tekana yang sama dimana pada keadaan equilibrium konsentrasi hidrogen larut pada baja adalah tetap dan merata pada seluruh plat. Pada keadaan  $t = 0$



bagian atas plat mengalami tekanan gas hidrogen yang lebih tinggi sehingga baja memperoleh konsentrasi hidrogen pada permukaannya. Hidrogen berdifusi ke dalam padatan hingga keadaan stabil  $x = 0$  tercapai pada batas kandungan massa hidrogen didalam baja untuk mempertahankan perbedaan konsentrasi diseluruh bagian plat. Apabila konsentrasi pada komponen diberikan unit massa kemudian persamaan untuk difusi dapat ditulis sebagai berikut:

$$W_{Ax} = -D_A \left( \frac{\partial \rho_A}{\partial x} \right) \quad (2.10)$$

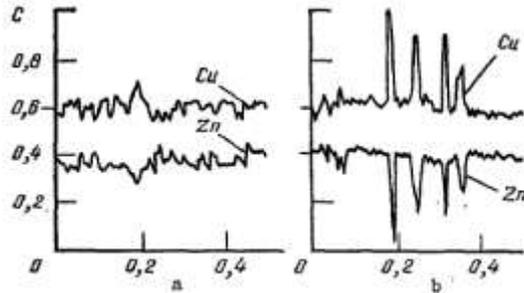
Dimana  $W_{Ax}$  = aliran massa komponen pada bidang  $x$  ( $\text{g/cm}^2\text{sec}$ );  $\rho_A$  = konsentrasi massa komponen ( $\text{g/cm}^3$ ) dan  $D_A$  = koefisien difusi atau diffusivity ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ ). Difusi pada material padat terdapat mekanisme *self diffusion* yang terjadi tanpa pengaruh energy dan kimia dari luar. Pada logam murni atom tidak tetap pada satu tempat namun berpindah-pindah. Apabila dilihat dari atom itu sendiri, atom bergetar disekitar daerah *lattice* kristal. Pada logam mekanisme difusi terbagi menjadi 3 cara, yaitu mekanisme *vacancy*, mekanisme *ring* dan mekanisme *interstitialcy*. Mekanisme *vacancy* terjadi dimana atom yang terdekat pada *vacancy* berpindah ke daerah *vacancy*. Terjadinya mekanisme ini memerlukan distorsi pada struktur Kristal yang membutuhkan energy. Namun kebutuhan akan energy tersebut tidak menjadi pengahalang. Mekanisme *Ring* terjadi pada tiga atom yang berindah secara berotasi metode ini dinanggap lebih masuk akal karena rendahnya *strain energy* yang dibutuhkan dibanding dua atom yang berpindah namun bukti langsung tentang mekanisme ini tidak banyak. Mekanisme *interstitialcy* terjadi akibat penambahan konsentrasi telarut pada daerah *interstitial* pelarut. Atom terlarut mendorong atom pelarut untuk keluar dari posisi Kristal normalnya hingga ke daerah *interstitial*. Gerakan akan terus terjadi pada atom berikutnya akibat atom *interstitial* lebih besar mendorong atom berikutnya dalam reaksi berantai (Geiger, 1973).



**Gambar 2. 13** (a) Zona difusi dari Cu-Ni (b) Representasi dari difusi dari atom Cu (berwarna) dan Ni (abu-abu) (c) Profil konsentrasi Cu-Ni dengan fungsi posisi.(Callister, 2001)

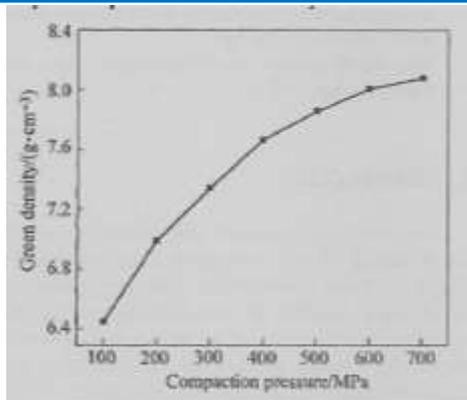
## 2.5. Penelitian Sebelumnya

Penelitian *warm compaction* dilakukan pertama kali oleh Kruzhanov dan Garbovitskaya pada tahun 1992 dengan material Cu-Zn serta menggunakan temperatur 650 – 700°C dan tekanan 120 – 150 MPa dengan waktu tahan kompaksi adalah 2 – 5 menit. Kruzhanov menggunakan *X-ray microanalysis* pada tembaga dan seng pada temperatur 500°C menunjukkan bahwa material tersebut heterogen.

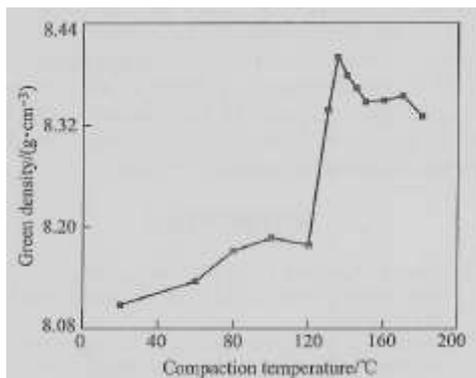


**Gambar 2. 14** Distribusi komponen kompaksi serbuk pada (a) 650°C ;  
(b) 500°C (Kruzhanov,1992)

Ngai Tungwai Leo (2005) melakukan penelitian dengan memberikan temperatur pada serbuk tembaga saat melakukan kompaksi. Ngai (2005) menggunakan tekanan kompaksi berkisar 100 – 700 MPa dan temperatur kompaksi dari temperatur kamar hingga 200°C. densitas hijau maksimum didapatkan oleh tekanan 700 MPa seperti yang terlihat pada Gambar 2.15. Untuk hubungan antara densitas kompaksi dan temperatur kompaksi dapat dilihat pada Gambar 2.16.



**Gambar 2. 15** Hubungan antara densitas kompaksi dengan tekanan pada temperatur kamar (Ngai, 2005)

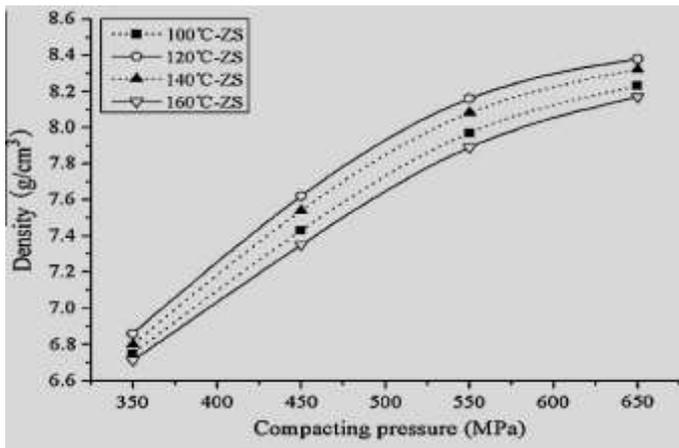


**Gambar 2. 16** Hubungan antara temperatur kompaksi dengan densitas kompaksi (Ngai, 2005)

Feng (2012) melakukan penelitian hot kompaksi yang menggunakan penambahan variasi Zinc stearate dan temperatur kompaksi terhadap proses kompaksi yang ditambahkan temperatur dari komposit berbasis Cu. Feng menggunakan serbuk Cu-Re dan dengan penambahan Zinc stearate dengan kadar 0,4, 0,5, 0,6, 0,7wt% selanjutnya dimixing dalam ball mill selama 30 menit. Serbuk dan dies kemudian dipanaskan bersama dengan



variasi temperatur kompaksi 100, 120, 140, 160°C lalu dikompaksi dengan variasi tekanan kompaksi 350, 450, 550, dan 650 MPa. Feng juga mendapatkan bahwa semakin tinggi tekanan kompaksi yang diberikan maka akan semakin tinggi densitas yang dihasilkan. Hasil densitas yang paling optimum pada temperatur kompaksi 120°C dan tekanan 650 MPa sesuai dengan Gambar 2.17.



**Gambar 2. 17** Efek temperatur terhadap densitas sebagai fungsi tekanan kompaksi (Feng,2012)



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



### BAB III METODE PENELITIAN

#### 3.1. Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah serbuk Cu sebagai *matrix* dan serbuk Sn sebagai *reinforced*.

##### 1. Serbuk Cu

Serbuk Cu dengan kemurnian 99% produk Merck dengan spesifikasi sebagai berikut:

Ar	: 63,55 g/mol
Densitas	: 8,96 g/cm <sup>3</sup>
Temperatur <i>melting</i>	: 1083°C
Ukuran serbuk	: < 63 μm



Gambar 3. 1 Serbuk Tembaga

##### 2. Serbuk Sn

Serbuk Sn dengan kemurnian 99,8% produk Sigma Aldrich dengan spesifikasi sebagai berikut:

Ar	: 118,71 g/mol
Densitas	: 7,3 g/cm <sup>3</sup>
Temperatur <i>melting</i>	: 232°C
Ukuran serbuk	: <45 μm



Gambar 3. 2 Serbuk Timah

### 3. Pelumas

Pelumas digunakan untuk mengurangi gesekan yang terjadi antar serbuk maupun antara serbuk dengan dinding *dies* cetakan saat dilakukan kompaksi. Pelumas yang digunakan adalah *Zinc Stearat* produk Sigma-Aldrich dengan spesifikasi sebagai berikut:

Densitas :  $1,09 \text{ g/cm}^3$

Temperatur *melting* :  $130^\circ\text{C}$



Gambar 3. 3 Zink Stearat

### 4. Pelarut Polar

Pelarut polar yang digunakan yaitu ethanol karena mudah menguap sehingga mempermudah dalam proses pengeringan serbuk.



### 3.2. Alat

Adapun peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

a) Spatula

Spatula digunakan saat menuangkan serbuk menuju cawan petri untuk ditimbang



Gambar 3. 4 Spatula

b) Beaker glass

Digunakan sebagai wadah untuk mencampurkan serbuk menjadi homogen dalam magnetic stirrer



Gambar 3. 5 Beakier Glass

c) Masker dan Sarung tangan

Digunakan sebagai alat keamanan untuk mengantisipasi pencemaran serbuk.



Gambar 3. 6 Sarung Tangan dan Masker

- d) Dies (cetakan)  
Sebagai cetakan berbentuk silinder dari material *Stainless steel* dan memakai punch AISI 4340 untuk menghasilkan bentuk pellet dengan diameter 10 mm



Gambar 3. 7 Cetakan

- e) Magnetic stirrer dan hot plate  
Digunakan pada saat proses pencampuran serbuk Cu dan Sn.



Gambar 3. 8 Magnetic Stirrer

- f) Alat kompaksi  
Alat kompaksi (Marui & Co.Ltd) dengan kapasitas 20 Ton digunakan pada proses kompaksi dengan menggunakan tekanan 300, 400 dan 500 MPa.



Gambar 3. 9 Alat Kompaksi

- g) Alat pemanas *dies*



Alat ini berfungsi untuk memanaskan *dies*/cetakan dalam proses kompaksi.



Gambar 3. 10 Alat Pemanas Cetakan/*dies*

- h) Timbangan digital  
Timbangan digital (Metler Toledo) untuk menimbang massa serbuk Cu dan Sn serta sampel setelah proses sintering.



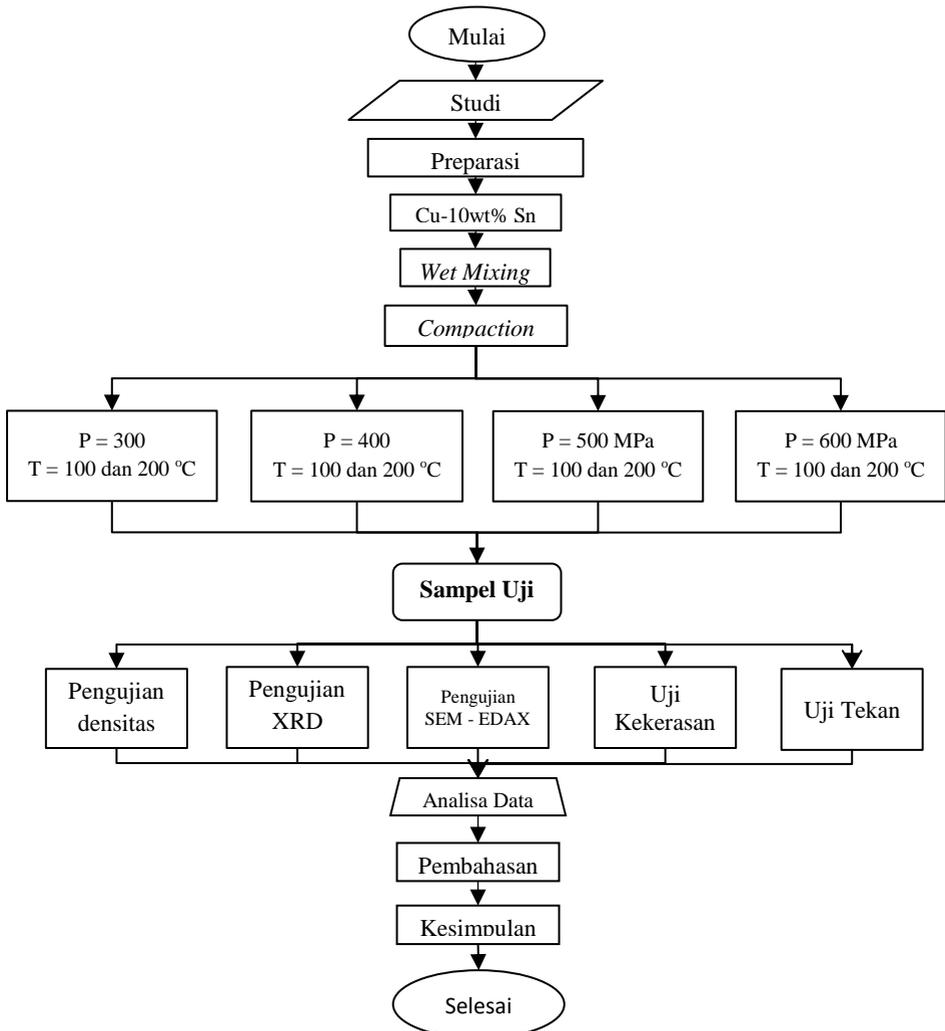
Gambar 3. 11 Neraca Digital



- 
- i) **Alat uji XRD**  
Pengamatan dengan menggunakan alat uji XRD (PANalytical) bertujuan untuk mengidentifikasi fasa yang terbentuk, penentuan komposisi, penentuan struktur kristal, dan lain-lain.
- j) **Alat uji SEM-EDX**  
Alat uji SEM-EDX (Inspect S50) digunakan untuk mengetahui morfologi serbuk Cu dan Sn sebelum dilakukan proses metalurgi serbuk dan sampel komposit Cu – Sn setelah dilakukan proses metalurgi serbuk dengan variasi tekanan kompaksi dan komposisi Sn.



