



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH TEMPERATUR SINTER DAN UKURAN
PARTIKEL GARAM KARBONAT TERHADAP STRUKTUR
PORI TEMBAGA BUSA DENGAN METODA *SINTERING* DAN
PELARUTAN GARAM KARBONAT**

SKRIPSI

**KHALID MAWARDI
0405040406**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
DESEMBER 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH TEMPERATUR SINTER DAN UKURAN
PARTIKEL GARAM KARBONAT TERHADAP STRUKTUR
PORI TEMBAGA BUSA DENGAN METODA *SINTERING* DAN
PELARUTAN GARAM KARBONAT**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**KHALID MAWARDI
0405040406**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL
KEKHUSUSAN LOGAM
DEPOK**

DESEMBER 2009
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Khalid Mawardi
NPM : 0405040406
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : *Pengaruh Temperatur Sinter dan Ukuran Partikel
Garam Karbonat Terhadap Struktur Pori Tembaga Busa Dengan Metoda
Sintering dan Pelarutan Garam Karbonat*

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Sri Harjanto (.....)
Penguji 1 : Dwi Marta Nurjaya, ST, MT (.....)
Penguji 2 : Ir. Rahmat Saptono, M.Sc.Tech (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 29 Desember 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Ir. Sri Harjanto selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan baik moral maupun material; dan
- (3) sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu metalurgi dan material ke depan.

Depok, 21 Desember 2009

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Khalid Mawardi
NPM : 0405040406
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Pengaruh Temperatur Sinter dan Ukuran Partikel Garam Karbonat Terhadap StrukturPori Tembaga Busa Dengan Metoda Sintering dan Pelarutan Garam Karbonat

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya,

Dibuat di: Depok
Pada tanggal : 21 Desember 2009
Yang menyatakan

(Khalid Mawardi)

ABSTRAK

Nama : Khalid Mawardi
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Temperatur Sinter dan Ukuran Partikel Garam Karbonat Terhadap Struktur Pori Tembaga Busa Dengan Metoda *Sintering* dan Pelarutan Garam Karbonat

Metalurgi serbuk merupakan salah satu proses produksi logam busa yang banyak digunakan untuk memperoleh struktur pori yang seragam. Dengan menggunakan variasi temperatur sinter 825°C, 850 °C, 900 °C dan 950°C serta variasi rata-rata ukuran partikel garam karbonat sebesar 841 µm, 542 µm, dan 420 µm, memberikan pengaruh terhadap berbedanya struktur pori yang terbentuk pada tembaga busa pada masing-masing variabel.

Penelitian ini bertujuan agar struktur pori yang terbentuk pada tembaga busa yang diproduksi dengan metoda ini dapat dikontrol sesuai dengan variabel yang digunakan.

Penelitian ini menunjukkan bahwa dengan semakin tingginya temperatur sinter, maka tingkat porositas tembaga busa akan semakin menurun hingga mencapai 71,748% dan densitasnya akan semakin meningkat hingga mencapai 2,531 gr/cm³ pada temperatur 950°C selama 2 jam. Hasil pengamatan makro dan mikro yang dilakukan juga menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur sinter dan semakin kecil ukuran butir garam karbonat, maka semakin banyak terbentuk sel pori yang bersifat terbuka.

Kata kunci:

Tembaga busa, kalium karbonat, *sintering*, pelarutan karbonat

ABSTRACT

Name : Khalid Mawardi
Major : Teknik Metalurgi dan Material
Title : Effect of Sintering Temperature and Particle Size of Carbonate to Pore Structure of Copper Foam by Lost Carbonate Sintering Process

Powder metallurgy is one kind of process to produce metal foam that is commonly used to achieve uniformity of pore structure. By using the temperatures 825°C, 850 °C, 900 °C, 950°C in sintering process and 841 µm, 542 µm, 420 µm particle size of carbonate, have affected the differences in pore structures that are formed in the copper foam at each variabel.

The purpose of this research is to control the pore structure in the copper foam that were made by this process by using the variation of sintering temperatures and particle sizes of carbonate.

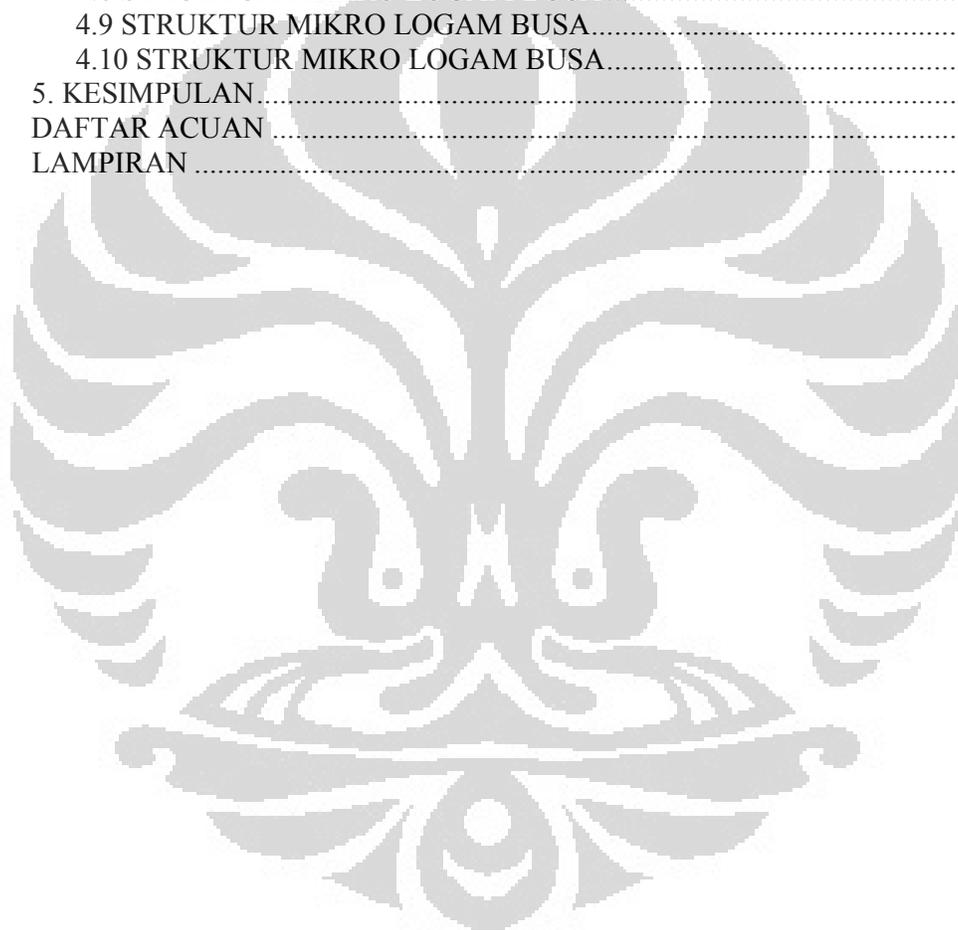
The results show that the higher the temperature is used in sintering, the copper foam will have lower porosity as 71,748% and higher density as 2,531 gr/cm³ at 950 °C for 2 hours. In addition, macrostructure and microstructure observation show that the higher the temperature is used in sintering and the smaller the particle size is used as the filler, the more opened cell pores are formed.

Keyword:
Copper foam, potassium carbonate, sintering, lost carbonate

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iv
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	2
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	3
1.4 Sistematika Penelitian.....	3
2. STUDI LITERATUR.....	5
2.1 BUSA LOGAM.....	5
2.2 JENIS-JENIS PROSES PEMBUATAN BUSA LOGAM	7
2.2.1 Metoda Peniupan Gas	7
2.2.2 Metoda <i>Blowing agents</i>	9
2.2.3 Metoda Solidifikasi Solid-Gas Eutektik	11
2.2.4 Metoda Serbuk.....	11
2.2.5 Metoda <i>Thixo-casting (Thixofoam)</i>	12
2.2.6 Metoda <i>Formgrip/Formcarp</i>	12
2.2.7 Metoda <i>Casting</i> dengan Busa Polimer.....	12
2.3 PROSES <i>SINTERING</i> DAN PELARUTAN	13
2.3.1 Proses Sinter	14
2.3.1.1 <i>Sintering</i> fasa cair.....	16
2.3.1.2 <i>Sintering</i> fasa padat	16
2.3.2 Proses Pelarutan.....	19
3. METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN	21
3.2 BAHAN-BAHAN PENELITIAN.....	22
3.3 PERALATAN PENELITIAN.....	22
3.4 PROSEDUR PENELITIAN	23
3.4.1 Karakterisasi Serbuk	23
3.4.2 Persiapan Serbuk	23
3.4.2.1. Pengayakan	24
3.4.2.2. Penimbangan.....	24
3.4.2.3. Pencampuran	25
3.4.2.4. Kompaksi Serbuk	26
3.4.2.5. <i>Sintering</i>	27
3.4.2.6. Pelarutan	29
3.4.3 Pengujian.....	30
3.4.3.1. Densitas dan Porositas	30