### 3.3. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 12 Diagram Alir Penelitian



### 3.3.1. Preparasi Bahan

Preparasi dilakukan sebelum melakukan proses penelitian dengan tahapan sebagai berikut :

1. Serbuk ditimbang berdasarkan perbandingan berat komposisi Cu-Sn yaitu 9:1 dan massa yang dibutuhkan disesuaikan dengan desain pellet ukuran 1x1cm sehingga massa Cu adalah 6,19 gr dan Sn adalah 0,69 gr. Selain itu, sampel ditambahkan zinc stearat sebanyak 0,5% dari berat Cu-Sn.
2. Pencampuran serbuk dilakukan dengan *wet mixing*. Serbuk diletakkan pada *beaker glass* dan diberikan 10 tetes alkohol dan ditutup menggunakan aluminium foil kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 350 rpm, temperatur 90<sup>0</sup>C selama 30 menit untuk tiap sampel.

### 3.3.2. Proses Penelitian

Proses penelitian adalah sebagai berikut :

1. Memasukkan serbuk yang telah homogen ke dalam cetakan/*dies*;
2. Melakukan *hot compaction* dengan variasi tekanan 400 MPa, 500 MPa dan 600 MPa serta variasi temperatur *hot compaction* 100, 150, dan 200 °C sesuai dengan rancangan penelitian;
3. Menghitung massa jenis sampel dengan menggunakan teknik archimedes;
4. Melakukan pengujian XRD dan SEM-EDX untuk mengetahui fasa dan senyawa yang terbentuk dalam sampel kompaksi, morfologi, porositas dan komposisi sampel.



### 3.3.3. Pengujian

#### 1. Pengujian Densitas

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh tekanan terhadap nilai densitas. Tahapan pengujian densitas berdasarkan prinsip Archimedes (Lestari,2008) adalah sebagai berikut:

- a. Menyiapkan sampel untuk di uji nilai densitasnya. Ketika mendapatkan nilai densitas, maka akan mendapatkan nilai porositas;
- b. Menyiapkan neraca digital, baker glass dan benang;
- c. Sampel dipanaskan dengan temperatur 150°C selama 2 jam. Hal ini bertujuan untuk menghilangkan kadar air atau uap air yang terperangkap di dalam sampel;
- d. Menimbang massa kering sampel;
- e. Merendam sampel ke dalam air dengan menggantungkannya dan mempertahankan posisi sampel sehingga sampel terlihat melayang dan dipanaskan dengan temperatur 100°C selama 5 jam;
- f. Lalu mematikan temperatur dan membiarkan sampel terendam selama 24 jam;
- g. Menimbang massa basah, yaitu dengan cara mencelupkan sampel kedalam baker glas yang telah diisi air pada posisi ditengah
- h. Menghitung volume sampel dengan perhitungan sebagai berikut:

$$V=W/D \quad (3.1)$$

Dimana:

V = volume sampel (cm<sup>3</sup>)

W = berat sampel dalam air (gram)

D = densitas air (gram/ cm<sup>3</sup>)



Menghitung densitas sampel dengan rumus sebagai berikut:

$$DB = WD/V \quad (3.2)$$

Dimana:

DB = densitas sampel (gram/cm<sup>3</sup>)

WD = berat kering sampel (gram)

V = volume sampel (cm<sup>3</sup>)

Menghitung porositas sampel hasil percobaan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\% \text{Porositas} = (D \text{ teoritis} - D \text{ percobaan}) / D \text{ teoritis} \quad (3.3)$$

## 2. Pengujian XRD

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan fasa struktur material dan mengetahui fasa yang terbentuk selama proses pembuatan sampel uji. Tujuan dilakukannya pengujian analisis struktur kristal adalah untuk mengetahui perubahan fasa struktur bahan dan mengetahui fasa apa saja yang terbentuk selama proses pembuatan sampel uji. Data yang ditampilkan pada layar komputer berupa grafik dengan puncak pada sudut tertentu. Dari data yang dihasilkan dilakukan analisa kualitatif dengan pencocokan puncak kurva dari data terukur hasil XRD dengan data kartu ICDD.

## 3. Pengujian SEM-EDX

SEM (*Scanning Electron Microscopy*) berfungsi untuk mengetahui struktur mikro sehingga tingkat homogenitas sampel dan daerah *interface* dapat diketahui. Pengamatan dengan SEM memiliki resolusi yang tinggi dari perbesaran 10 sampai dengan 100.000 kali dan kedalaman hingga 3 – 100 nm. Mekanisme pengambilan data pada SEM adalah *electron gun* yang memproduksi *electron beam*, anoda menangkap *electron beam*



yang diarahkan ke sampel kemudian lensa magnetik akan memfokuskan *beam* dan menembakkan ke sampel. *Scanner* membaca struktur permukaan sampel yang selanjutnya menangkap sinyal dari *secondary* dan *back scattered electron* untuk dikirim ke sistem kontrol sehingga dapat dilihat gambarnya pada monitor.

#### 4. Pengujian tekan

Pengujian tekan merupakan pengujian yang dilakukan untuk mendapatkan sifat mekanik, pengujian ini dilakukan sebagai alternatif dari uji tarik. Proses pengujian dilakukan dengan memberikan beban untuk penekanan pada sampel hingga terjadi fracture pada material. Hasil dari pengujian tekan adalah didapatkan grafik tegangan dan regangan material yang diuji. Berdasarkan grafik tersebut dapat didapatkan sifat mekanik meliputi kekuatan tekan dan modulus elastisitas. (ASM Metals Handbook Volume 8 Mechanical Testing and Evaluation, 2000)

Langkah pengujian tekan yang dilakukan sebagai berikut :

- 1) Melakukan preparasi spesimen sehingga permukaan sampel pada bagian atas dan bawah yang mendapatkan kontak dengan punch rata
- 2) Pengukuran dimensi sampel yaitu diameter dan tinggi dengan menggunakan jangka sorong untuk mendapatkan luas permukaan yang dikenai beban.
- 3) Meletakkan sampel pada punch dengan posisi punch atas hampir menyentuh sampel
- 4) Memilih laju beban pada mesin uji kemudian memberikan beban secara kontinu dengan kenaikan beban laju pembebanan tertentu.
- 5) Mengamati defleksi yang terjadi pada sampel.
- 6) Menghentikan pengujian ketika sampel telah terjadi deformasi plastis.



## 5. Pengujian kekerasan

Pada metode Rockwell memiliki beberapa skala pada penggunaannya tergantung pada kombinasi jenis indenter dan besar beban utama yang digunakan. Pada Tabel 3.3 dapat diketahui beberapa skala dengan jenis indenter dan besar beban utamanya. Untuk logam biasanya digunakan skala B atau skala C, dan angka kekerasannya dinyatakan dengan  $R_b$  dan  $R_c$ . Untuk skala B harus digunakan indenter berupa bola baja berdiameter  $1/16''$  dan beban utama 100 kg. Kekerasan yang dapat diukur dengan Rockwell B mencapai RB 100. Kekerasan yang diukur dengan skala B relatif tidak begitu tinggi, untuk mengukur kekerasan logam yang keras digunakan Rockwell C atau Rockwell A. Sedangkan dengan Kekerasan Rockwell F dengan indenter berupa bola baja dengan beban 60 kg. Rockwell F digunakan untuk material yang memiliki kekerasan yang rendah.

Langkah pengujian kekerasan yang dilakukan sebagai berikut :

- 1) Meratakan permukaan sampel yang akan diuji dengan menggunakan grinding menggunakan kertas amplas dengan grid 180, 240, 600, 800, 1000, 1500, dan 2000
- 2) Sampel diletakkan pada holder khusus untuk menjepit sampel uji hardness dengan ukuran kecil
- 3) Pada mesin uji dipilih indenter bola pejal untuk uji kekerasan dengan skala Rockwell F. Kemudian melakukan pengaturan beban yang akan diberikan saat indentasi.



**Tabel 3. 1** Besar Beban Utama dan Jenis Indentor untuk metode Rockwell (ASM vol 8)

<b>Skala</b>	<b>Beban Utama (Kgf)</b>	<b>Indentor</b>	<b>Aplikasi</b>
A	60	<i>Brale</i>	<i>Cemented carbides, thin steel</i>
B	100	1/16" bola	Paduan tembaga, <i>soft steels</i>
C	150	<i>Brale</i>	Baja, <i>hard cast iron</i>
D	100	<i>Brale</i>	<i>Thin steel</i>
F	60	1/16" bola	Besi tuang, Aluminium
G	150	1/16" bola	<i>Malleable iron, phospor bronze</i>



## BAB IV

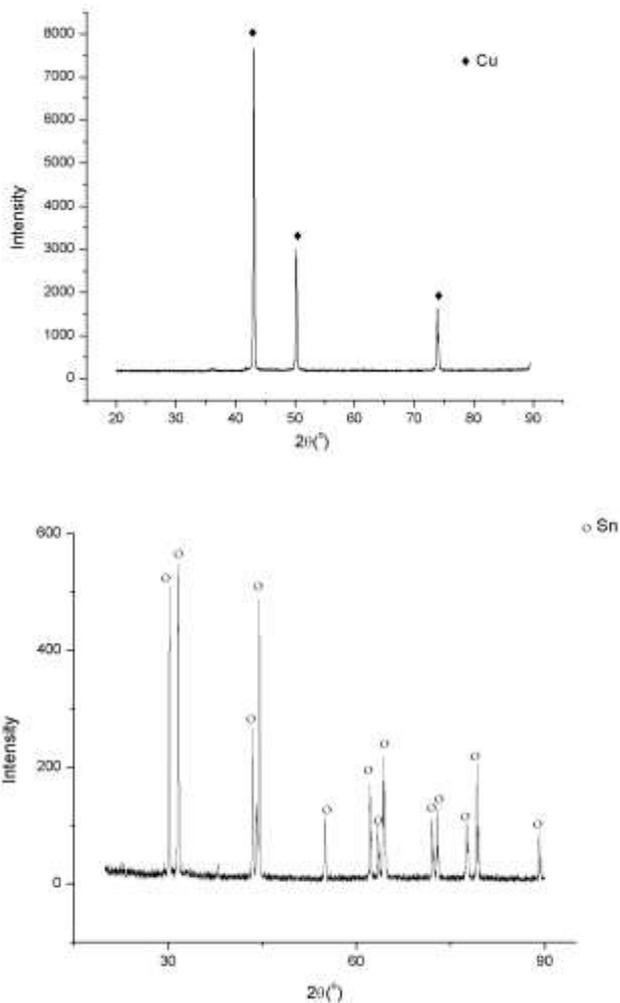
### Analisa Data dan Pembahasan

#### 4.1. Analisa Data

##### 4.1.1. Proses Pembuatan Komposit Cu-Sn

Pembuatan komposit Cu-Sn menggunakan metode metalurgi serbuk dengan jenis kompaksi adalah *hot compaction*. Jenis kompaksi ini bertujuan untuk menghilangkan proses *sintering* dengan menggabungkan proses pemanasan dengan proses kompaksi. Hal ini bertujuan memperbaiki densitas yang dihasilkan oleh proses konvensional atau *cold compaction* (Ngai, 2007).

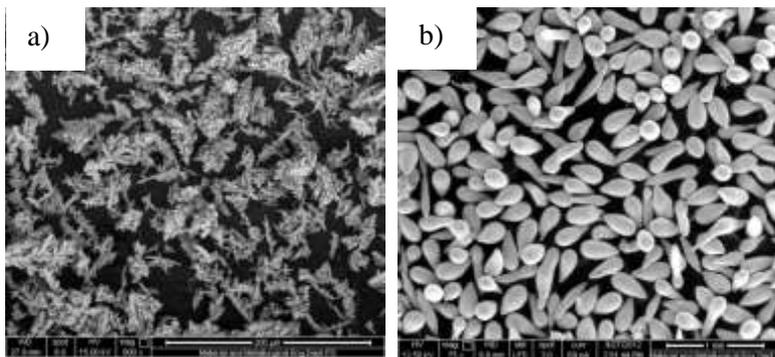
Proses dimulai dengan mencampurkan serbuk tembaga (Cu) sebagai matriks, serbuk timah (Sn) sebagai pengikat atau *binder*, dan zink stearate sebagai *lubricant* (pelumas). Serbuk yang digunakan adalah serbuk dengan kemurnian 99,7%. Kemurnian serbuk ini dapat dilihat dengan grafik XRD pada Gambar 4.1. Selain pengujian XRD untuk melihat kemurnian serbuk, dilakukan pula pengujian SEM untuk mengetahui morfologi dari tiap – tiap serbuk Cu dan Sn yang dapat dilihat pada Gambar 4.2. Bahan dicampurkan dengan menggunakan *hot plate magnetick stirrer*. Pencampuran ini menggunakan metode *wet mixing* yang merupakan metode untuk material yang mudah teroksidasi. *Wet mixing* dilakukan dengan meneteskan pelarut polar, *ethanol*. Pencampuran bertujuan untuk menghomogenkan persebaran serbuk.



**Gambar 4. 1** Hasil XRD serbuk (a) Cu dan (b) Sn

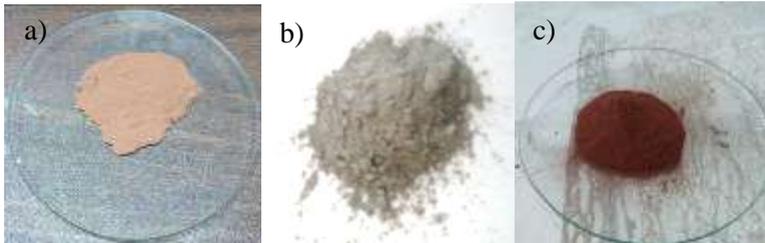


Hasil pengujian XRD ditunjukkan pada Gambar 4.1. Terlihat bahwa baik pada hasil karakterisasi XRD serbuk Cu maupun Sn tidak ditemukan adanya unsur lain (pengotor) sehingga dapat dikategorikan bahwa serbuk yang digunakan pada penelitian kali ini memiliki tingkat kemurnian yang tinggi.



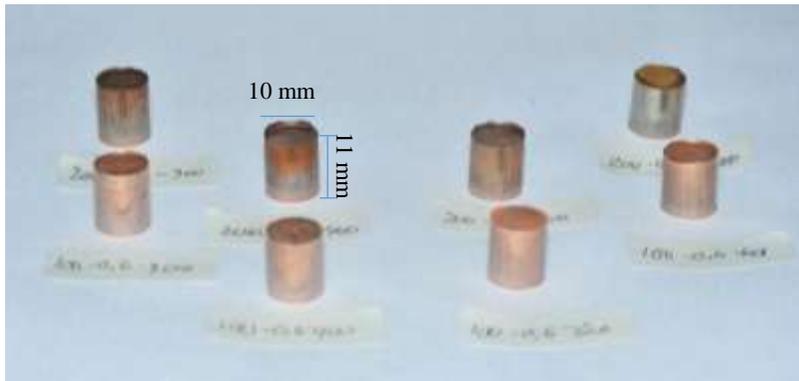
**Gambar 4. 2** Hasil pengujian SEM, a) Serbuk Cu; b) Serbuk Sn

Pada Gambar 4.2 menunjukkan hasil pengujian SEM pada serbuk Cu dan Sn. Terlihat bahwa pada Gambar 4.2a serbuk tembaga memiliki bentuk dendritik. Proses pembuatan serbuk tembaga umumnya menggunakan proses *precipitation liquid*. Hal ini dikarenakan pada metode ini mampu didapatkan tingkat kemurnian yang tinggi yaitu sekitar 99,7 %. Sedangkan pada Gambar 4.2b terlihat bahwa serbuk timah yang digunakan memiliki bentuk tetesan air (*tear drop*). Proses pembuatan serbuk Sn biasanya menggunakan metode atomisasi sentrifugal.



**Gambar 4.3** Serbuk (a) tembaga (Cu), (b) timah (Sn), dan (c) Cu-Sn setelah di *mixing*

Serbuk yang telah homogen dikompaksi dengan menggunakan 4 variasi tekanan yaitu : 300, 400, 500 dan 600 MPa dengan pemberian temperatur yaitu 100 dan 200°C. Serbuk dituang pada dies (cetakan) berdiameter 1 cm. Sebelum menuangkan serbuk, dinding cetakan dalam diberikan *lubricant* atau pelumas berupa *zink stearate*. Hal ini bertujuan untuk menghindari terjadinya *cold welding* pada hasil kompaksi dengan dinding cetakan sehingga ketika proses pengeluaran hasil kompaksi tidak terjadi *crack* pada dinding sampel (Hoganas,2013). Setelah dilakukan proses kompaksi dilakukan proses pengujian meliputi pengujian densitas, SEM, XRD, kekerasan, dan kuat tekan. Untuk sampel pengujian ditampilkan pada Gambar 4.4. Sampel pengujian yang dihasilkan memiliki *tail* yang terjadi karena serbuk masuk diantara dinding cetakan dan *punch* sehingga deformasi plastis yang mengakibatkan masuknya sedikit material kedalam rongga antara dies dan punch atas saat kompaksi dilakukan.



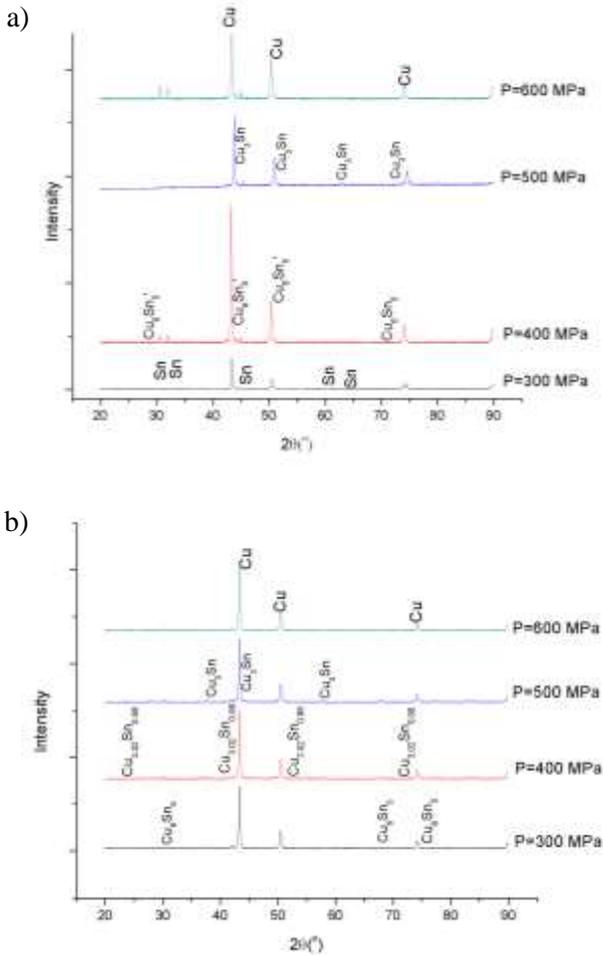
**Gambar 4. 4** Sampel pengujian hasil kompaksi

#### **4.1.2. Karakterisasi Komposit Cu-10%Sn**

Pembuatan komposit Cu-10%Sn telah dilakukan. Setelah dilakukan pembuatan sampel komposit berupa pelet, sampel dilakukan pengujian XRD dan SEM untuk mengetahui karakterisasi dari komposit Cu-10%Sn.

##### **4.1.2.1. Analisa XRD**

Pengujian XRD ini dilakukan pada sampel yang sudah dikompaksi. Hal ini bertujuan untuk menunjukkan kemungkinan terbentuknya fasa dan komposisi yang terbentuk. Gambar 4.5 menunjukkan hasil pengujian XRD dengan perbedaan temperatur.



**Gambar 4.5** Hasil pengujian XRD dengan temperatur (a) 100°C dan (b) 200°C



Berdasarkan analisa XRD yang sudah dilakukan dengan menggunakan software *highscore* yang dicocokkan dengan ICDD PDF. Untuk temperatur 100°C didapatkan senyawa Cu, Sn, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> dan Cu<sub>3</sub>Sn berdasarkan analisis *highscore* dan diperkuat dengan analisis secara manual menggunakan ICDD PDF yang menghasilkan unsur Cu pada ICDD PDF 00-004-0836 dengan 2θ berkisar 43,42 ; 50,42 dan 74,12. Ketiga *peak* tersebut merupakan tiga *peak* utama dari hasil XRD pada temperatur 100°C. Unsur Sn dicocokkan dengan ICDD PDF 00-004-0673 dan ditemukan pada *peak* dengan 2θ antara 30,63 – 32,03; 43,7 – 44,92 dan 55,34 – 65,2. Senyawa lain ditemukan dengan mencocokkan ICDD PDF 01-077-8587 untuk menemukan *peak* dari senyawa Cu<sub>3</sub>Sn dan senyawa Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> dengan ICDD PDF 00-045-1488.

Hasil yang berbeda didapatkan pada temperatur 200°C dengan tidak ditemukannya Unsur Sn. Senyawa yang terbentuk selain senyawa tersebut adalah Cu<sub>3</sub>Sn dan Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> dengan ICDD PDF yang sama dengan ICDD PDF pada temperatur 100°C.

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan antara penambahan tekanan terhadap pembentukan fasa. Akan tetapi, jika mengacu pada unsur Sn (timah), pada temperatur 200°C tidak terdapat sisa unsur Sn. Hal ini karena pada temperatur tersebut mendekati titik leleh dari unsur Sn tersebut. Pada temperatur 100°C hanya terbentuk Cu, Sn, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> dan Cu<sub>3</sub>Sn dengan kadar Sn yang masih relatif banyak seperti yang terlihat pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.6.

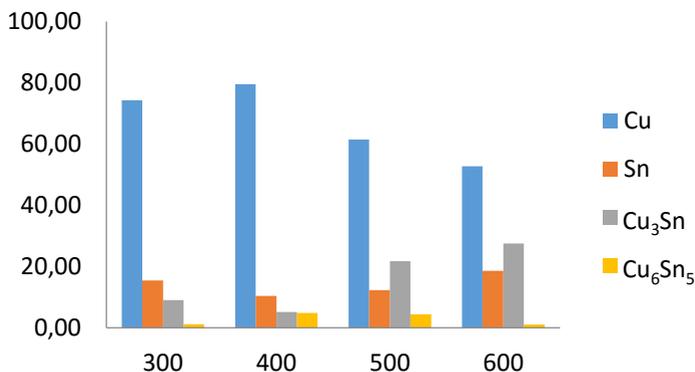
Perhitungan kuantitatif ini menggunakan metode fraksi volume yang didapatkan dari perbandingan antara relatif intensitas fasa yang didapatkan dari hasil pengujian XRD (Nayak,2009). Pada temperatur 100°C belum mencapai titik leleh Sn yaitu 213°C sehingga unsur Sn masih terdapat pada sampel. Namun pada temperatur 200°C, unsur Sn (timah) tidak terdapat



lagi pada perhitungan kuantitatif senyawa. Keadaan ini dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.7.

**Tabel 4. 1** Hubungan antara variasi tekanan dengan persentasi kuantitatif (%) senyawa pada temperatur 100°C

Tekanan Kompaksi (Mpa)	Fasa			
	Cu	Sn	Cu <sub>3</sub> Sn	Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub>
300	74,26	15,44	9,06	1,24
400	79,51	10,44	5,16	4,89
500	61,47	12,36	21,76	4,40
600	52,70	18,59	27,59	1,13

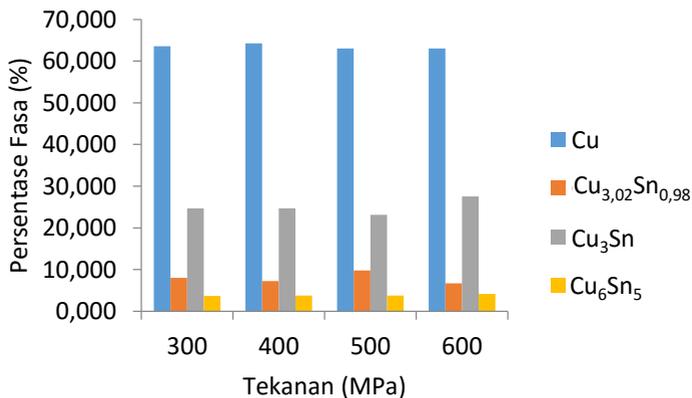


**Gambar 4. 6** Presentasi kuantitatif senyawa pada temperatur 100°C dengan variasi tekanan



**Tabel 4. 2** Hubungan antara variasi tekanan dengan persentasi kuantitatif (%) senyawa pada temperatur 200°C

Tekanan Kompaksi (Mpa)	Fasa			
	Cu	$\text{Cu}_{3,02}\text{Sn}_{0,98}$	$\text{Cu}_3\text{Sn}$	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$
300	63,547	8,050	24,675	3,728
400	64,276	7,254	24,681	3,789
500	63,046	9,784	23,141	3,789
600	63,046	6,690	27,531	4,175



**Gambar 4. 7** Presentasi kuantitatif senyawa pada temperatur 200°C dengan variasi tekanan

Temperatur 200°C menunjukkan bahwa tidak adanya unsur timah yang tersisa. Hal ini dikarenakan temperatur yang digunakan mendekati temperatur leleh dari unsur Sn (timah) tersebut. Ketika unsur Sn mendekati titik leleh, maka Sn akan memiliki kemampuan untuk bereaksi dengan tembaga yang membentuk

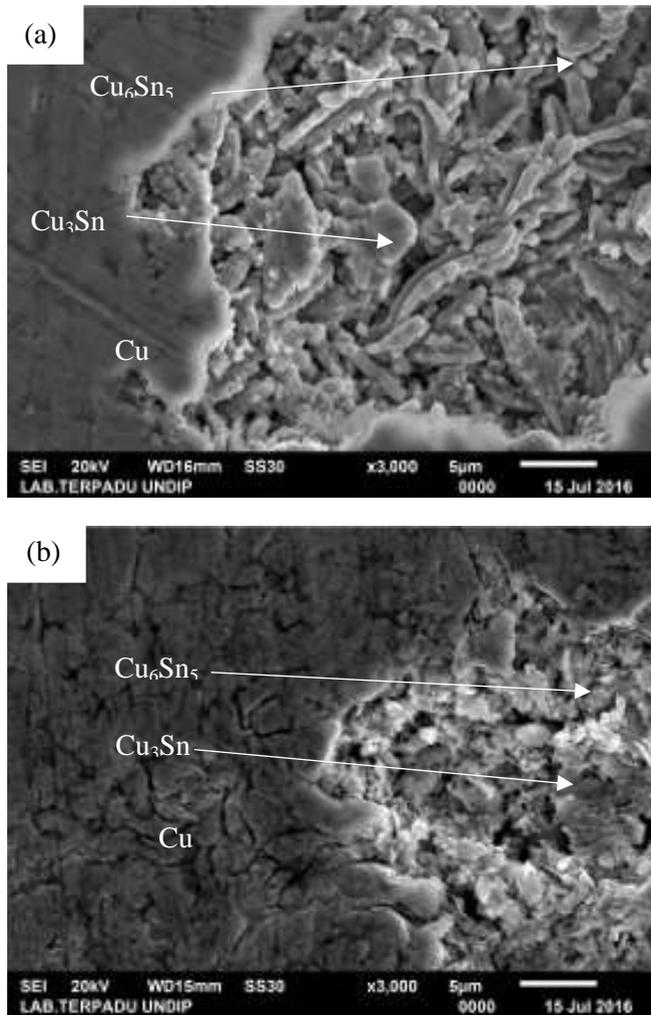


senyawa. Ini dibuktikan dengan terbentuknya senyawa intermetalik pada Gambar 4.7 dan senyawa tersebut meningkat seiring dengan kenaikan temperatur. Bergantinnnya fasa Sn menuju senyawa intermetalik berkorelasi dengan kekuatan dan kekerasan dari material (Vicko, 2015).

#### 4.1.2.2. Analisa SEM-EDX

Pengamatan mikrostruktur dilakukan dengan pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Dengan pengamatan ini, akan mendukung adanya hasil XRD. Pada hasil analisa XRD, didapatkan fasa yang sama pada tiap variasi tekanan. Hal ini dapat dibuktikan pada Gambar 4.8 yang memperlihatkan perubahan fasa pada temperatur 100 dan 200°C.

Pada temperatur 100°C, fasa intermetalik sudah terbentuk. Hal ini mengacu pada hasil pengujian XRD sebelumnya dan dibuktikan pada pengamatan hasil SEM pada Gambar 4.8 (a) terlihat fasa  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  dalam bentuk lonjong yang tumpul serta fasa  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  dengan bentuk kapsul dan bulatan – bulatan kecil disekitar fasa  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Berdasarkan hasil XRD, sampel masih didominasi oleh persentase Cu sebesar 52 – 79% yang ditandai warna abu – abu gelap pada pengamatan SEM.