3.4.3.2. Foto Makro.....	31
3.4.3.3. Kekuatan Tekan.....	32
3.4.3.4. Foto Mikro	32
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 KARAKTERISTIK BAHAN	34
4.2 PENCAampurAN DAN PENGADUKAN.....	35
4.3 BAKALAN HASIL KOMPAKSI	36
4.4 BAKALAN HASIL SINTER	37
4.5 DENSITAS LOGAM BUSA	38
4.6 POROSITAS LOGAM BUSA.....	40
4.7 KEKUATAN TEKAN LOGAM BUSA	42
4.8 STRUKTUR MAKRO LOGAM BUSA	44
4.9 STRUKTUR MIKRO LOGAM BUSA.....	49
4.10 STRUKTUR MIKRO LOGAM BUSA.....	51
5. KESIMPULAN.....	59
DAFTAR ACUAN	60
LAMPIRAN	62

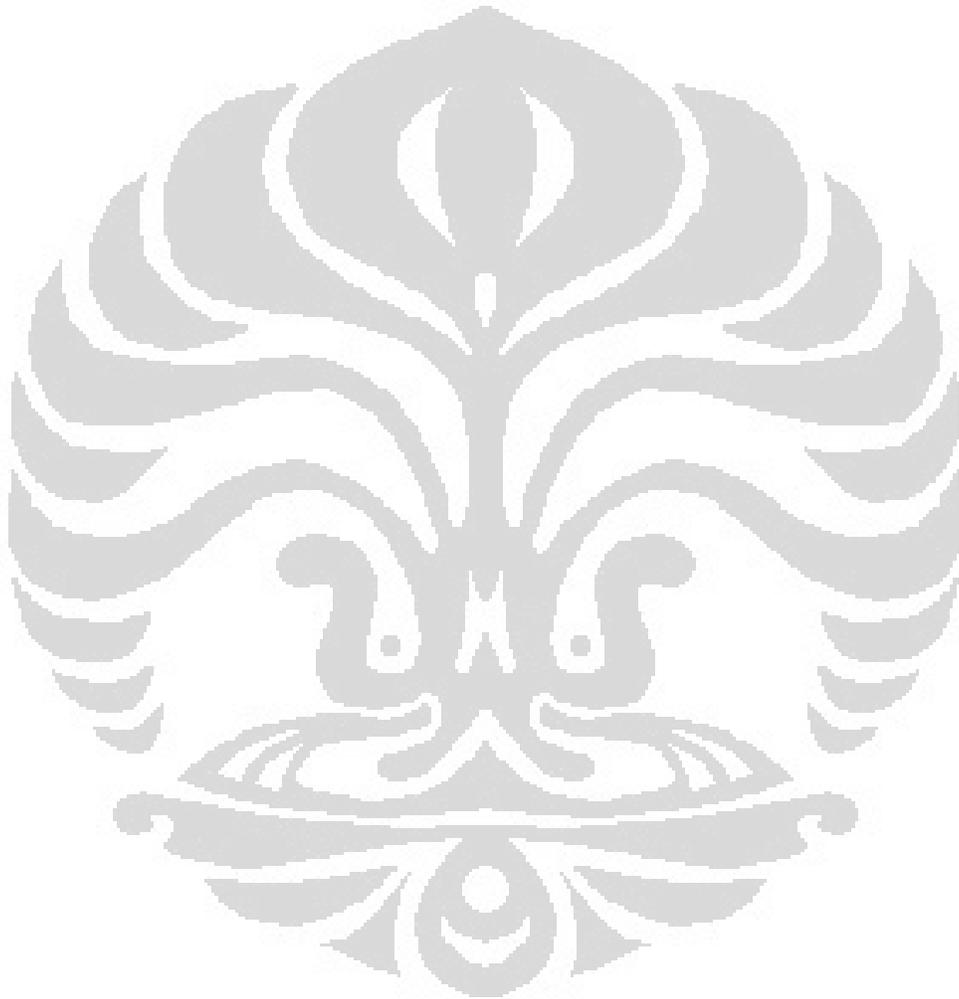


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 (a) Busa aluminium dengan berbagai ukuran pori,(b) Logam busa	.5
Gambar 2.2 (a) Bentuk logam busa sel tertutup dan (b) sel terbuka	.....6
Gambar 2.3 Jenis Metoda yang dapat digunakan untuk fabrikasi logam busa	.....7
Gambar 2.4 Metoda injeksi gas	.....8
Gambar 2.5 Pengaruh ukuran partikel terhadap pembentukan pori	.....9
Gambar 2.6 Skema metoda <i>blowing agents</i>	.....10
Gambar 2.7 Skema metoda kompaksi serbuk	.....12
Gambar 2.8 Skema metoda casting dengan busa polimer (<i>investment casting</i>)	..13
Gambar 2.9 Skema proses sinter dan pelarutan garam karbonat	.....14
Gambar 2.10 Pembentukan neck pada saat proses sinter	.....15
Gambar 2.11 Perpindahan permukaan	.....17
Gambar 2.12 Perpindahan bulk	.....17
Gambar 2.13 Tahapan ikatan antar serbuk dalam proses sinter	.....19
Gambar 2.14 Pengaruh waktu sinter terhadap material	.....19
Gambar 2.15 Ilustrasi pelarutan garam pada logam busa. (a)garam terlarut sempurna karena saling terhubung (b) ada garam yang tidak larut dalam matriks logam	.....21
Gambar 3.1 Timbangan analitik digital	.....25
Gambar 3.2 (a) Wadah silinder untuk mencampur serbuk(b) dan mesin bubut	..26
Gambar 3.3 (a) <i>Dies</i> atau cetakan, dan (b) mesin kumpaksi Krisbow	.....27
Gambar 3.4 Dapur gas Nabertherm	.....28
Gambar 3.5 Proses pelarutan karbonat dengan <i>magnetic stirrer</i>	.....29
Gambar 3.6 Posisi sampel (a) dan mesin uji tekan Schenck Trebel (b)	.....33
Gambar 4.1 Serbuk bahan pembuat tembaga busa hasil pencampuran dan pengadukan	.....35
Gambar 4.2 Foto bakalan kompaksi dari penampakan atas (a) dan penampakan samping (b)	.....36
Gambar 4.3 Bakalan hasil <i>sintering</i> pada penampakan samping (a) dan penampakan muka (b)	.....37