**Gambar 4. 8** Hasil SEM (a) temperatur  $100^{\circ}\text{C}$  dan (b) temperature  $200^{\circ}\text{C}$  dengan perbesaran 3000x

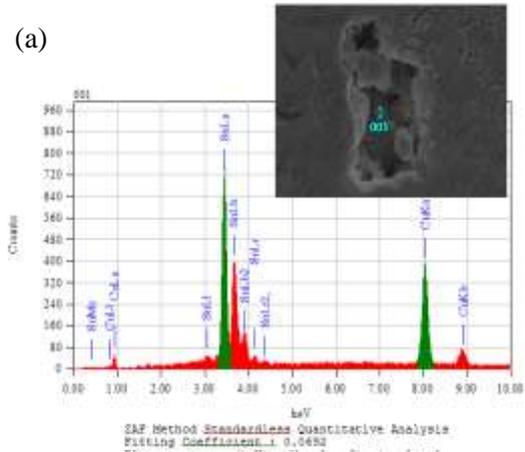


Sementara pada temperatur 200°C, menunjukkan hasil yang mendekati analisis kuantitatif. Yang mana pada hasil SEM terdapat 3 fasa yang terbentuk yaitu  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ,  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  dan Cu. Seperti yang ditunjuk dalam Gambar 4.8 (b)  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  membentuk kelompok yang berjumlah sedikit bila dibanding dengan  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ . Fasa Cu masih terlihat mengelilingi lubang dengan warna abu abu gelap. Bentuk fasa  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  dan  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  terkonfirmasi dengan melihat penelitian yang dilakukan oleh Banovic (2007) fasa  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  memiliki bentuk *nodular* dan fasa  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  memiliki bentuk *fine grain platelet*.

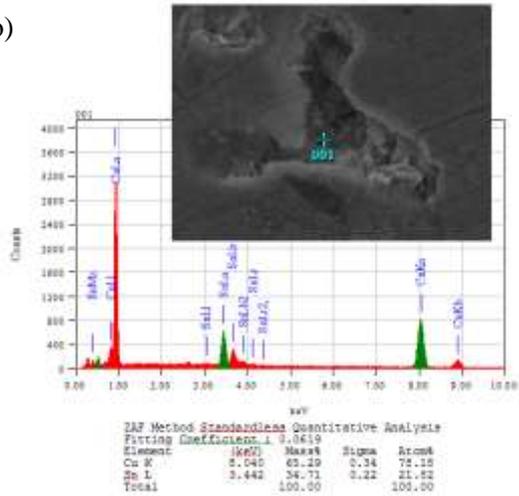
Indikasi terbentuknya fasa - fasa tersebut bisa diperkuat dengan adanya pengujian EDX yang dilakukan pada Gambar yang ingin diketahui jumlah unsurnya. Dengan menggunakan EDX didapatkan jumlah unsur yang nantinya akan dibandingkan dengan penelitian fasa  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  mempunyai komposisi Cu dan Sn berapa persen. Hasil pengujian EDX dapat dilihat pada Gambar 4.9. terlihat bahwa Fasa Cu memiliki komposisi Cu 98.64 % dan Sn 1.36% . unsur Cu mendekati nilai 100% maka bisa dipastikan bahwa bagian abu abu gelap adalah unsur Cu. Sementara fasa Intermetallik  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  memiliki nilai 65.29% Cu dan 34.71% Sn. Bila dibandingkan dengan penelitian dari divisi metalurgi (MSEL USA) fasa  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  terbentuk pada daerah dengan fraksi massa Cu 61,63wt% dan Sn 38,37wt%, hasil dari EDX mendekati nilai tersebut. bisa dipastikan bahwa hasil fasa yang dilakuakn uji EDX adalah fasa  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ . Sementara hasil EDX fasa  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  yang ditunjukkan oleh Gambar 4.9 (c) mempunyai nilai Cu 48.84% dan Sn 51.16 % . Nilai itu mendekati nilai dari divisi metalurgi (MSEL USA) yaitu fraksi massa Cu 39,07wt% dan Sn dengan fraksi massa 60,93wt%. Jadi bagian berbentuk *nodular* tersebut adalah  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ .

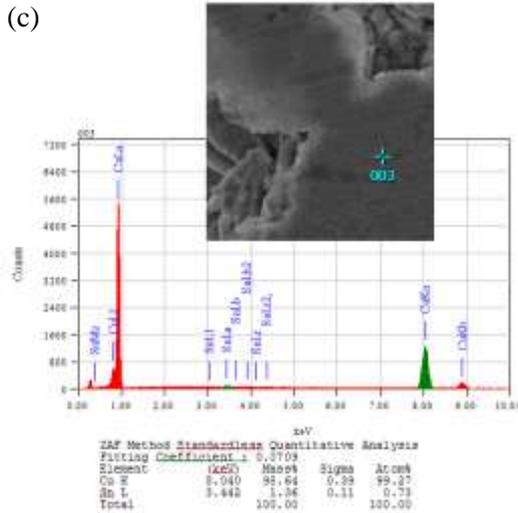


(a)



(b)





**Gambar 4. 9** Hasil SEM EDX (a)  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  (b)  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  (c) Cu

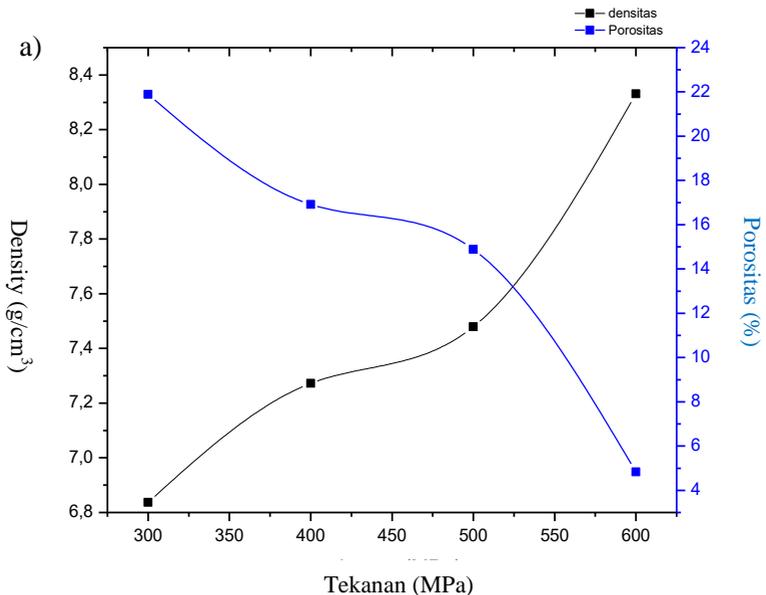
#### 4.1.3. Analisa Densitas dan Porositas Komposit Cu-Sn

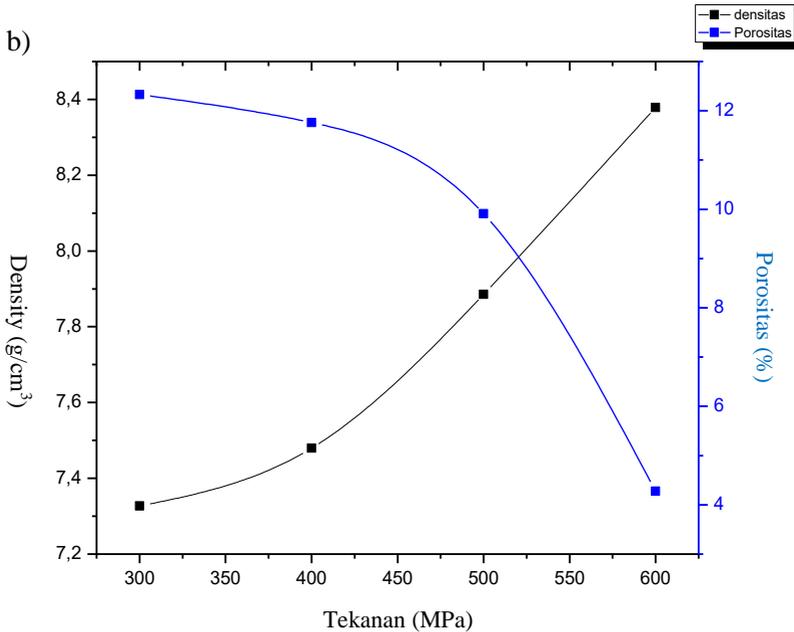
Pengujian densitas dan porositas merupakan aspek pertama yang dilakukan dalam penelitian ini. Kedua aspek ini memiliki korelasi dan saling mempengaruhi. Ketika densitas suatu material tinggi, maka porositas dari material akan bernilai rendah begitu pula sebaliknya jika porositas meningkat maka densitas akan menurun. Perhitungan densitas dan porositas menggunakan prinsip Archimedes sesuai dengan langkah pada bab 3. Sampel dikeringkan lalu dihitung massa kering lalu dicelupkan dalam *aquades* dan dihitung massa saat dalam air. Hasil dari pengujian densitas pada komposit Cu-Sn dengan temperatur 100 dan 200°C dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.10.



**Tabel 4. 3** Hubungan antara Tekanan Kompaksi terhadap *green density* dan porositas pada komposit Cu-Sn

Tekanan Kompaksi (Mpa)	Temperatur (°C)			
	100		200	
	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	Porositas (%)	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	Porositas (%)
300	6,8374	21,89	7,3267	12,33
400	7,2727	16,92	7,4797	11,76
500	7,4797	14,55	7,8858	9,91
600	8,3311	4,83	8,3150	5,62





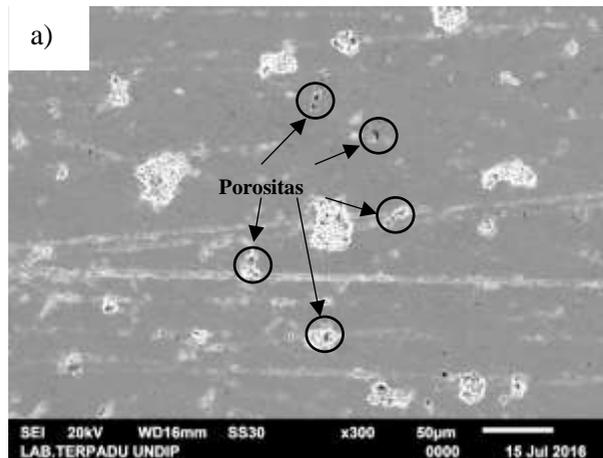
**Gambar 4. 10** Pengaruh temperatur *warm compaction* dengan (a) temperatur  $100^\circ\text{C}$ , dan (b) temperatur  $200^\circ\text{C}$  terhadap densitas dan porositas

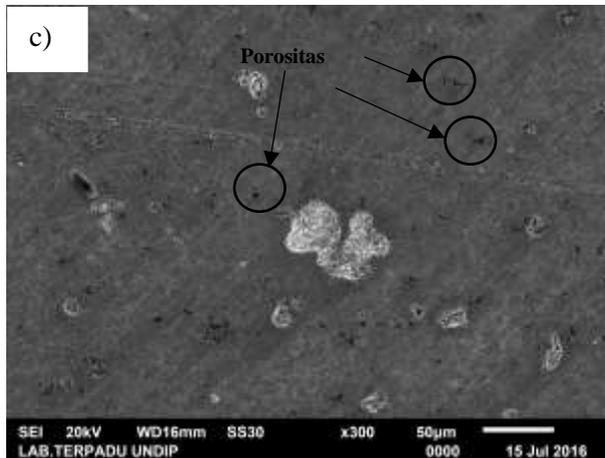
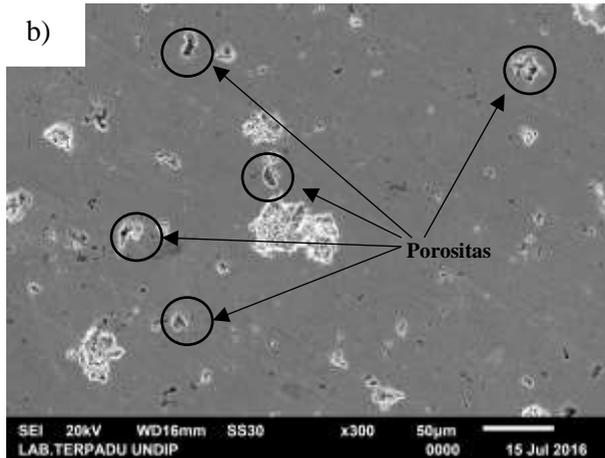
Berdasarkan kedua grafik diatas diperoleh *green density* tertinggi pada tekanan 600 MPa. Kenaikan densitas berdasarkan tekanan ini sesuai dengan teori yang disampaikan Al-Qureshi (2008) yaitu semakin tinggi tekanan kompaksi maka semakin tinggi pula *green density*. Terlihat bahwa nilai densitas berbanding lurus dengan penambahan tekanan dimana dengan peningkatan tekanan kompaksi akan menambah nilai densitas, sebaliknya presentasi porositas berbanding terbalik terhadap tekanan kompaksi dimana presentasi porositas menurun dengan penambahan tekanan. Penurunan porositas ini sesuai dengan teori

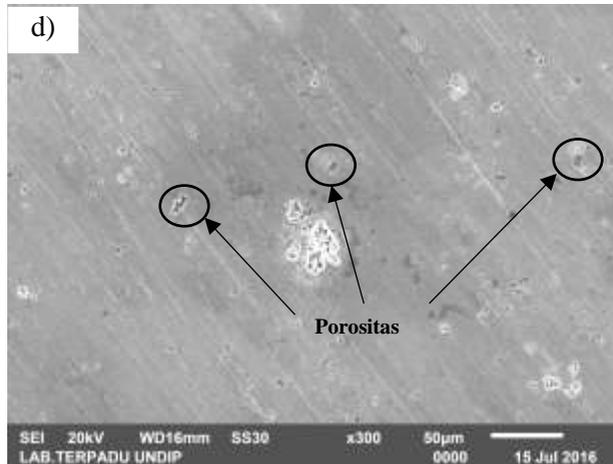


yaitu persentase porositas akan menurun seiring meningkatnya tekanan kompaksi (Ngai, 2005).

Jika dibandingkan antara temperatur 100°C dengan temperatur 200°C, terjadi peningkatan densitas mulai tekanan 300 hingga 600 MPa. Hal ini terjadi karena adanya peningkatan kontak partikel dan terjadinya aliran partikel untuk memenuhi ruang kosong sehingga sampel menjadi lebih padat. Peningkatan kontak partikel ini dapat dibuktikan pada Gambar 4.11 dengan meningkatnya tekanan pada temperatur 100°C.



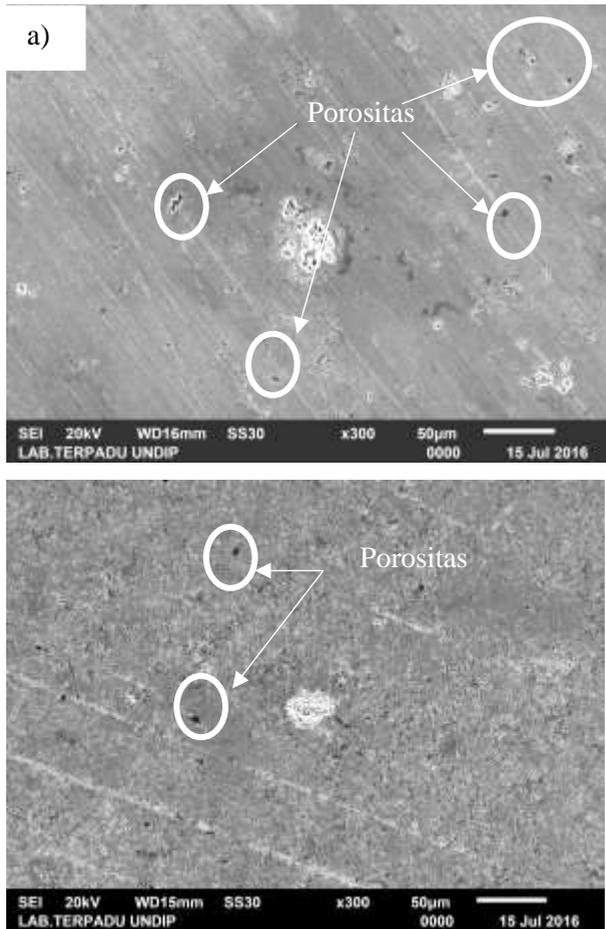




**Gambar 4. 11** Hasil pengamatan porositas SEM perbesaran 300x pada temperatur 100°C dengan tekanan (a) 300; (b) 400; (b) 500; dan (d)600 MPa.

Pada Gambar 4.11 terlihat bahwa porositas semakin berkurang seiring bertambahnya tekanan. Hal ini membuktikan teori bahwa semakin meningkatnya tekanan kompaksi, maka akan menurunkan persentase porositas dan meningkatkan nilai *green* densitas (S.S Feng, 2011).

Selain itu, Chagnon (2000) melaporkan bahwa energi kalor yang diberikan pada material oleh temperatur yang lebih tinggi, maka akan menurunkan *yield strength* dari material tersebut sehingga keuletan akan menurun dan menyebabkan material menjadi lebih lunak. Hal ini akan memberikan efek meningkatnya kontak antar serbuk yang melunak dan material akan mengisi ruang – ruang kosong atau rongga antara serbuk. Variasi temperatur kepada material sampel adalah salah satu factor yang mempengaruhi hasil dari proses metalurgi serbuk. Efek dari variasi temperatur kompaksi 200°C dapat dilihat pada Gambar 4.12.



**Gambar 4. 12** Hasil pengamatan porositas SEM perbesaran 300x pada tekanan 600 MPa dengan temperature (a) 100 dan (b) 200°C

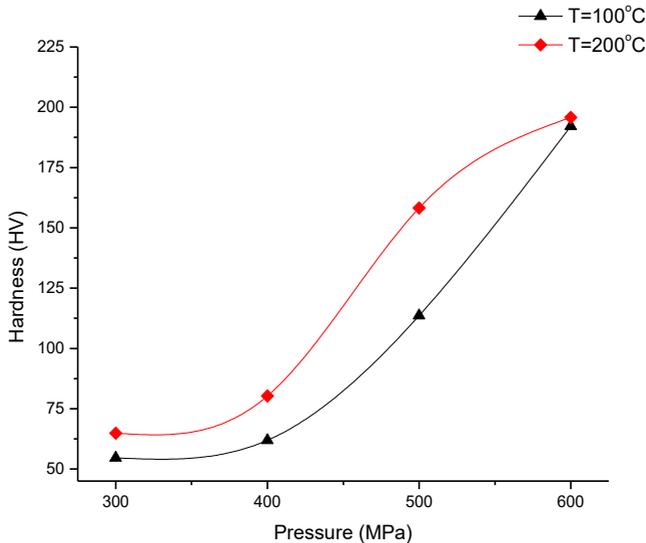


#### 4.1.4. Analisa Sifat Mekanik Komposit Cu-Sn

Pengujian mekanik yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pengujian kekerasan dan pengujian tekan. Pengujian kekerasan merupakan uji ketahanan material terhadap indentasi akibat beban dinamis atau statis, goresan serta abrasi. Kekerasan secara umum didefinisikan sebagai ketahanan material terhadap indentasi (Kalpakjian,1991). Kekerasan ini perlu diuji karena berhubungan dengan daya tahan dari laras (Vicko,2012). Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Rockwell jenis F dengan kekuatan indentasi 588 N. Selain itu dapat menggunakan metode vickers pada komposit Cu-Sn ini, akan tetapi dikhawatirkan mempengaruhi hasil dari pengujian adanya porositas pada komposit (Vicko, 2012). Nilai kekerasan dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.13 dengan temperatur 100°C dan 200°C.

**Tabel 4. 4** Hubungan antara Tekanan Kompaksi terhadap kekerasan (HV) pada komposit Cu-Sn

Tekanan Kompaksi (Mpa)	Temperatur	
	100°C	200°C
300	54,591	64,901
400	61,951	80,298
500	113,573	158,273
600	192,128	195,814



**Gambar 4. 13** Pengaruh tekanan terhadap nilai kekerasan dengan temperatur 100°C dan 200°C

Terlihat pada Gambar 4.13, nilai kekerasan pada temperatur 100 dan 200° C mengalami kenaikan pada tiap kenaikan tekanan kompaksi. Kenaikan ini sesuai dengan kenaikan densitas sehingga sesuai dengan teori yang dinyatakan oleh Mahani (2013) bahwa kenaikan densitas meningkatkan kekerasan dari suatu material. Kenaikan kekerasan ini terjadi karena semakin besar tekanan menyebabkan partikel lebih bersinggungan sehingga membentuk luas kontak antar butir yang semakin luas. Dengan perluasan kontak antar butir ini maka rongga antar butir semakin kecil dan kekerasan meningkat (Martha,2009). Jika mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh



Kruachatturat dkk (2012), nilai dari kekerasan yang dibutuhkan oleh peluru frangible adalah 54 – 119 HV atau 33 – 95 HRF, maka yang masuk ke dalam rentang nilai tersebut adalah seluruh variabel tekanan pada temperatur 100°C dan 200°C kecuali tekanan 500 MPa pada temperature 200°C. Pada pengujian tekan, digunakan sampel dengan ukuran rata – rata sampel adalah 1 : 1. Lalu sampel uji ditekan hingga muncul retakan atau pecahan pertama dan pembebanan dihentikan.

Vuri, 2012, menyatakan bahwa sampel uji tekan memiliki kemungkinan dua jenis patahan yaitu *buckling* dan *barreling*. Hal ini disebabkan distribusi tekanan (*stress-strain*) yang berbeda. Patah *buckling* merupakan kerusakan ke arah samping sampel pembebanan. Sedangkan *barreling* menunjukkan kerusakan berupa cembung dan terdeformasi di sisi samping sampel pembebanan (Vuri,2012).

Kekuatan tekan sangat erat hubungannya dengan densitas material sesuai dengan pernyataan German (1984) yang menyatakan bahwa kekuatan tekan akan naik seiring dengan peningkatan densitas dan akan menurun seiring menurunnya densitas suatu material. Pada Gambar 4.8, kekuatan tekan dari variasi tekanan pada temperatur 100°C memiliki bentuk grafik yang sama dengan nilai densitas. Tidak hanya kekuatan yang dapat diketahui dari pengujian tekan tetapi juga nilai modulus elastisitas. Modulus elastisitas menyatakan nilai *stiffness* (kekakuan) suatu material. Kekakuan merupakan kemampuan suatu material untuk menerima tegangan atau beban tanpa mengakibatkan terjadinya deformasi atau perubahan bentuk (Vury, 2012). Semakin besar nilai modulus elastisitas material maka akan semakin tinggi kekakuan material tersebut. sebaliknya apabila semakin kecil nilai modulus elastisitas, makin tidak kaku suatu material tersebut (Callister, 2007). Nilai kekuatan tekan dan modulus elastisitas dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan 4.6 dengan



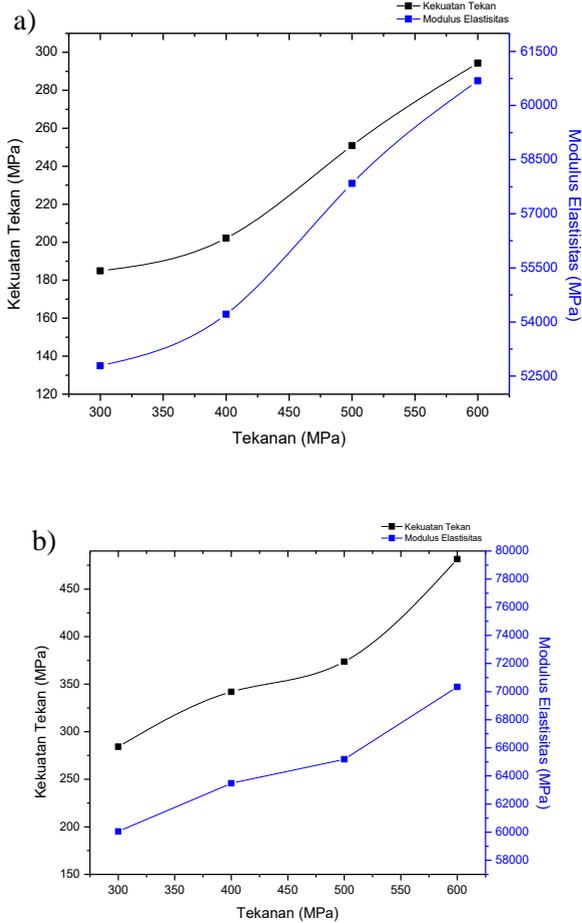
grafik hubungan antara modulus elastisitas dengan nilai kekuatan pada gambar 4.14.

**Tabel 4. 5** Hubungan antara Tekanan Kompaksi terhadap Kekuatan tekan (MPa) pada komposit Cu-Sn

Tekanan Kompaksi (Mpa)	Temperatur	
	100°C	200°C
300	184,9148	284,232
400	202,1812	341,975
500	250,8550	373,674
600	294,3206	481,453

**Tabel 4. 6** Hubungan antara Tekanan Kompaksi terhadap modulus elastisitas (MPa) pada komposit Cu-Sn

Tekanan Kompaksi (Mpa)	Temperatur	
	100°C	200°C
300	52785,4437	60051,627
400	54218,1742	63477,672
500	57842,8280	65188,433
600	60683,2564	70337,792



**Gambar 4. 14** Pengaruh tekanan terhadap kekuatan tekan dan modulus elastisitas pada temperatur (a) 100°C dan (b) 200°C



Antara sifat mekanik (kekuatan tekan dan modulus elastisitas) dengan densitas mempunyai hubungan yang selaras, dimana dengan densitas yang tinggi akan didapat sifat mekanik yang tinggi pula. Abbaszadeh et al (2012) menyatakan dalam penelitiannya bahwa ada hubungan langsung antara densitas relatif dan sifat mekanik.

#### **4.2. Pembahasan**

Karakterisasi komposit Cu-10%Sn dilakukan untuk memenuhi kriteria dari material peluru *frangible*. Pembuatan komposit ini berbeda dengan penelitian sebelumnya. Proses pada umumnya, pembuatan menggunakan metode metalurgi serbuk menggunakan konvensional sehingga dibutuhkan *sintering* dalam pengerjaannya. Berbeda dengan *warm compaction*, metode kompaksi ini mengurangi proses yang dikerjakan dan tanpa menggunakan *sintering*. Penelitian ini mencocokkan hasil pengujian dari variabel – variabel yang digunakan dengan penelitian karakterisasi material peluru *frangible* sebelumnya. Dalam karakterisasi menuju kriteria material peluru *frangible*, sangat dibutuhkan sifat mekanik dan mikrostruktur. Sifat mekanik dibutuhkan untuk mengetahui kekuatan dan ketangguhan material (Rydlo, 2010). Mengetahui mikrostruktur dalam karakterisasi akan menjadi aspek yang dijadikan acuan dalam mempengaruhi sifat – sifat pada penelitian berikutnya terutama dalam pembentukan senyawa intermetalik pada komposit Cu-Sn (Metrim, 2015).



Pertumbuhan senyawa intermetalik terjadi karena adanya *heat treatment* yang dilakukan pada saat proses pembuatan komposit. Sn memiliki titik leleh sebesar  $213^{\circ}\text{C}$  sehingga pemberian temperatur *warm compaction* pada temperatur  $200^{\circ}\text{C}$  akan mengakibatkan Sn cair dan membentuk senyawa intermetallik sesuai pernyataan Banovic (2007) dimana proses *heat treatment* dilakukan pada temperatur  $232 - 415^{\circ}\text{C}$ . Mekanisme pertumbuhan ini terjadi karena proses pembasahan oleh cairan Sn pada matriks Cu. Sehingga akan menimbulkan terjadinya difusi Sn pada matriks Cu dan mendorong pertumbuhan fasa  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  dan  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Pembentukan kedua senyawa tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.8 sebagai hasil pengamatan SEM.

Dalam perhitungan kuantitas menggunakan fraksi volume dari hasil XRD, tekanan tidak mempengaruhi terbentuknya senyawa intermetalik. Pembentukan senyawa ini dipengaruhi oleh temperatur sesuai pernyataan Banovic(2007). Terlihat pada Gambar 4.6 (temperatur  $100^{\circ}\text{C}$ ) dan Gambar 4.7 (temperatur  $200^{\circ}\text{C}$ ) menunjukkan bahwa senyawa intermetallik meningkat dengan menghilangnya Sn yang bereaksi dengan Cu membentuk senyawa intermetallik.

Variasi tekanan dan temperatur *warm compaction* ini berdampak pada densitas dan porositas yang didapatkan dari perhitungan menggunakan prinsip archimedes. Pada Gambar 4.9 didapatkan hasil densitas yang meningkat dengan penambahan tekanan kompaksi. Sesuai dengan teori bahwa semakin meningkatnya tekanan kompaksi maka akan semakin meningkatkan *green density* (Al-Qureshi,2008). Porositas memiliki nilai yang berkebalikan dengan nilai densitas jika nilai densitas naik maka porositas akan menurun (Ngai, 2005).



Vicko (2015) menyatakan bahwa terbentuknya senyawa intermetalik ini akan sangat mempengaruhi sifat mekanik pada komposit Cu-10%Sn terutama pada kekerasan dan kekuatan tekan. Semakin banyak persentase senyawa intermetalik maka akan meningkatkan nilai dari sifat mekanik tersebut. Pada Gambar 4.13 terlihat bahwa nilai kekerasan memiliki tren yang naik pada tiap kenaikan tekanan kompaksi. Begitu pula kekuatan tekan, menunjukkan tren di tiap kenaikan tekanan kompaksi. Tren kenaikan kekerasan dan kekuatan tekan sangat erat dengan densitas. Jika densitas naik maka nilai kekerasan dan kekuatan tekan juga meningkat. Sesuai dengan pernyataan Abbaszadeh et al (2012) yang menyatakan dalam penelitiannya bahwa ada hubungan langsung antara densitas relatif dan sifat mekanik.