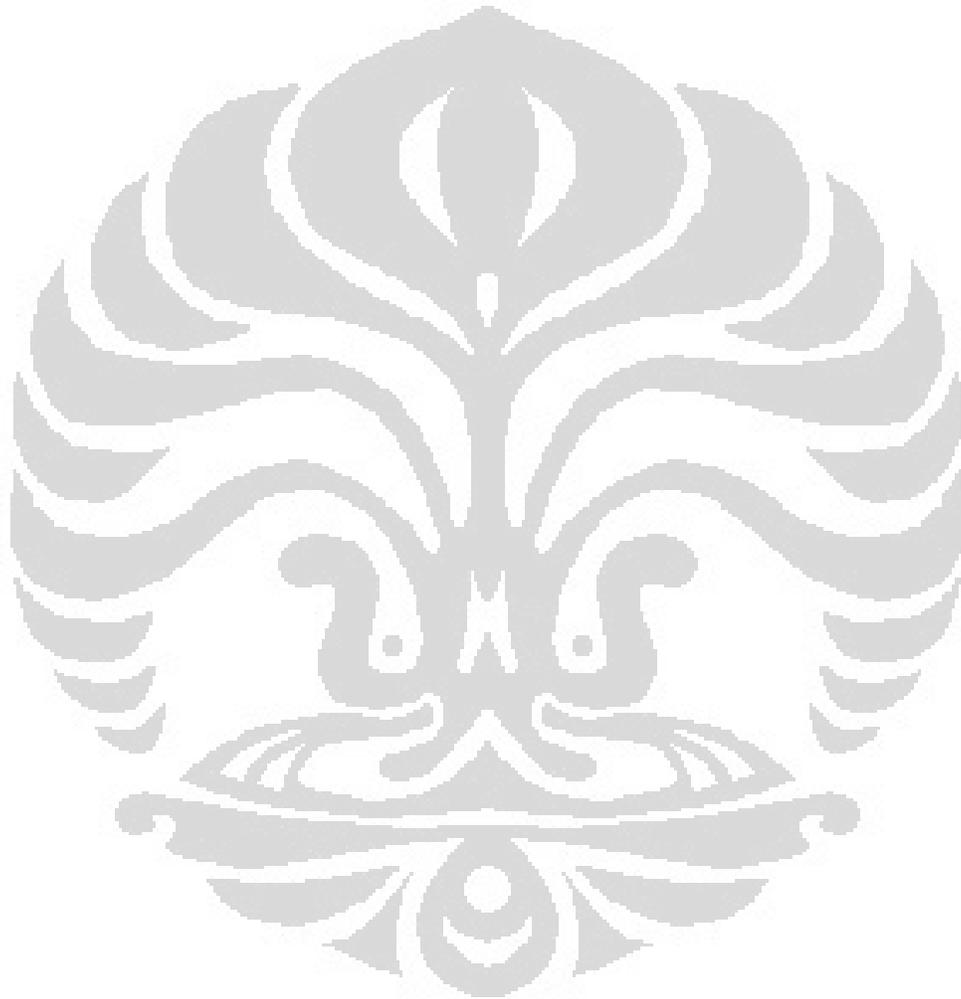
Gambar 4.4	Grafik hubungan ukuran partikel dan temperatur sinter (825°C, 850°C, 900°C, dan 950°C) selama 2 jam dengan nilai densitas logam	39
Gambar 4.5	Grafik hubungan ukuran partikel dan temperatur sinter selama 2 jam dengan nilai porositas logam	41
Gambar 4.6	Grafik kekuatan tegangan tekan hasil pengujian sampel tembaga busa pada tiap temperatur sinter selama 2 jam	42
Gambar 4.7	Grafik kekuatan regangan tekan hasil pengujian sampel tembaga busa pada tiap temperatur sinter selama 2 jam	42
Gambar 4.8	Struktur pori tembaga busa dengan rata-rata ukuran partikel garam 842 μm (perbesaran 10 x). proses sinter 825°C(a), proses sinter 850°C(b), proses sinter 900°C(c), dan proses sinter 950°C(d) dan dengan waktu tahan sinter selama 2 jam.....	45
Gambar 4.9	.Struktur pori sampel dengan proses temperatur sinter 850°C selama 2 jam(perbesaran 10x).ukuran partikel rata-rata garam 842 μm (a), ukuran partikel rata-rata garam 541 μm (b), ukuran partikel rata-rata garam 420 μm (c)	47
Gambar 4.10	Grafik hubungan ukuran butir garam karbonat dengan rata-rata diameter pori yang terbentuk pada tembaga busa pada masing-masing temperatur sinter dengan waktu tahan selama 2 jam.....	48
Gambar 4.11	Foto struktur mikro pembentukan fasa Cu pada tembaga busa dengan ukuran rata-rata partikel garam 842 μm dan pada temperatur sinter 825°C(a), 850°C(b), 900°C(c), dan 950°C(d).....	50
Gambar 4.12	Foto SEM tembaga busa yang disinter dengan temperatur 825°C selama 2 jam. a) ukuran partikel karbonat 842 μm , b) ukuran partikel karbonat 541 μm , c) ukuran partikel karbonat 420 μm	51
Gambar 4.13	Foto SEM tembaga busa yang disinter dengan temperatur 850 °C selama 2 jam. a) ukuran partikel karbonat 842 μm , b) ukuran partikel karbonat 541 μm , c) ukuran partikel karbonat 420 μm . Contoh interkoneksi pori ditandai dengan lingkaran berwarna merah.	53
Gambar 4.14	Foto SEM tembaga busa yang disinter dengan temperatur 900°C selama 2 jam. a) ukuran partikel karbonat 842 μm , b) ukuran partikel karbonat	

541 μm , c) ukuran partikel karbonat 420 μm . Contoh interkoneksi pori ditandai dengan lingkaran berwarna merah.. ..	54
Gambar 4.15 Foto SEM tembaga busa yang disinter dengan temperatur 950°C selama 2 jam. a) ukuran partikel karbonat 842 μm , b) ukuran partikel karbonat 541 μm , c) ukuran partikel karbonat 420 μm . Contoh interkoneksi pori ditandai dengan lingkaran berwarna merah.. ..	56



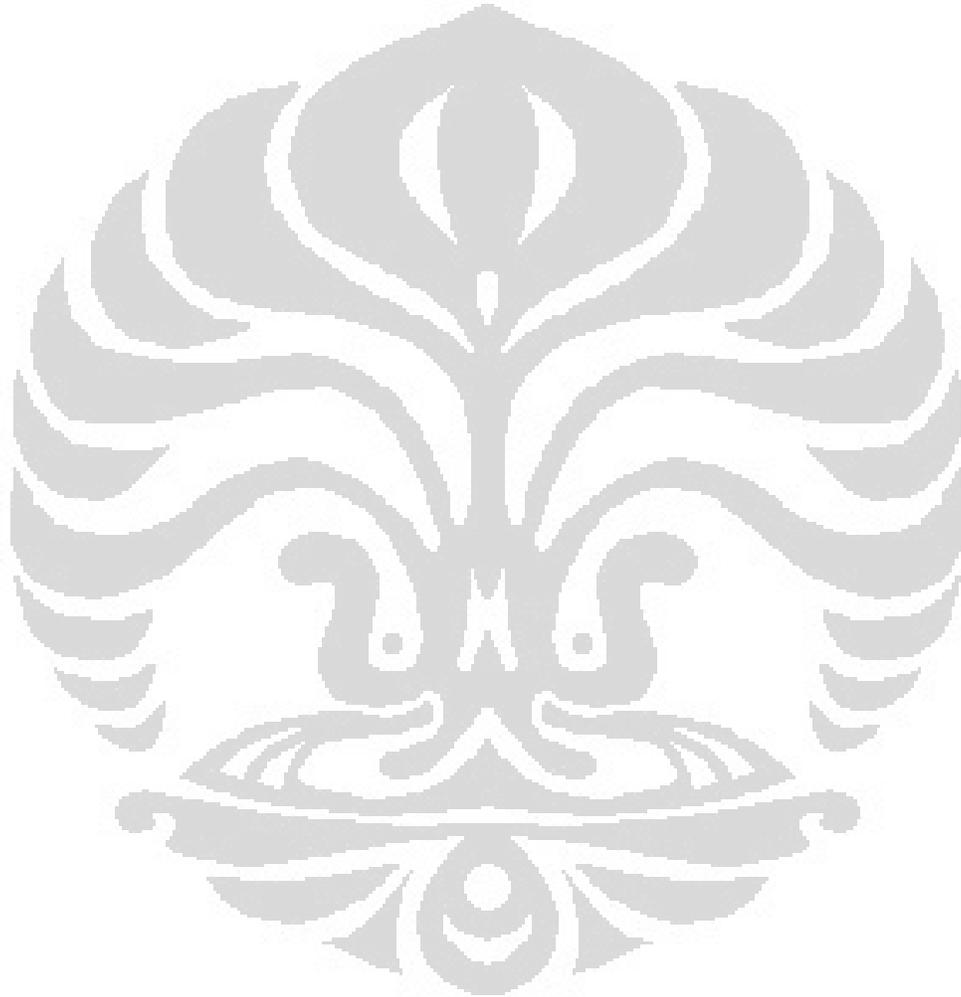
DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Penandaan Sampel Percobaan.....	25
Tabel 4.1	Data mengenai serbuk logam serta garam dan <i>binder</i> yang digunakan dalam pembuatan tembaga busa.....	34



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	DATA DENSITAS DAN POROSITAS.....	61
Lampiran 2	GRAFIK UJI TEKAN DARI MESIN SCHRENCK TREBEL.....	63
Lampiran 3	DATA HASIL PERHITUNGAN KEKUATAN TEKAN TEMBAGA BUSA	67



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Kemajuan berbagai industri di dunia juga turut mendorong meningkatnya permintaan akan bahan baku industri yang dibutuhkan dalam proses produksi. Hal ini juga terjadi pada industri otomotif yang berkembang di Indonesia. Meningkatnya jumlah produksi juga mendorong tingginya permintaan akan bahan baku industri otomotif. Diantara bahan baku produksi yang digunakan berasal dari jenis logam.

Hingga saat ini, logam masih menjadi jenis material yang banyak digunakan, baik dalam skala industri ataupun rumah tangga. Karena selain memiliki beberapa kelebihan dibandingkan jenis material lain seperti polimer, tiap jenis logam juga memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda antara satu dan lainnya, sehingga banyak dikembangkan untuk mendapatkan sifat atau karakteristik tertentu yang lebih baik. Diantaranya adalah karena berat jenis yang besar yang bisa menjadi salah satu kekurangan dalam aplikasinya, maka mulai dikembangkan material logam dengan berat jenis yang lebih kecil namun memiliki sifat yang sama atau bahkan lebih baik dibandingkan material logam yang sejenis.