## LAMPIRAN A

### • Perhitungan Massa Serbuk

Perhitungan massa matriks dan massa *filler* pada komposit Cu-10%wtSn digunakan persamaan berikut:

- Massa matriks

$$m_m = a \frac{\rho_m \cdot \rho_f}{a \cdot \rho_f + b \cdot \rho_m} \cdot v_c$$

- Massa *filler*

$$m_f = b \frac{\rho_m \cdot \rho_f}{a \cdot \rho_f + b \cdot \rho_m} \cdot v_c$$

Keterangan:

$m_m$  : massa matriks

$m_f$  : massa *filler*

$a$  : fraksi massa matriks

$b$  : fraksi massa *filler*

$\rho_m$  : densitas matriks

$\rho_f$  : densitas *filler*

$v_c$  : volume komposit

Perhitungan volume sampel berbentuk peluru menggunakan pendekatan bentuk silinder dengan nilai volume sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Volume silinder } (v_l) &= \pi r^2 t \\ &= \pi (5 \cdot 10^{-1} \text{ cm})^2 (11 \cdot 10^{-1} \text{ cm}) \\ &= 0,8635 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Massa masing-masing serbuk dari peluru komposisi Cu-10%wt Sn adalah sebagai berikut:

Massa matriks:

$$m_m = a \frac{\rho_m \cdot \rho_f}{a \cdot \rho_f + b \cdot \rho_m} \cdot v_c$$

$$m_m = 0,90 \cdot \frac{(8,96)(7,365)}{(0,90 \times 7,365) + (0,1 \times 8,96)} \cdot (0,8635)$$

$$m_m = 0,90 \cdot \frac{(65,9904)}{(7,5245)} \cdot (0,8635)$$

$$m_m = 6,816 \text{ gr}$$

Massa *filler*:

$$m_f = b \cdot \frac{\rho_m \cdot \rho_f}{a \cdot \rho_f + b \cdot \rho_m} \cdot v_c$$

$$m_m = 0,10 \cdot \frac{(8,96)(7,365)}{(0,90 \times 7,365) + (0,1 \times 8,96)} \cdot (0,8635)$$

$$m_f = 0,10 \cdot \frac{(65,9904)}{(7,5245)} \cdot (0,8635)$$

$$m_f = 0,757 \text{ gr}$$

Sehingga didapatkan untuk komposisi Cu-10% wt Sn massa matriks 6,816 gr dan massa penguat 0,757 gr.

Sementara massa total komposit dihitung dengan menambahkan massa matriks dan massa penguat seperti pada perhitungan berikut :

$$m_{total} = m_m + m_f$$

$$m_{total} = 6,816 + 0,757$$

$$m_{total} = 7,573 \text{ gr}$$

Sehingga didapatkan untuk komposisi Cu-10% wt Sn massa matriks 6,816gr dan massa penguat 0,757 gr serta massa total komposit 7,573 gr

Massa Zinc stearate bisa dihitung sebagai berikut :

$$m_{zinc} = m_{total} \times 0,6\%$$

$$m_{zinc} = 7,573 \times 0,5\%$$

$$m_{zinc} = 0,037865 \text{ gr}$$

- **Perhitungan Kecepatan putar mixing**

Perhitungan kecepatan putar untuk mixer tabung adalah sebagai berikut :

$$N_0 = \frac{32}{d^{0.5}}$$

$$N_0 = \frac{32}{(0.0452)^{0.5}}$$

$$N_0 = \frac{32}{0.21260292} = 150.515 \text{ RPM}$$

Perhitungan konversi HRF ke HV untuk Copper

- Sampel temperatur 100<sup>o</sup>C dan tekanan 300 MPa

$$\begin{aligned} \frac{1}{HV} &= 0.03378 \times 10^{-2} - 7.12218 \times 10^{-4} (44.06) \\ &\quad + 6.46922 \times 10^{-6} (44.06)^2 \\ &\quad - 2.64942 \times 10^{-8} (44.06)^3 \end{aligned}$$

$$HV = 52.12$$

- Sampel temperatur 100<sup>o</sup>C dan tekanan 400 MPa

$$\begin{aligned} \frac{1}{HV} &= 0.03378 \times 10^{-2} - 7.12218 \times 10^{-4} (58.33) \\ &\quad + 6.46922 \times 10^{-6} (58.33)^2 \\ &\quad - 2.64942 \times 10^{-8} (58.33)^3 \end{aligned}$$

$$HV = 64.50$$

- Sampel temperatur 100<sup>o</sup>C dan tekanan 500 MPa

$$\frac{1}{HV} = 0.03378 \times 10^{-2} - 7.12218 \times 10^{-4} (69.28) \\ + 6.46922 \times 10^{-6} (69.28)^2 \\ - 2.64942 \times 10^{-8} (69.28)^3$$

$$HV = 76.30$$

- Sampel temperatur 100<sup>0</sup>C dan tekanan 600 MPa

$$\frac{1}{HV} = 0.03378 \times 10^{-2} - 7.12218 \times 10^{-4} (66.17) \\ + 6.46922 \times 10^{-6} (66.17)^2 \\ - 2.64942 \times 10^{-8} (66.17)^3$$

$$HV = 73.02$$

- Sampel temperatur 200<sup>0</sup>C dan tekanan 300 MPa

$$\frac{1}{HV} = 0.03378 \times 10^{-2} - 7.12218 \times 10^{-4} (62.83) \\ + 6.46922 \times 10^{-6} (62.83)^2 \\ - 2.64942 \times 10^{-8} (62.83)^3$$

$$HV = 68.72$$

- Sampel temperatur 200<sup>0</sup>C dan tekanan 400 MPa

$$\frac{1}{HV} = 0.03378 \times 10^{-2} - 7.12218 \times 10^{-4} (73.89) \\ + 6.46922 \times 10^{-6} (73.89)^2 \\ - 2.64942 \times 10^{-8} (73.89)^3$$

$$HV = 83.19$$

- Sampel temperatur 200<sup>0</sup>C dan tekanan 500 MPa

$$\frac{1}{HV} = 0.03378 \times 10^{-2} - 7.12218 \times 10^{-4} (86.50) \\ + 6.46922 \times 10^{-6} (86.50)^2 \\ - 2.64942 \times 10^{-8} (86.50)^3$$

$$HV = 100.15$$

- Sampel temperatur 200°C dan tekanan 600 MPa

$$\frac{1}{HV} = 0.03378 \times 10^{-2} - 7.12218 \times 10^{-4} (90.33) \\ + 6.46922 \times 10^{-6} (90.33)^2 \\ - 2.64942 \times 10^{-8} (90.33)^3 \\ HV = 109.85$$

Perhitungan analisa kuantitatif hasil XRD

- Sampel temperatur 100°C dan tekanan 300 MPa

$$\%Cu = \frac{I_{Cu}}{I_{Cu} + I_{Sn} + I_{Cu_3Sn} + I_{Cu_6Sn_5}} \times 100\% \\ = \frac{1538,5}{1538,5 + 319,9 + 187,6 + 25,7} \times 100\%$$

$$= 74,262 \%$$

$$\%Sn = \frac{I_{Sn}}{I_{Cu} + I_{Sn} + I_{Cu_3Sn} + I_{Cu_6Sn_5}} \times 100\% \\ = \frac{319,9}{1538,5 + 319,9 + 187,6 + 25,7} \times 100\% = 15,441\%$$

$$\begin{aligned} \%Cu_3Sn &= \frac{I_{Cu_3Sn}}{I_{Cu} + I_{Sn} + I_{Cu_3Sn} + I_{Cu_6Sn_5}} \times 100\% \\ &= \frac{187,6}{1538,5 + 319,9 + 187,6 + 25,7} \times 100\% = 9,055\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \%Cu_6Sn_5 &= \frac{I_{Cu_6Sn_5}}{I_{Cu} + I_{Sn} + I_{Cu_3Sn} + I_{Cu_6Sn_5}} \times 100\% \\ &= \frac{25,7}{1538,5 + 319,9 + 187,6 + 25,7} \times 100\% = 1,241\% \end{aligned}$$

- Sampel temperatur 200<sup>0</sup>C dan tekanan 300 MPa

$$\begin{aligned} \%Cu &= \frac{I_{Cu}}{I_{Cu} + I_{Cu_3Sn} + I_{Cu_6Sn_5} + I_{Cu_{3,02}Sn_{0,98}}} \times 100\% \\ &= \frac{138,94}{138,94 + 8,15 + 17,6 + 53,95} \times 100\% = 63,547\% \end{aligned}$$

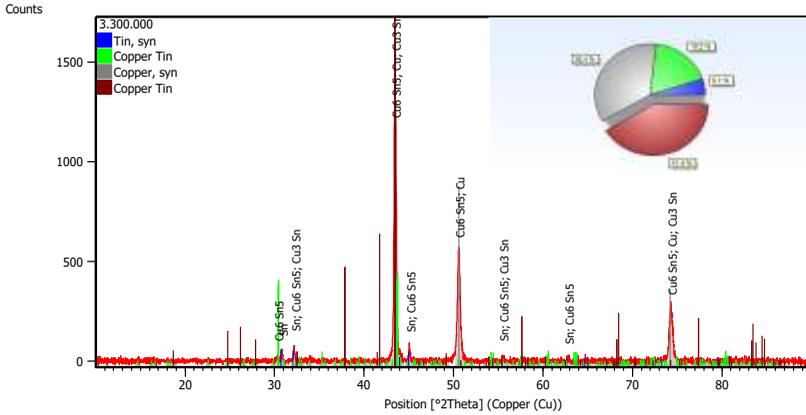
$$\begin{aligned} \%Cu_3Sn &= \frac{I_{Cu}}{I_{Cu} + I_{Cu_3Sn} + I_{Cu_6Sn_5} + I_{Cu_{3,02}Sn_{0,98}}} \times 100\% \\ &= \frac{53,95}{138,94 + 8,15 + 17,6 + 53,95} \times 100\% = 24,675\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \%Cu_6Sn_5 &= \frac{I_{Cu}}{I_{Cu} + I_{Cu_3Sn} + I_{Cu_6Sn_5} + I_{Cu_{3,02}Sn_{0,98}}} \times 100\% \\ &= \frac{8,15}{138,94 + 8,15 + 17,6 + 53,95} \times 100\% = 3,728\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \%Cu_6Sn_5 \\
 &= \frac{I_{Cu}}{I_{Cu} + I_{Cu_3Sn} + I_{Cu_6Sn_5} + I_{Cu_{3,02}Sn_{0,98}}} \times 100\% \\
 &= \frac{17,6}{138,94 + 8,15 + 17,6 + 53,95} \times 100\% = 8,049\%
 \end{aligned}$$

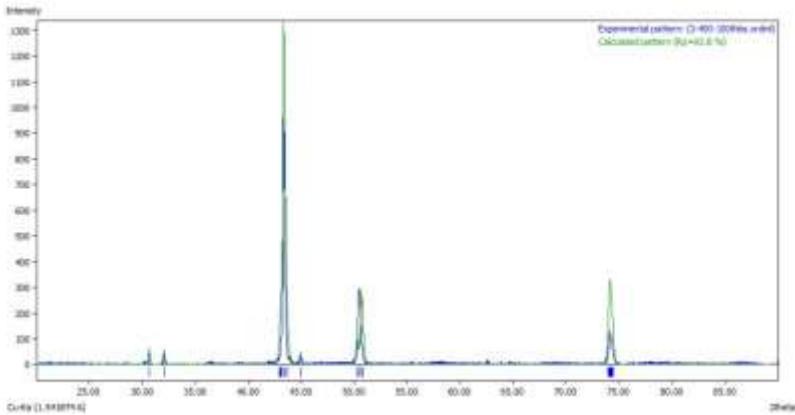
## LAMPIRAN B

- Hasil XRD 300-100



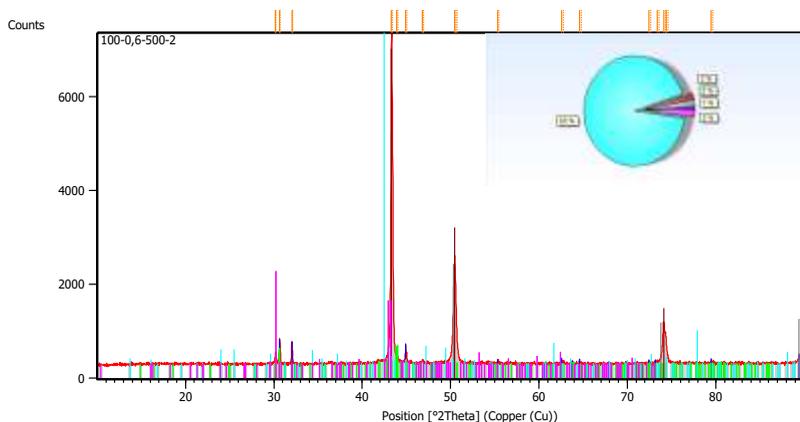
Pos. [ $^{\circ}2\theta$ .]	Height [cts]	FWHM Left [ $^{\circ}2\theta$ .]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
30.3396	26.81	0.1181	2.94610	1.54
30.7845	50.89	0.1574	2.90453	2.92
32.1755	79.56	0.0590	2.78207	4.57
33.5288	4.26	0.3149	2.67281	0.24
43.4544	1742.80	0.1920	2.08083	100.00
43.5726	997.39	0.0960	2.08062	57.23
45.0375	73.80	0.0960	2.01130	4.23
50.5461	549.37	0.1200	1.80426	31.52
55.4849	26.35	0.2400	1.65479	1.51
62.8083	18.24	0.7680	1.47830	1.05
74.2526	260.46	0.3360	1.27623	14.95

- Hasil XRD 400-100



No.	2theta [°]	d [Å]	I/I0	FWHM
1	30.66	2.9164	61.62	0.2005
2	32.04	2.7936	64.46	0.2005
3	42.97	2.1049	44.51	0.2005
4	43.02	2.1026	59.65	0.2005
5	43.10	2.0987	114.65	0.2005
6	43.33	2.0882	1000.00	0.1671
7	43.45	2.0826	980.33	0.2674
8	43.70	2.0712	59.22	0.2005
9	44.93	2.0177	46.02	0.2005
10	50.33	1.8131	52.56	0.1161
11	50.42	1.8099	61.04	0.4026
12	50.68	1.8014	155.21	0.1338
13	50.74	1.7994	91.01	0.3393
14	50.80	1.7974	107.82	0.2081
15	50.81	1.7971	54.90	0.2005
16	73.98	1.2812	71.68	0.2005
17	74.04	1.2805	105.00	0.2005
18	74.13	1.2791	154.11	0.2005
19	74.18	1.2783	140.42	0.2005
20	74.27	1.2771	115.22	0.2005
21	74.37	1.2756	102.27	0.2005
22	74.45	1.2743	58.35	0.2005

- Hasil XRD 500-100



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
30.172(4)	160(13)	0.15(2)	2.95965	2.77
30.249(4)	80(13)	0.15(2)	2.95965	1.39
30.647(2)	457(20)	0.087(5)	2.91479	7.92
30.725(2)	229(20)	0.087(5)	2.91479	3.96
32.032(2)	437(19)	0.082(5)	2.79188	7.58
32.114(2)	219(19)	0.082(5)	2.79188	3.79
43.3210(4)	5768(43)	0.167(2)	2.08693	100.00
43.4341(4)	2884(43)	0.167(2)	2.08693	50.00
43.897(5)	102(20)	0.05(2)	2.06086	1.77

---

44.012(5)	51(20)	0.05(2)	2.06086	0.89
44.921(1)	412(19)	0.062(4)	2.01625	7.14
45.039(1)	206(19)	0.062(4)	2.01625	3.57
46.84(1)	61(12)	0.13(3)	1.93813	1.06
46.96(1)	31(12)	0.13(3)	1.93813	0.53
50.430(6)	1633(36)	0.30(1)	1.80814	28.32
50(1288)	0(62)	0(3017)	1.80703	0.00
50.564(6)	817(36)	0.30(1)	1.80814	14.16
51(1288)	0(62)	0(3017)	1.80703	0.00
51(2664)	0(84)	0(6850)	1.80222	0.00
51(2664)	0(84)	0(6850)	1.80222	0.00
55.346(9)	68(11)	0.11(2)	1.65860	1.18
55.496(9)	34(11)	0.11(2)	1.65860	0.59
62.568(8)	73(11)	0.11(2)	1.48340	1.26
62.741(8)	36(11)	0.11(2)	1.48340	0.63
64.594(6)	89(11)	0.10(2)	1.44167	1.54
64.774(6)	45(11)	0.10(2)	1.44167	0.77
72.44(1)	45(10)	0.13(4)	1.30362	0.77
72.65(1)	22(10)	0.13(4)	1.30362	0.39
73.390(5)	93(15)	0.06(2)	1.28908	1.61

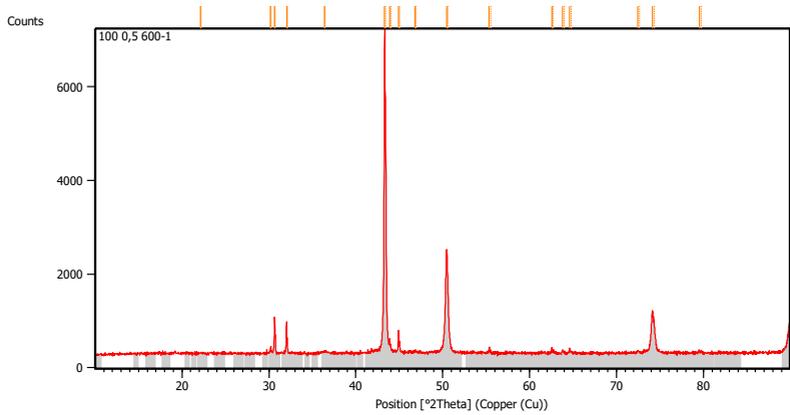
---

---

73.602(5)	46(15)	0.06(2)	1.28908	0.80
74.117(4)	745(15)	0.296(9)	1.27823	12.91
74.332(4)	372(15)	0.296(9)	1.27823	6.46
74.38(1)	67(21)	0.11(4)	1.27439	1.17
74.59(1)	34(21)	0.11(4)	1.27439	0.58
79.46(4)	27(3)	0.40(3)	1.20511	0.47
79.70(4)	14(3)	0.40(3)	1.20511	0.24

---

- Hasil XRD 600-100



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
22.14(9)	10(3)	0.5(3)	4.01216	0.17
22.19(9)	5(3)	0.5(3)	4.01216	0.09
30.171(8)	76(10)	0.17(4)	2.95971	1.35
30.248(8)	38(10)	0.17(4)	2.95971	0.67
30.648(1)	654(23)	0.082(4)	2.91475	11.66
30.726(1)	327(23)	0.082(4)	2.91475	5.83
32.034(1)	572(21)	0.079(4)	2.79171	10.20
32.116(1)	286(21)	0.079(4)	2.79171	5.10
36.38(4)	26(3)	0.8(1)	2.46736	0.46
36.48(4)	13(3)	0.8(1)	2.46736	0.23

---

43.3219(4 )	5610(42)	0.169(2)	2.08689	100.00
43.4350(4 )	2805(42)	0.169(2)	2.08689	50.00
43.893(4)	136(17)	0.06(1)	2.06106	2.42
44.008(4)	68(17)	0.06(1)	2.06106	1.21
44.922(1)	464(19)	0.068(4)	2.01619	8.28
45.040(1)	232(19)	0.068(4)	2.01619	4.14
46.8(1)	9(2)	0.9(2)	1.94006	0.16
46.9(1)	5(2)	0.9(2)	1.94006	0.08
50.428(1)	1588(15)	0.314(4)	1.80820	28.30
50.563(1)	794(15)	0.314(4)	1.80820	14.15
55.351(4)	124(12)	0.09(1)	1.65847	2.22
55.501(4)	62(12)	0.09(1)	1.65847	1.11
62.560(4)	124(14)	0.08(1)	1.48357	2.21
62.733(4)	62(14)	0.08(1)	1.48357	1.11
63.801(7)	77(12)	0.09(2)	1.45768	1.38
63.978(7)	39(12)	0.09(2)	1.45768	0.69
64.606(5)	104(13)	0.08(2)	1.44143	1.85
64.786(5)	52(13)	0.08(2)	1.44143	0.93
72.42(1)	47(9)	0.13(4)	1.30388	0.85

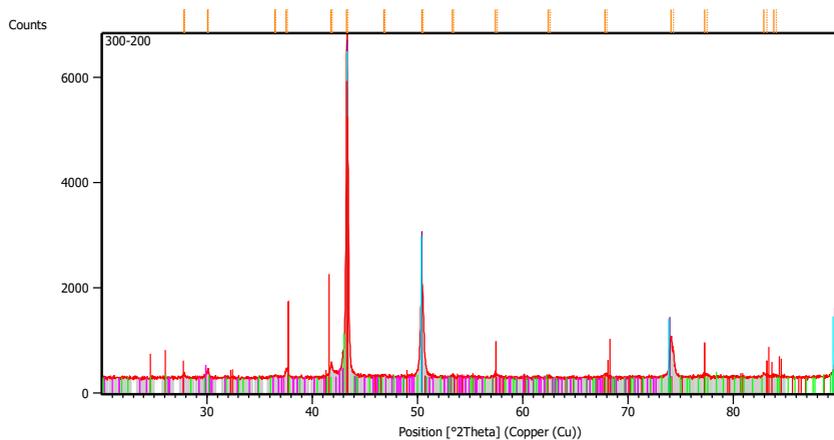
---

---

72.63(1)	24(9)	0.13(4)	1.30388	0.42
74.125(2)	729(13)	0.326(9)	1.27810	13.00
74.341(2)	365(13)	0.326(9)	1.27810	6.50
79.529(7)	74(11)	0.11(3)	1.20428	1.31
79.766(7)	37(11)	0.11(3)	1.20428	0.66

---

- Hasil XRD 300-200



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
27.81(1)	63(13)	0.17(6)	3.20490	1.20
27.88(1)	32(13)	0.17(6)	3.20490	0.60
30.071(6)	125(12)	0.19(2)	2.96933	2.37
30.148(6)	63(12)	0.19(2)	2.96933	1.19
36.45(4)	23(3)	0.8(1)	2.46325	0.44
36.54(4)	12(3)	0.8(1)	2.46325	0.22
37.552(6)	134(10)	0.23(3)	2.39320	2.54
37.649(6)	67(10)	0.23(3)	2.39320	1.27
41.818(6)	162(10)	0.29(3)	2.15840	3.07

---

41.927(6)	81(10)	0.29(3)	2.15840	1.53
43.2984(5)	5273(46)	0.167(2)	2.08797	100.00
43.4114(5)	2637(46)	0.167(2)	2.08797	50.00
46.82(3)	25(6)	0.3(1)	1.93896	0.47
46.94(3)	12(6)	0.3(1)	1.93896	0.23
50.410(1)	1378(18)	0.287(3)	1.80882	26.13
50.544(1)	689(18)	0.287(3)	1.80882	13.06
53.30(4)	20(8)	0.3(2)	1.71721	0.39
53.45(4)	10(8)	0.3(2)	1.71721	0.19
57.44(1)	74(10)	0.21(4)	1.60293	1.41
57.60(1)	37(10)	0.21(4)	1.60293	0.70
62.45(9)	14(6)	0.5(3)	1.48600	0.27
62.62(9)	7(6)	0.5(3)	1.48600	0.13
67.80(2)	59(8)	0.4(1)	1.38104	1.13
67.99(2)	30(8)	0.4(1)	1.38104	0.56
74.105(2)	675(14)	0.276(7)	1.27841	12.81
74.320(2)	338(14)	0.276(7)	1.27841	6.40
77.32(2)	61(9)	0.31(6)	1.23307	1.16
77.55(2)	30(9)	0.31(6)	1.23307	0.58

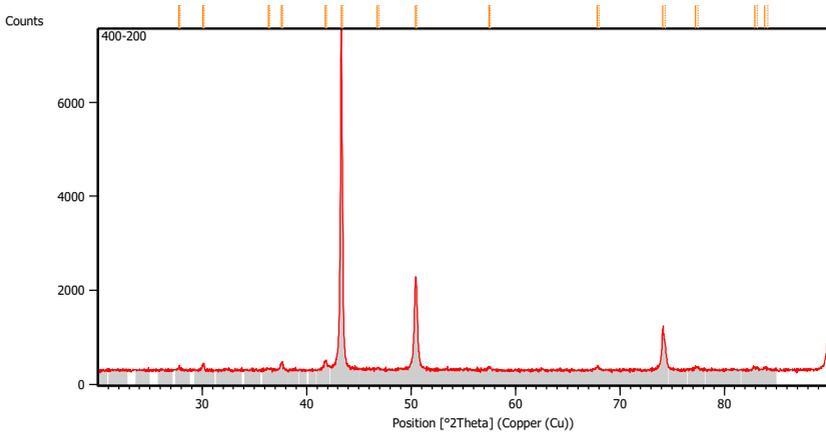
---

---

82.94(1)	71(8)	0.24(4)	1.16319	1.35
83.19(1)	36(8)	0.24(4)	1.16319	0.68
83.84(3)	42(4)	0.30(4)	1.15297	0.79
84.10(3)	21(4)	0.30(4)	1.15297	0.40

---

- Hasil XRD 400-200



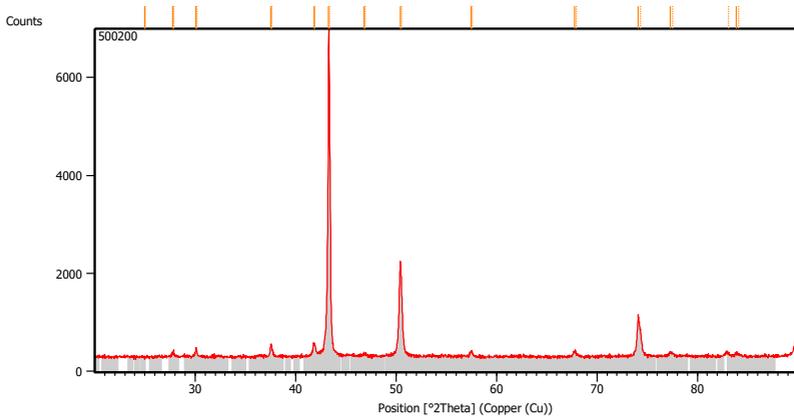
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
27.79(2)	45(9)	0.23(8)	3.20809	0.76
27.86(2)	22(9)	0.23(8)	3.20809	0.38
30.088(7)	111(12)	0.18(3)	2.96767	1.90
30.165(7)	56(12)	0.18(3)	2.96767	0.95
36.36(4)	22(4)	0.47(9)	2.46868	0.37
36.46(4)	11(4)	0.47(9)	2.46868	0.19
37.588(8)	132(12)	0.22(3)	2.39098	2.25
37.685(8)	66(12)	0.22(3)	2.39098	1.13
41.80(1)	128(15)	0.32(3)	2.15911	2.19
41.91(1)	64(15)	0.32(3)	2.15911	1.09

---

43.3068(4)	5868(46)	0.166(2)	2.08758	100.00
43.4199(4)	2934(46)	0.166(2)	2.08758	50.00
46.79(3)	22(5)	0.3(1)	1.93996	0.38
46.91(3)	11(5)	0.3(1)	1.93996	0.19
50.423(1)	1497(17)	0.281(4)	1.80837	25.50
50.557(1)	748(17)	0.281(4)	1.80837	12.75
57.46(1)	68(10)	0.21(6)	1.60260	1.17
57.61(1)	34(10)	0.21(6)	1.60260	0.58
67.81(2)	51(6)	0.41(7)	1.38096	0.88
68.00(2)	26(6)	0.41(7)	1.38096	0.44
74.124(2)	799(15)	0.241(5)	1.27813	13.62
74.339(2)	400(15)	0.241(5)	1.27813	6.81
77.26(2)	61(8)	0.29(8)	1.23392	1.03
77.49(2)	30(8)	0.29(8)	1.23392	0.52
82.90(2)	52(7)	0.42(8)	1.16368	0.88
83.15(2)	26(7)	0.42(8)	1.16368	0.44
83.89(3)	40(8)	0.4(1)	1.15246	0.68
84.14(3)	20(8)	0.4(1)	1.15246	0.34