Sebagai contoh di bidang otomotif, dimana berat kendaraan yang ada juga mempengaruhi konsumsi bahan bakar. Semakin besar berat kendaraan, semakin besar pula konsumsi bahan bakarnya. Sebaliknya, apabila berat kendaraan dikurangi bobotnya, maka hal ini berdampak pada menurunnya nilai keselamatan terhadap penumpang. Selain itu, pengurangan berat kendaraan juga berdampak kepada menurunnya nilai kenyamanan. Dimana ketika menurunkan berat kendaraan yang menggunakan material logam konvensional, maka akan mengurangi ukuran kendaraan yang juga berdampak pada berkurangnya ruang untuk penumpang.

Sedangkan apabila ruang mesin juga diturunkan, maka akan berpengaruh pada proses kinerja di dalam ruang mesin seperti proses

pendinginan dan peredaman suara bising yang berasal dari mesin. Hal ini tentunya akan menambah biaya tersendiri untuk mengatasi permasalahan-permasalahan tersebut. Karena itu, aplikasi material yang ringan dan dengan sifat-sifat yang sesuai dapat menjadi suatu solusi dimana pengurangan berat kendaraan tidak akan mengurangi nilai keselamatan dan kenyamanan pengendara.

Diantara material yang dapat menjadi solusi adalah busa logam. Material ini mulai dikembangkan karena memiliki keunggulan sifat-sifat yang dibutuhkan, yaitu memiliki berat jenis yang rendah, nilai kekakuan yang tinggi, kemampuan menyerap energi impak dan tumbukan yang baik, pengisolasi panas dan suara yang baik, memiliki konduktifitas panas dan listrik yang rendah serta mampu didaur ulang.

Namun tingginya biaya produksi logam busa, baik dari segi prosesnya ataupun bahan bakunya, menyebabkan masih sedikitnya pemanfaatan material ini di Indonesia, baik dalam skala produksi ataupun rumah tangga. Karena itu, perlu ada pengembangan lebih lanjut, sehingga bisa didapatkan busa logam dengan biaya produksi yang lebih murah. Diantara proses fabrikasi busa logam yang lebih murah dan sederhana adalah dengan SDP (*Sintering & Dissolution Process*).

Proses SDP ini melibatkan proses metalurgi serbuk, sehingga memiliki beberapa keuntungan diantaranya adalah bentuk yang hampir sama dengan cetakan, struktur butir yang halus, lebih mudah melakukan paduan dan komposit yang sulit dicampur dengan cara peleburan, penggunaan bahan baku yang efisien, mengurangi proses permesinan serta pengontrolan densitas dan porositas yang lebih mudah.

1.2. TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mempelajari proses pembuatan busa logam dengan metoda *sintering* dan pelarutan.
2. Mengetahui pengaruh temperatur sinter dan ukuran partikel garam karbonat dalam pembuatan tembaga busa.

3. Mengetahui sifat-sifat fisik dan morfologi dari tembaga busa.

1.3. RUANG LINGKUP PENELITIAN

Batasan ruang lingkup penelitian ini adalah:

1. Bahan baku penelitian:
 - a. Material serbuk Cu
 - b. Material serbuk K_2CO_3
 - c. Material serbuk *zinc stearate*
 - d. Ethanol
2. Pembuatan logam busa ini menggunakan campuran serbuk Cu, serbuk K_2CO_3 sebagai pembentuk pori dengan variasi ukuran partikel, *zinc stearate* sebagai pelumas, ethanol sebagai *binder* dan dilanjutkan dengan proses metalurgi serbuk dari proses *mixing*, kompaksi, *sintering* hingga proses pelarutan garam dalam air.
3. Fraksi berat garam yang digunakan adalah 50%
4. Variabel rata-rata ukuran partikel garam karbonat yang digunakan adalah 841 μm , 542 μm , dan 420 μm .
5. Tekanan pada proses kompaksi yang digunakan adalah 200 bar dan dilakukan selama 15 detik.
6. Penyinteran dilakukan pada temperatur 825°C, 850°C, 900°C dan 950°C masing-masing selama 2 jam.
7. Pengujian yang dilakukan yaitu pengujian densitas, porositas, kekuatan tekan dan morfologi.

1.4. SISTEMATIKA PENELITIAN

Sistematika penelitian yang digunakan adalah:

1. BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini diuraikan mengenai latar belakang penelitian, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penelitian.

2. BAB II STUDI LITERATUR

Pada bab ini menjelaskan teori-teori yang mendukung penelitian.

3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

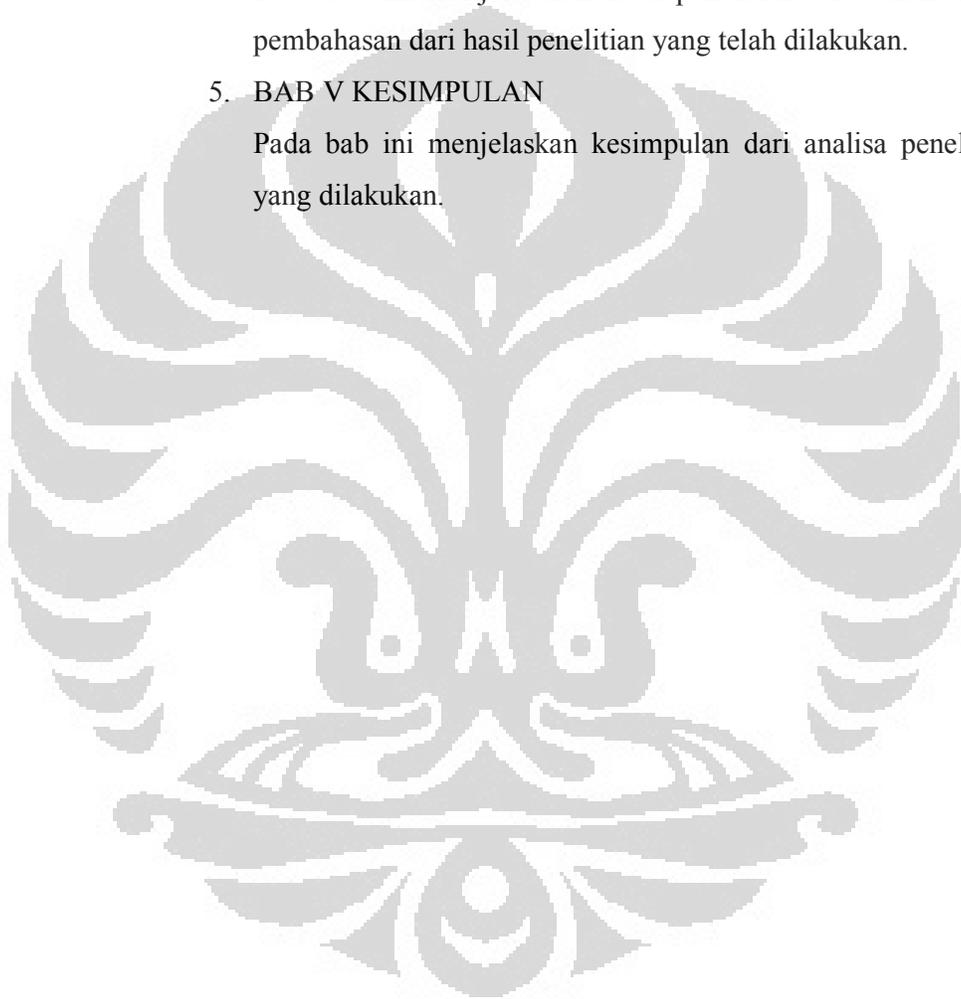
Pada bab ini menjelaskan jenis metode penelitian yang digunakan serta langkah-langkahnya.

4. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan hasil penelitian serta analisa dan pembahasan dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

5. BAB V KESIMPULAN

Pada bab ini menjelaskan kesimpulan dari analisa penelitian yang dilakukan.

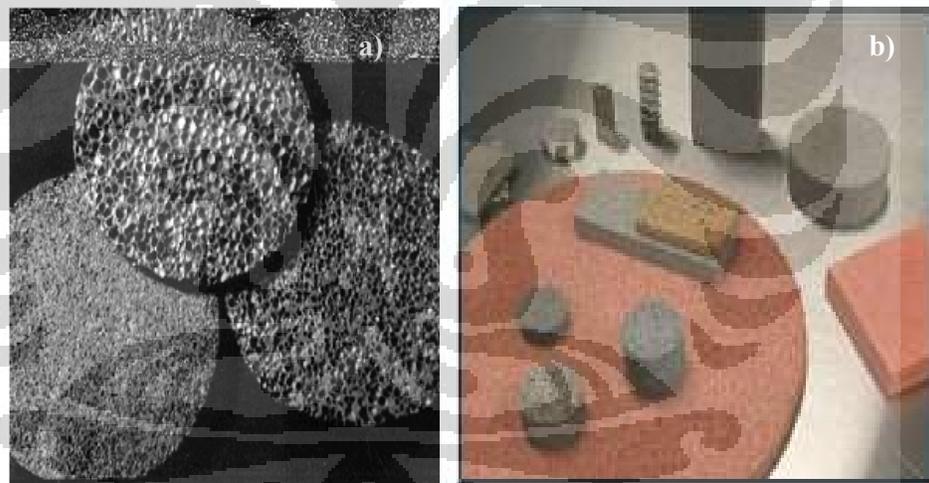


BAB II STUDI LITERATUR

2.1. BUSA LOGAM

Busa logam merupakan suatu material yang memiliki tingkat porositas tinggi (70-95%)^[1]. Sebagai material mutakhir, busa mulai dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan akan material yang memiliki sifat mekanis dan fisis tertentu yang baik.