---

- Hasil XRD 500-200

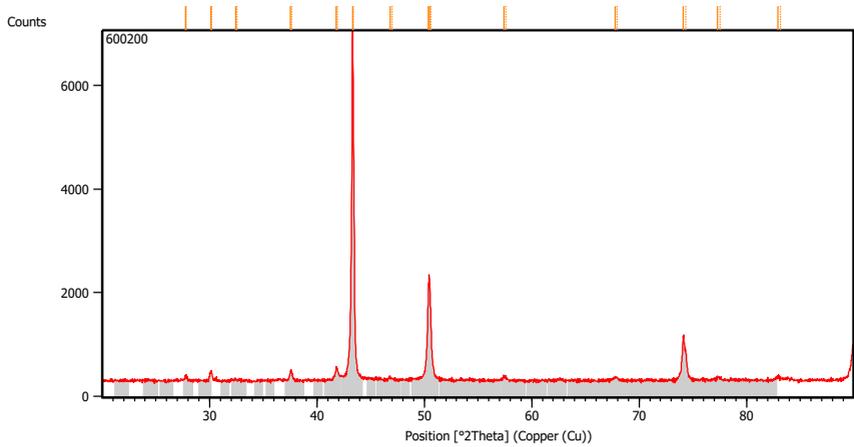


Pos. [ $^{\circ}2\theta$ .]	Height [cts]	FWHM Left [ $^{\circ}2\theta$ .]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
24.98(2)	28(6)	0.13(4)	3.56118	0.54
25.05(2)	14(6)	0.13(4)	3.56118	0.27
27.79(1)	69(10)	0.22(5)	3.20792	1.32
27.86(1)	34(10)	0.22(5)	3.20792	0.66
30.094(6)	142(20)	0.13(3)	2.96716	2.73
30.170(6)	71(20)	0.13(3)	2.96716	1.36
37.555(4)	183(10)	0.20(2)	2.39305	3.51
37.651(4)	92(10)	0.20(2)	2.39305	1.75
41.824(5)	183(10)	0.25(2)	2.15812	3.49
41.933(5)	91(10)	0.25(2)	2.15812	1.75

43.2980(4)	5225(43)	0.180(2)	2.08799	100.00
43.4110(4)	2612(43)	0.180(2)	2.08799	50.00
46.81(3)	24(4)	0.4(1)	1.93923	0.45
46.93(3)	12(4)	0.4(1)	1.93923	0.23
50.412(1)	1414(21)	0.287(3)	1.80875	27.06
50.546(1)	707(21)	0.287(3)	1.80875	13.53
57.46(1)	88(12)	0.25(6)	1.60251	1.68
57.62(1)	44(12)	0.25(6)	1.60250	0.84
67.76(1)	80(9)	0.33(6)	1.38176	1.53
67.95(1)	40(9)	0.33(6)	1.38176	0.77
74.116(2)	718(17)	0.269(4)	1.27824	13.74
74.331(2)	359(17)	0.269(4)	1.27824	6.87
77.31(1)	65(8)	0.35(5)	1.23328	1.24
77.53(1)	32(8)	0.35(5)	1.23328	0.62
83.12(2)	26(6)	0.47(7)	1.16396	0.51
83.85(2)	57(8)	0.32(8)	1.15285	1.09
84.11(2)	28(8)	0.32(8)	1.15285	0.54

---

- Hasil XRD 600-200



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
27.78(1)	62(9)	0.21(6)	3.20853	1.15
27.85(1)	31(9)	0.21(6)	3.20853	0.58
30.115(6)	154(14)	0.21(2)	2.96506	2.86
30.192(6)	77(14)	0.21(2)	2.96506	1.43
32.45(7)	17(2)	1.1(2)	2.75655	0.32
32.54(7)	8(2)	1.1(2)	2.75655	0.16
37.556(6)	131(8)	0.25(2)	2.39298	2.44
37.652(6)	66(8)	0.25(2)	2.39298	1.22
41.818(6)	160(11)	0.25(3)	2.15842	2.98
41.926(6)	80(11)	0.25(3)	2.15842	1.49

43.3021(4)	5379(44)	0.178(2)	2.08780	100.00
43.4152(4)	2690(44)	0.178(2)	2.08780	50.00
46.85(4)	24(4)	0.5(1)	1.93778	0.44
46.97(4)	12(4)	0.5(1)	1.93778	0.22
50.371(9)	798(73)	0.28(1)	1.81012	14.84
50.46(1)	814(58)	0.25(2)	1.80699	15.14
50.505(9)	399(73)	0.28(1)	1.81012	7.42
50.60(1)	407(58)	0.25(2)	1.80699	7.57
57.423(9)	92(11)	0.16(3)	1.60346	1.71
57.579(9)	46(11)	0.16(3)	1.60346	0.85
67.75(3)	50(8)	0.43(9)	1.38199	0.92
67.94(3)	25(8)	0.43(9)	1.38199	0.46
74.118(2)	736(15)	0.274(5)	1.27822	13.68
74.333(2)	368(15)	0.274(5)	1.27822	6.84
77.32(2)	60(9)	0.23(5)	1.23313	1.12
77.54(2)	30(9)	0.23(5)	1.23313	0.56
82.91(2)	51(8)	0.4(1)	1.16357	0.95
83.16(2)	25(8)	0.4(1)	1.16357	0.47

---

## LAMPIRAN C

- **Densitas dan Porositas**

P	Temperatur (°C)	Density	Rata - rata	Porositas	%pro	rata2 % pro
300	100	6,5152	6,8374	0,2557	25,57	21,89
		7,5263		0,1402	14,02	
		6,4707		0,2608	26,08	
	200	8,3703	7,3267	0,0438	4,38	12,33
		6,8069		0,2224	22,24	
		7,8465		0,1036	10,36	
400	100	7,9446	7,2727	0,0924	9,24	16,92
		7,4942		0,1439	14,39	
		6,3792		0,2712	27,12	
	200	8,2142	7,4797	0,0616	6,16	11,76
		8,3761		0,0431	4,31	
		6,5833		0,2479	24,79	
500	100	7,9220	7,4797	0,0950	9,50	14,55
		6,3472		0,2749	27,49	
		8,1700		0,0667	6,67	
	200	8,1516	7,8858	0,0688	6,88	9,91
		7,3707		0,1580	15,80	
		8,1352		0,0706	7,06	
600	100	8,3366	8,3311	0,0476	4,76	4,83
		8,2366		0,0591	5,91	
		8,4201		0,0381	3,81	
	200	8,3685	8,3789	0,0440	4,40	5,62
		8,2615		0,0562	5,62	
		8,5068		0,0282	2,82	

- **Kekerasan**

	Htot	HRF ratarata	Rumus Dalam	HV	HV ratarata
	36,67		0,02161458	46,27	
300-100	32,67	34,67	0,02305183	43,38	54,591
	68,00		0,01349002	74,13	
	52,33		0,01698542	58,87	
400-100	76,00	53,61	0,01194513	83,72	61,951
	32,50		0,02311433	43,26	
	88,50		0,00961049	104,05	
500-100	71,50	88,19	0,01280217	78,11	113,573
	104,57		0,00630702	158,55	
	109,33		0,00517375	193,28	
600-100	104,57	108,69	0,00630702	158,55	192,128
	112,17		0,00445341	224,55	
	72,33		0,01264149	79,10	
300-200	52,67	58,17	0,01690141	59,17	64,901
	49,50		0,01772080	56,43	
	64,00		0,01430848	69,89	
400-200	82,33	72,61	0,01076500	92,89	80,298
	71,50		0,01280217	78,11	
	106,67		0,00581908	171,85	
500-200	95,00	103,28	0,00834634	119,81	158,273
	108,17		0,00545979	183,16	
	112,67		0,00432232	231,36	
600-200	109,00	109,14	0,00525608	190,26	195,814
	105,77		0,00603028	165,83	

- **Kekuatan tekan dan Modulus elastisitas**

<b>Tekanan (MPa)</b>	<b>Temperatur (°C)</b>	<b>Kekuatan tekan (MPa)</b>	<b>Rata - rata</b>	<b>Modulus elastisitas (MPa)</b>	<b>Rata - rata</b>
300	100	194,404	184,9	53583,900	52785,44
		175,425	15	51957,766	4
	200	311,284	284,2	61712,018	60051,62
		257,181	32	58276,609	7
400	100	218,249	202,1	55476,385	54218,17
		186,114	81	52887,880	4
	200	332,490	341,9	62944,278	63477,67
		351,460	75	64000,809	2
500	100	225,530	250,8	56025,277	57842,82
		276,180	55	59536,094	8
	200	382,312	373,6	65636,875	65188,43
		365,036	74	64732,676	3
600	100	312,821	294,3	61803,253	60683,25
		275,820	21	59512,834	6
	200	469,858	481,4	69825,268	70337,79
		493,047	53	70841,747	2

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



---

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan analisa data dan pembahasan pada penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Variasi tekanan pada *warm compaction* tidak mempengaruhi pembentukan senyawa intermetalik dalam struktur mikro komposit Cu-Sn. Akan tetapi, penambahan tekanan kompaksi menyebabkan porositas komposit berkurang. Temperatur sangat berpengaruh dalam pembentukan senyawa intermetalik dan dibuktikan dengan persentase senyawa intermetalik meningkat pada temperatur 200°C. Dalam struktur mikri komposit Cu-10%Sn terbentuk senyawa intermetalik  $Cu_3Sn$  dan  $Cu_6Sn_5$ .
2. Semakin meningkatnya temperatur *warm compaction* semakin meningkatkan densitas, kekerasan, kekuatan tekan, dan modulus elastisitas dari komposit Cu-10 wt% Sn. Densitas tertinggi didapatkan pada tekanan 600 MPa dengan temperatur 100°C dan 200°C berturut – turut adalah 8,33 g/cm<sup>3</sup> dan 8,31 g/cm<sup>3</sup>. Nilai kekerasan didapatkan pada tekanan 600 MPa dengan temperatur 100°C dan 200°C berturut – turut adalah 192,128 dan 195,814 HV untuk temperatur. Nilai kekuatan tekan dan modulus elastisitas tertinggi didapatkan pada tekanan 600 MPa dan temperatur 200°C dengan nilai 481,453 MPa dan 70337,792 MPa

### 5.2. Saran

1. Pengerjaan *warm compaction* dilanjutkan dengan proses *sintering* agar terlihat dengan jelas perbedaan pembentukan fasa saat pengamatan SEM
2. Pembuatan dies menggunakan material yang memiliki sifat *red hardness* yang memiliki kemampuan tahan terhadap pengerjaan panas.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- \_\_\_\_\_. 1992. **ASM Metal Handbook Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. Ohio: ASM International.
- \_\_\_\_\_. 1998. **ASM Metal Handbook Volume 7 Powder Metal Technologies and Applications**. Ohio: ASM International.
- Banovic, S. 2007. **Microstructural characterization and mechanical behavior of Cu–Sn frangible bullets**. *Materials Science and Engineering*, 428-435.
- Benini, S. 2001. *Patent No. 6,263,798 B1*. USA.
- Bocchini, G. 1998. **The Warm Compaction Process : Basics, Advantages, and Limitation**. Society of Automotive Engineers.
- Chagnon, F. 1992. **Effect of Compaction Temperature on the Sintered Properties of High Density P/M Materials**. In *Advances in Powder Metallurgy and Particular Materials* (pp. 106 - 126). Metal Powders Industrial Federation.
- Elliot, K. 2004. **Medium Density Bronze Shot**. *Patent No. WO 2004/090464 A1*.
- Fintová, R. K. 2012. **Copper and Copper Alloys: Casting, Classification and Characteristic Microstructures**. Rijeka, Croatia: InTech.
- German, R. 1984. **Powder Metallurgy Science**. USA: Metal Powder Industries Federation.
- Hanejko, F. G. 1998. **Warm Compaction**. In Y. T. P.W.Lee, *ASM Handbook Vol.7: Powder Metal Technologies and Application* (pp. 376-381).
- Hansen. 2008. *Patent No. 7,392,746*. USA.
- Komenda, J. 2013. **Frangible Bullets: Wounding Capability and Clinical Aspects of Their Use**. Rusia: Povodni Prace.
- Kruachatturat. 2009. **Sintering Cu-Sn Materials for Frangible Bullets**. *The 3rd Thailand Metallurgical Conference*. Bangkok, Thailand.

- Kruzhanov, V.S. 1992. **Effect of Dispersion of Powder on The Hot Compaction Temperature of Brass**. Plenum Publishing Corporation, Khar'kov Institute University, Rusia.
- Leo, Ngai Tungwai. 2005. **Warm Compaction Powder Metallurgy of Cu**. *Trans. Nonferrous Met. Soc. Guangzhou*, China.
- LI Jian, R. J.-L. 2013. **The Material Behavior and Fracture Mechanism of a Frangible Bullet Composite**. *CHIN.PHYS.LEFT*, Vol. 30, No.7.
- Martinez. 2013. *Patent No. 8,365,672 B2*. USA.
- Miller, D. M. 2008. **Frangible Bullet**. *AFTE Journal*, 91-96.
- Neikov, O. D. 2009. **Production of Copper and Copper Alloy Powders**. In *O. D. Neikov, Handbook of Non-Ferrous Metal Powders* (pp. 330 - 366 ). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Ngai TI, K. Y. 2007. **Warm compaction forming of a binder-treated Fe-base material**. *Proceedings of Sino-Swedish structural materials Symposium*, (pp. 77-81).
- Rydlo, M. 2010. **Theoretical Criterion for Evaluation of The Frangibility Factor**. *Advances in Military Technology*, Vol 5, No.2.
- S. W. Banovic, S. P. 2008. **Microscopic fracture mechanisms observed on Cu-Sn frangible bullets under quasi-static and dynamic compression**. *J Mater Sci*, 4840-4848.
- S.S.Feng. 2011. **Effect Lubricants on Warm Compaction Process of Cu-based Composite**. *Composite:Part B*, 933-939.
- Skočovský, P. e. 2006. **Material sciences for the fields of mechanical engineering**. Zilina, Slovak Republic.
- Upadhyaya, A. 2002. **Densification of Pre-Mixed and Prealloyed Cu-12Sn Bronze During Microwave and Conventional Sintering**. New Jersey, USA: Federation Princeton.

## BIODATA PENULIS



**Nanda Hendra Pratama**, lahir di Bekasi, Jawa Barat pada tanggal 13 Mei 1994. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal yaitu di SD Negeri Kertajaya XII, SMP Negeri 1, dan SMA Negeri 2 Surabaya. Setelah lulus SMA, pada tahun 2012 penulis diterima di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui jalur SNMPTN

Undangan. Semasa kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi di luar maupun di dalam kampus. Penulis pernah menjadi ketua nanoclub di ITS tahun kepengurusan 2012 - 2013 dan staff di IECC (ITS Education Care Center) BEM ITS tahun kepengurusan 2012 - 2013. Penulis juga aktif menjadi finalis dalam kegiatan perlombaan karya tulis ilmiah nasional yang diadakan PTN maupun DIKTI.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT ISARGAS pada bulan Januari 2015. Selama kerja praktek penulis menangani masalah proteksi perlindungan pipa serta perancangan sistem jalur pipa gas

Tugas akhir yang diambil penulis dalam topik Material Inovatif berjudul “Pengaruh Variasi Tekanan Dan Temperatur Kompaksi Terhadap Struktur Mikro Dan Sifat Mekanik Komposit Cu-10%Sn Dengan 0,5% Zink Stearate Sebagai Material Frangible Bullet.”