Sebagai contoh dimana aplikasi logam busa banyak digunakan adalah pada industri otomotif. Dalam industri otomotif, logam memiliki peranan yang sangat besar, yaitu sebagai bahan dasar rangka dan blok mesin. Namun hal ini juga menjadi suatu masalah karena dengan berat jenis logam yang besar juga menyebabkan meningkatnya konsumsi bahan bakar pada kendaraan.



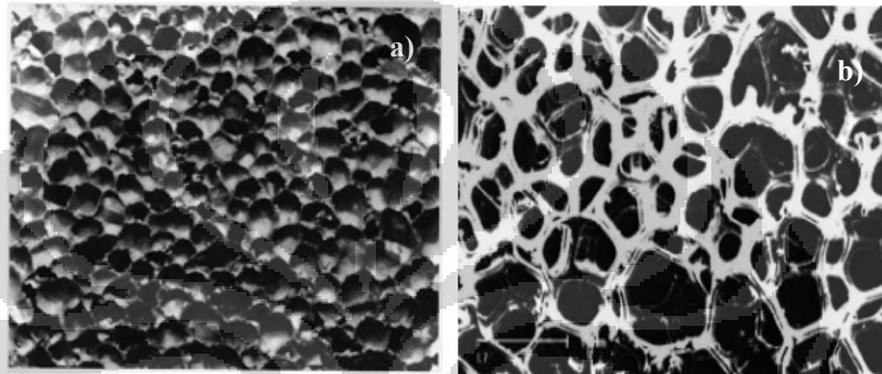
Gambar 2.1. Busa aluminium dengan berbagai ukuran pori (a) Logam busa (b) ^[2]

Pori yang terdapat dalam busa logam menjadikan material memiliki karakteristik sebagai berikut^[1]:

- material ringan, yang diakibatkan pori dalam busa logam. Adanya pori ini, selain merendahkan kerapatan material juga bisa memberikan nilai kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan logam konvensional.
- Penyerap energi, dimana banyaknya pori akan dapat banyak menyerap energi mekanik yang besar ketika mengalami deformasi, dan nilai kekuatan tarik yang hampir sama dengan kekuatan tekan.

- Penghalang panas dan peredam suara, pori dapat meredam suara dan menyebabkan nilai konduktifitas panas material menjadi rendah.

Secara umum, busa logam terdiri dari dua jenis pori, yaitu pori terbuka dan pori tertutup (gambar 2.2). Logam busa dengan pori tertutup memiliki struktur pori yang saling tertutup antara satu pori dengan yang lainnya. Sedangkan logam busa dengan pori terbuka memiliki struktur pori yang saling terhubung antara satu pori dengan pori lainnya.



Gambar 2.2. Bentuk logam busa (a) sel tertutup dan (b) sel terbuka ^[2]

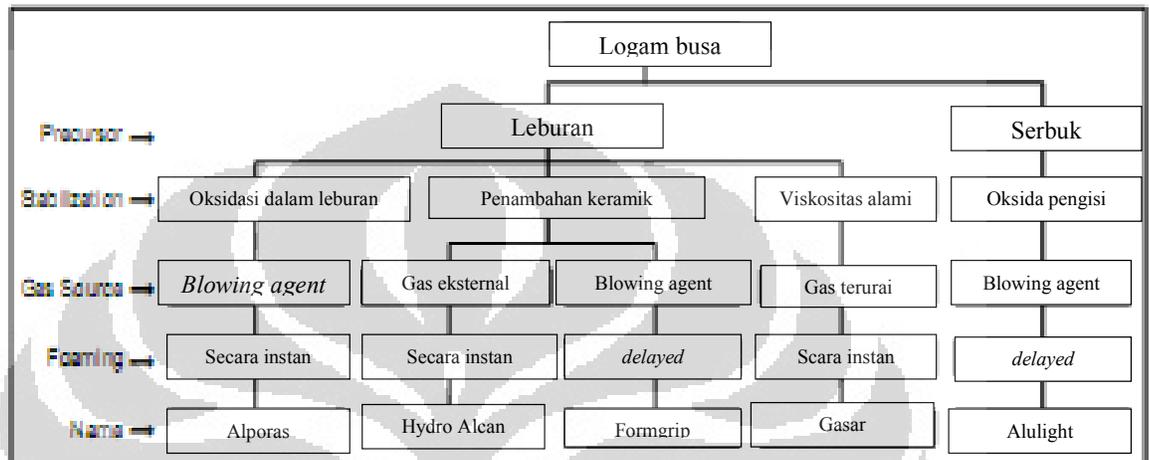
Pembuatan logam busa saat ini masih didominasi oleh logam aluminium ^[3]. Hal ini dikarenakan beberapa sifat fisis yang dimiliki aluminium yaitu berat jenis yang ringan dan sifat mekanis yang lebih baik dibandingkan material logam lain pada umumnya. Selain itu titik lebur yang rendah yang dimiliki oleh aluminium dapat membuat biaya produksi logam busa menjadi lebih murah dibandingkan dengan pembuatan logam busa berbahan baku logam lain yang titik leburnya lebih tinggi dibandingkan aluminium.

Namun selain itu, tembaga juga menjadi salah satu logam yang dapat dilakukan proses pembuatan logam busa. Dengan memanfaatkan sifat konduktivitas termal dan listrik yang baik, logam tembaga busa biasa diaplikasikan sebagai pendingin pada komputer, penyerap suara yang baik pada aplikasi temperatur tinggi dan pipa panas untuk memindahkan panas.

Dengan adanya pori pada tembaga busa akan membuat luas area permukaan menjadi lebih besar. Sehingga pemindahan listrik atau panas akan menjadi lebih efektif dan efisien.

2.2. JENIS-JENIS PROSES PEMBUATAN BUSA LOGAM

Sejak mulai dikembangkan pada tahun 1980 hingga saat ini, telah dikembangkan beberapa metoda baru dalam proses pembuatan busa logam (gambar 2.3).

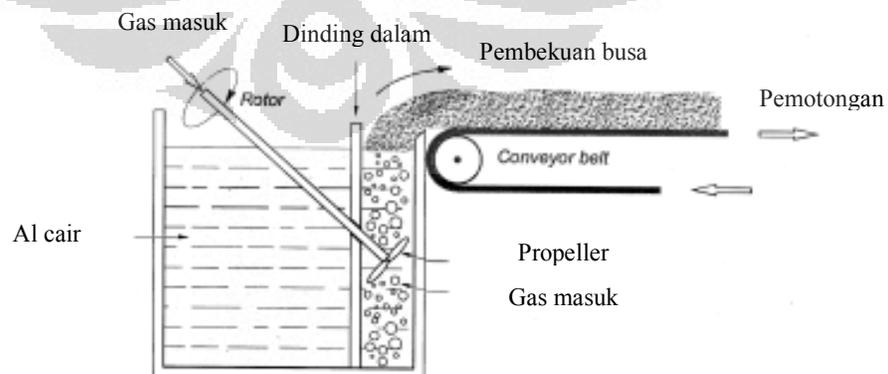


Gambar 2.3. Jenis Metoda yang dapat digunakan untuk fabrikasi logam busa^[6].

Jenis metoda yang dapat digunakan untuk memproduksi logam busa diantaranya^[5]:

2.2.1. Metode Peniupan Gas

Pada metoda ini diawali dengan pemberian partikel tambahan seperti silicon karbida, alumina, atau magnesium oksida yang berfungsi untuk membentuk dan menstabilkan pori di dalam busa logam.



Gambar 2.4. Metoda injeksi gas^[6].

Pada saat peleburan logam dan paduannya, setelah melebur sempurna, partikel penstabil pori akan ditambahkan ke dalam leburan logam. Setelah itu diaduk hingga serbuk tersebut merata ke seluruh leuran logam.

Setelah proses pengadukan selama beberapa waktu, selanjutnya dilakukan proses peniupan gas (oksigen, nitrogen, atau udara) ke dalam cairan aluminium melalui impeller yang berputar, sehingga menghasilkan gelembung gas yang tersebar dan baik (lihat gambar 2.4). Gelembung yang terbentuk selanjutnya akan mengapung di permukaan cairan dan ditarik ke luar permukaan dengan *belt conveyor* dan dilanjutkan dengan proses pembekuan.

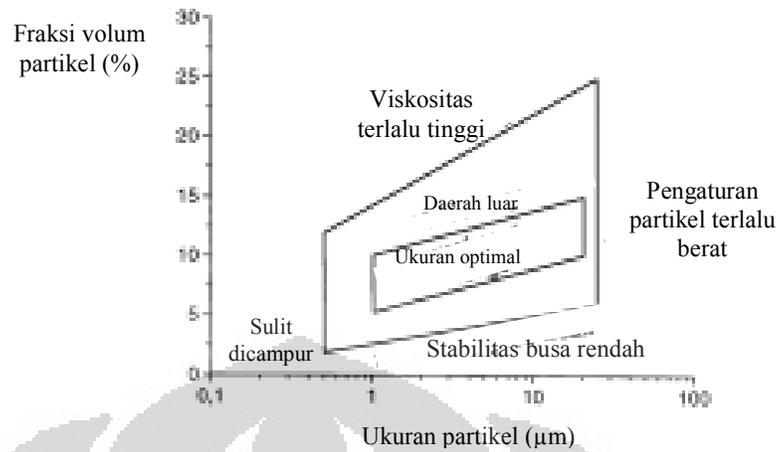
Untuk menjaga agar busa logam yang dihasilkan tidak getas karena adanya oksida, maka gas yang digunakan untuk pembentukan gelembung adalah gas inert. Sedangkan untuk menjaga kekentalan leburan logam, proses pembuatan dilakukan dekat dengan titik lebur logam.

Diantara kelebihan dari metoda peniupan gas ini adalah:

- biaya produksi yang murah dan sederhana
- material dasar murah, karena juga dapat memakai material bekas.
- ukuran dan kapasitas produksi besar
- kerapatan dapat dikontrol dengan baik.
- pori yang terbentuk merupakan jenis pori tertutup.

Namun di samping itu, material dari proses ini juga memiliki beberapa kekurangan, yaitu:

- kurang baik digunakan pada komponen yang lebih kompleks.
- adanya partikel oksida tambahan menyebabkan proses pemotongan dan permesinan menjadi lebih sulit.

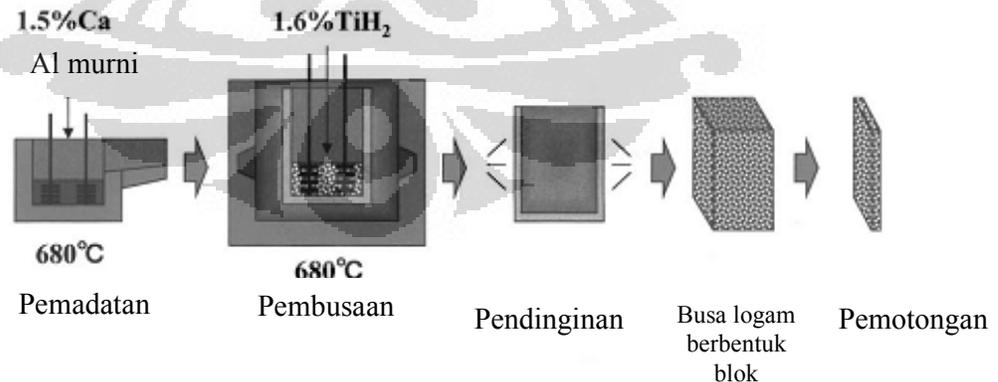


Gambar 2.5. Pengaruh ukuran partikel terhadap pembentukan pori^[5].

Selain itu, kestabilan pori dari logam busa juga sangat ditentukan oleh ukuran dan prosentase volume partikel pembentuk pori (gambar 2.5). dimana kestabilan pori yang terbentuk juga akan mempengaruhi sifat mekanik ataupun sifat fisis dari logam busa itu sendiri.

2.2.2. Metoda *Blowing agents*

Metoda ini menggunakan *blowing agents* yang ditambahkan ke dalam cairan logam. *Blowing agents* akan terurai akibat pengaruh panas dan akan melepaskan gas, sehingga terbentuk gelembung-gelembung dan terjadi proses pembusaan.



Gambar 2.6. Skema metoda *blowing agents*^[5].

Misalnya pada pembuatan busa aluminium. Langkah pertama dari proses ini adalah dengan menambahkan logam kalsium sebesar 1,5 % berat ke dalam logam cair pada suhu temperatur lebur logam. Cairan logam kemudian diaduk beberapa saat, sehingga kekentalannya meningkat dan membentuk kalsium oksida, kalsium aluminium oksida, atau Al_4Ca . Setelah itu akan ditambahkan *blowing agents* ke dalam cairan dan melepaskan gas hidrogen dalam cairan panas aluminium. Proses pembusaan ini dilakukan di dalam cetakan pada tekanan tetap. Setelah membeku, busa aluminium dikeluarkan dari cetakan dan dibentuk sesuai yang diinginkan (lihat gambar 2.6).

Diperlukan ketepatan dalam parameter yang digunakan sehingga bisa didapatkan pori-pori yang homogen. Kelebihan dari metoda ini diantaranya:

- proses pembuatan yang sederhana
- dapat menghasilkan yang bentuk yang lebih kompleks
- struktur busa aluminium yang dihasilkan cenderung homogen
- pori yang terbentuk adalah pori tertutup

Sedangkan kekurangannya adalah:

- proses pembuatan yang mahal
- sulit mengatur ukuran pori dan kerapatan busa aluminium yang dihasilkan.

2.2.3. Metoda Solidifikasi solid-gas eutektik

Prinsip dari metoda ini adalah memanfaatkan perbedaan kelarutan gas pada logam dalam fasa cair dan padat. Pertama, cairan logam diberikan kondisi tekanan tinggi (sampai dengan 50 bar) dalam atmosfer gas hidrogen atau nitrogen. Bila temperatur kemudian diturunkan hingga di bawah titik lebur logam, maka gas akan mengendap, sehingga dalam kondisi tersebut, gas akan terperangkap di dalam logam.

Bentuk pori sangat ditentukan oleh kandungan gas, tekanan pada logam, arah dan laju pendinginan, dan komposisi kimia dari cairan logam.

Diameter pori berkisar antara 10 μm sampai 10 mm, panjang pori dari 100 μm sampai 300 mm, dan porositas dari 5-75 %.

2.2.4. Metoda Serbuk

Pada metoda ini, serbuk logam dicampur dengan *blowing agents*, dan dilanjutkan dengan proses kompaksi hingga mencapai kerapatan tertentu. Pada prinsipnya, kompaksi dapat dilakukan dengan berbagai cara, dimana inti dari proses ini adalah *blowing agents* harus benar-benar terikat oleh serbuk logam.

Tahap selanjutnya adalah melakukan perlakuan panas (*sintering*) pada aluminium, sehingga *blowing agents* akan terurai dan melepaskan gas ke dalam matriks logam (gambar 2.7).

Kelebihan dari metoda ini adalah:

- proses pembuatan cukup sederhana
- bisa dilakukan untuk pembuatan komponen yang rumit
- kerapatan bisa bervariasi
- pori yang terbentuk adalah pori tertutup

Sedangkan kekurangannya adalah:

- proses pembuatannya lebih mahal bila dibandingkan dengan fasa cair
- ukuran terbatas
- sulit mengontrol ukuran pori.

2.2.5. Metoda *Thixo-casting (Thixofom)*

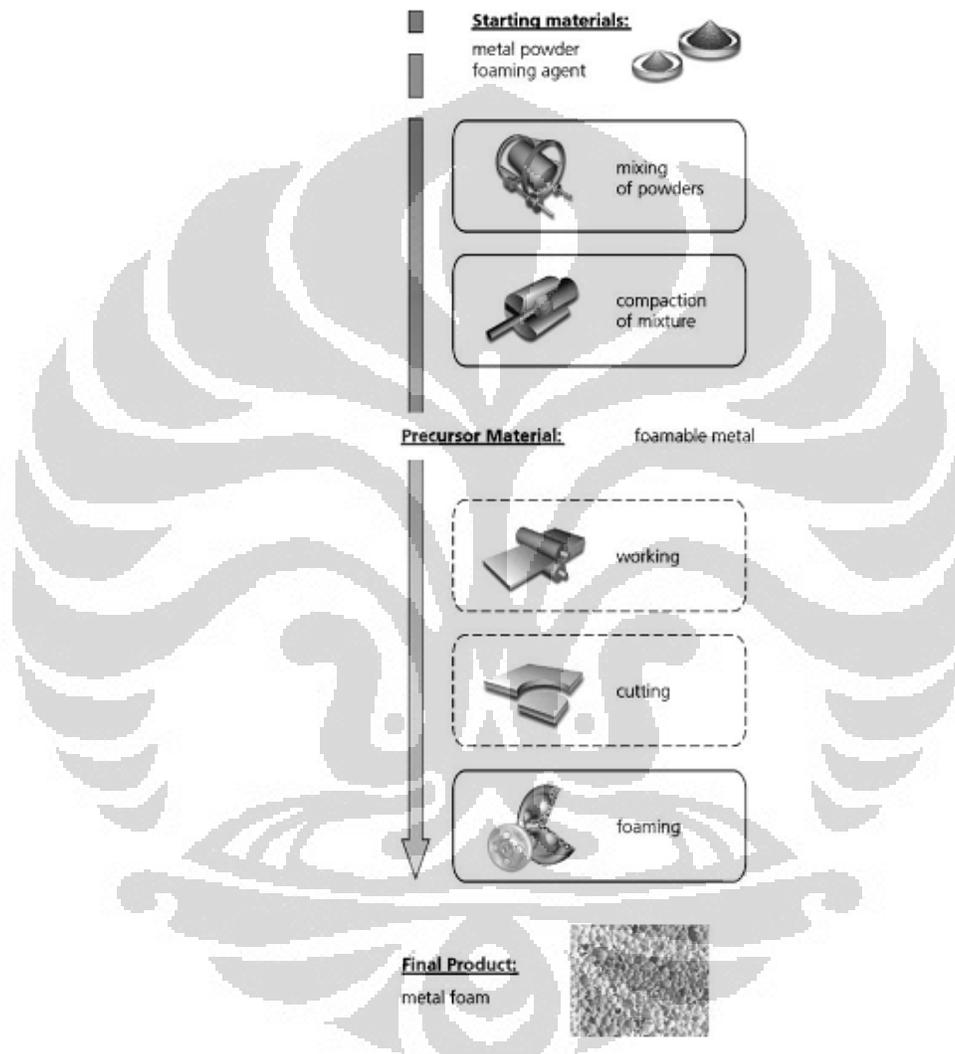
Dalam metoda ini, campuran serbuk logam dilakukan pemadatan menjadi *billet* dengan menggunakan tekanan isostatis yang menghasilkan kepadatan sampai 80 %. Kemudian *billet* ini dipanaskan pada temperatur dimana *billet* paduan mengalami fasa semi-solid dan kemudian di cetak ke dalam suatu bentuk tertentu melalui mesin *die casting*. Produknya kemudian dapat dijadikan bahan busa logam dengan dileburkan kembali.

Keuntungan dari proses ini adalah dapat memiliki bentuk yang lebih kompleks dan tidak perlu dilakukan proses produksi lebih lanjut.

2.2.6. Metoda *Formgrip/Formcarp*

Dalam metoda ini, bahan baku material bisa disiapkan tanpa melalui serbuk logam. Pertama, logam yang akan dijadikan bahan baku busa logam dilebur terlebih dahulu dan ditambahkan partikel titanium hidrida pada logam cair.

Setelah logam cair tersebut membeku, maka produk tersebut bisa dilakukan proses pembusaan logam seperti pada proses yang telah disebutkan di atas, seperti injeksi gas dan *blowing agents*.



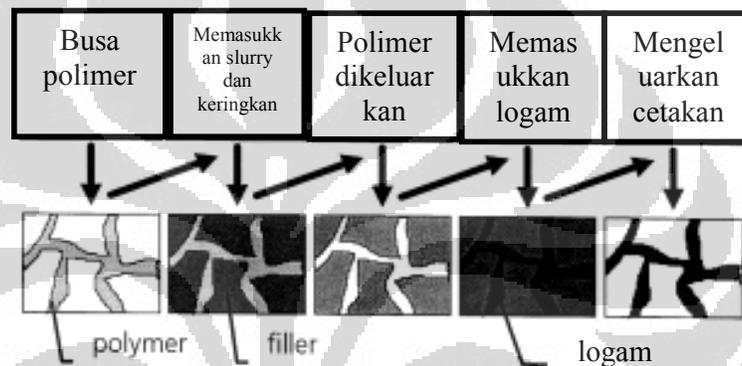
Gambar 2.7. Skema metoda kompaksi serbuk^[5].

2.2.7. Metoda *Casting* dengan Busa Polimer

Proses ini merupakan proses pembuatan busa dimana pembusaannya tidak dilakukan secara langsung. Dalam proses ini, busa polimer dijadikan sebagai *role model* busa logam yang diisi dengan material tahan panas seperti campuran resin

dan kalsium karbonat. Setelah itu, busa polimer dikeluarkan dengan cara dipanaskan dan logam cair dituangkan ke dalam pola yang telah dibentuk dari polimer. Setelah logam mengalami pembekuan, cetakan tahan panas dikeluarkan dengan cara diberikan fluida bertekanan dan terbentuklah busa logam (gambar 2.8).

Metoda ini dapat digunakan untuk membentuk komponen dengan bentuk yang sangat kompleks dan produk akhirnya memiliki porositas yang sangat tinggi (80-97 %).



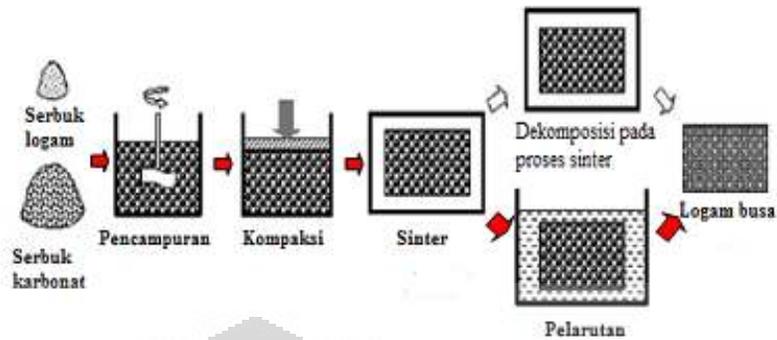
Gambar 2.8. Skema metoda casting dengan busa polimer (*investment casting*)

2.3. PROSES SINTERING DAN PELARUTAN

Proses sinter dan pelarutan merupakan suatu metode pembuatan logam busa yang memanfaatkan proses metalurgi serbuk. Dimana pada proses ini, serbuk logam yang telah dicampur dengan garam sebagai pembentuk dan penstabil pori pada logam busa dan dikompaksi, akan diberikan perlakuan panas dan dilanjutkan dengan proses pelarutan garam. Jejak garam di dalam matriks logam yang larut selanjutnya akan membentuk pori sesuai dengan ukuran dan bentuk garam yang larut (gambar 2.9).

Sebelumnya proses ini telah disinggung dalam penjelasan mengenai metoda yang digunakan untuk membuat logam busa, yaitu dengan metoda serbuk.

Secara umum, proses pembuatan logam busa dengan metoda ini dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.9. Skema proses sinter dan pelarutan garam karbonat ^[11]

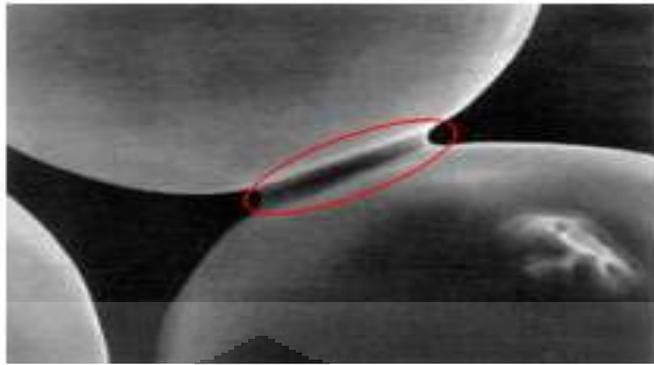
Tahap awal proses ini adalah dengan melakukan *mixing* atau pencampuran antara serbuk logam dan garam yang digunakan untuk membentuk pori. Selanjutnya dilakukan proses kompaksi pada campuran serbuk tersebut dengan tekanan tertentu. Hasil dari proses kompaksi kemudian diberikan perlakuan panas (*sintering*) dan pada tahap akhir adalah melarutkan garam yang ada pada logam di dalam air.

Keuntungan dari penggunaan proses ini diantaranya adalah dapat memiliki bentuk yang lebih rumit karena dapat dibentuk sesuai dengan cetakan, ukuran pori yang dapat dikontrol sesuai dengan yang diinginkan, penggunaan bahan yang dapat disesuaikan, dan lebih mudah melakukan pencampuran pada senyawa yang sulit untuk dicampurkan bila dalam fasa cair.

Poros yang terbentuk melalui proses ini memiliki prosentase yang lebih besar karena dapat diatur jumlah dan ukuran partikel garam yang ditambahkan dan dicampur di dalamnya.

2.3.1. Proses Sinter

Merupakan proses pemanasan dimana terbentuk ikatan antar partikel yang dilakukan di bawah temperatur lebur akibat fenomena perpindahan dalam skala atomic. Efek dari proses *sintering* terhadap bakalan adalah meningkatkan sifat mekanis seperti kekuatan, kekerasan dan sifat lainnya. Pada proses *sintering* ini ikatan yang terjadi antar serbuk timbul akibat terbentuknya leher (*necking*) antar partikel (gambar 2.10).



Gambar 2.10. Pembentukan neck pada saat proses sinter^[9]

Tujuan dilakukannya proses *sintering* adalah untuk menghilangkan pelumas dan pada temperatur yang lebih tinggi untuk proses difusi serta pembentukan ikatan antar serbuk. Perubahan yang terjadi pada serbuk hasil kompaksi yang disinter adalah sebagai berikut:

1. Partikel mulai berikatan dan akan meningkatkan kekuatan mekanis, konduktivitas listrik dan panas dari material.
2. Mengurangi jumlah porositas dan meningkatkan densitas dari bakalan.
3. Terjadi pertumbuhan butir menjadi lebih besar daripada sebelum dilakukan proses *sintering*.
4. Pori menjadi lebih halus selama proses sinter berlangsung
5. Bila kondisi atmosfer baik, maka udara yang terperangkap dalam butir akan keluar dan partikel oksida berkurang.

Karena itu pada saat proses *sintering* dilakukan di dalam dapur yang tertutup yang bertujuan untuk mencegah terjadinya reaksi antara bakalan dengan lingkungan di luar dapur.

Proses *sintering* sendiri dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan menggunakan tekanan atau tanpa menggunakan tekanan. Walaupun proses *sintering* dengan tekanan akan menghasilkan densitas yang lebih baik, namun saat ini cara yang biasa digunakan pada umumnya adalah tanpa menggunakan tekanan karena tidak membutuhkan biaya proses yang besar.

Dalam proses sinter tanpa tekanan sendiri dapat dilakukan dengan menggunakan dua cara, yaitu

2.3.1.1. *Sintering* fasa cair

Proses ini merupakan proses *sintering* yang dilakukan dengan menggunakan temperatur tertentu dan melibatkan fasa cair yang timbul akibat perbedaan temperatur lebur antara dua atau lebih komponen material dalam suatu bakalan. Fasa cair tersebut akan mengelilingi fasa solid dalam bakalan sehingga terjadi proses pembasahan. Keuntungan dari proses ini yaitu dapat meningkatkan densitas dengan menghilangnya pori akibat diisi oleh fasa cair.

2.3.1.2. *Sintering* fasa padat

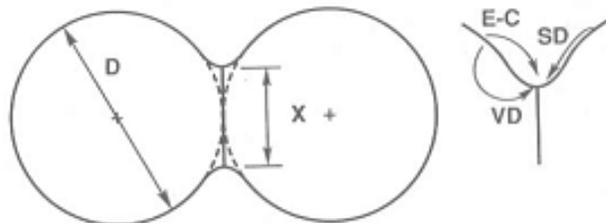
Proses sinter pada cara ini hanya melibatkan fasa padat dan tanpa melibatkan fasa cair. Proses ikatan yang terjadi adalah akibat adanya perpindahan massa karena adanya gaya pendorong (*driving force*) dari proses sinter.

Perpindahan massa ini terjadi dalam dua tahap, yaitu:

a. Perpindahan permukaan

Proses yang terjadi dalam tahap ini adalah:

- Pertumbuhan leher tanpa ada perubahan jarak antar partikel.
- Perpindahan permukaan adalah akibat dari perpindahan massa.
- Terjadinya difusi permukaan dan kondensasi (gambar 2.11).
- Belum ada perubahan dimensi
- Tidak ada perubahan densitas.

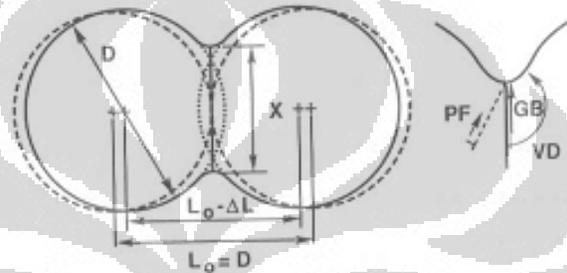


Gambar 2.11. Perpindahan permukaan^[9]

b. Perpindahan bulk

Proses yang terjadi adalah:

- *Volume diffusion*, difusi batas butir, plastik *flow*, dan *viscous flow*.
- Dislokasi pada daerah leher (gambar 2.12).
- Perubahan densitas atau penyusutan.



Gambar 2.12. Perpindahan bulk^[9]

Empat tahapan yang terjadi dalam proses sinter secara umum adalah:

a. Titik kontak

Partikel lepas mulai membentuk kontak titik antar partikel lain pada orientasi acak. Ikatan yang terjadi masih lemah dan belum terjadi perubahan dimensi bakalan. Makin tinggi densitas bakalan, makin banyak bidang kontak yang terjadi antar partikel.

b. Tahap awal

Pada tahap ini daerah kontak antar partikel serbuk mulai tumbuh dalam bentuk leher dimana pertumbuhan ini sangat tergantung pada mekanisme perpindahan massa. Pada tahap ini pori-pori mulai terpisah karena titik kontak membentuk batas butir dan terjadi penyusutan, pengurangan luas permukaan dan pepadatan.

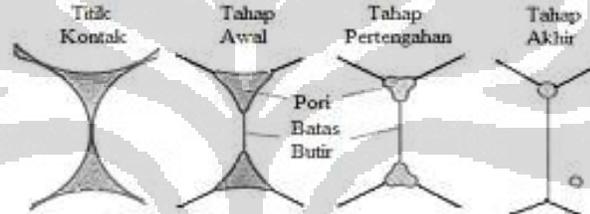
c. Tahap pertengahan

Merupakan tahap penentuan yang mempengaruhi sifat mekanis bakal sinter. Saat ini terjadi pertumbuhan butir dan struktur pori menjadi lebih halus. Geometri dan pori yang terjadi

pada tahap ini tergantung pada laju *sintering*. Sedangkan pepadatan yang terjadi diikuti oleh difusi volume dan difusi batas butir. Makin tinggi temperatur dan waktu tahan, makin kecil partikel serbuk, maka ikatan dan densifikasi juga makin tinggi.

d. Tahap akhir

Di tahap ini pori-pori yang bulat menyusut karena pengaruh mekanisme bulk diffusion (gambar 2.13). Dengan pemanasan yang lama, pemampasan pori akan menyebabkan ukuran pori rata-rata meningkat dan jumlah pori berkurang.

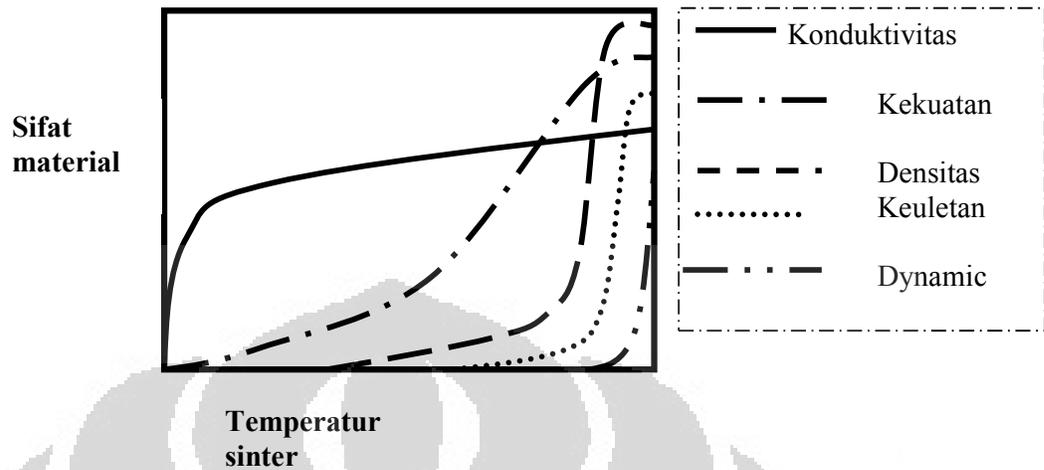


Gambar 2.13. Tahapan ikatan antar serbuk dalam proses sinter^[9].

Beberapa variabel yang mempengaruhi sifat mekanis dari bakalan dalam proses sinter adalah:

1. Temperatur sinter

Tujuan utama dari proses sinter adalah meningkatkan sifat mekanis dari bakalan hasil kompaksi. Pengaruh meningkatnya temperatur sinter adalah makin meningkat pula sifat mekanis bakalan hasil kompaksi (gambar 2.14). Namun juga akan menyebabkan terjadinya shrinkage pada partikel sehingga dimensi bakalan menjadi berkurang dan biaya proses menjadi lebih mahal.



Gambar 2.14. Pengaruh waktu sinter terhadap material^[9].

2. Waktu sinter

Semakin lama waktu sinter, maka densitas bakalan akan semakin tinggi pula setelah disinter, namun akan meningkatkan shrinkage dan pertumbuhan butir.

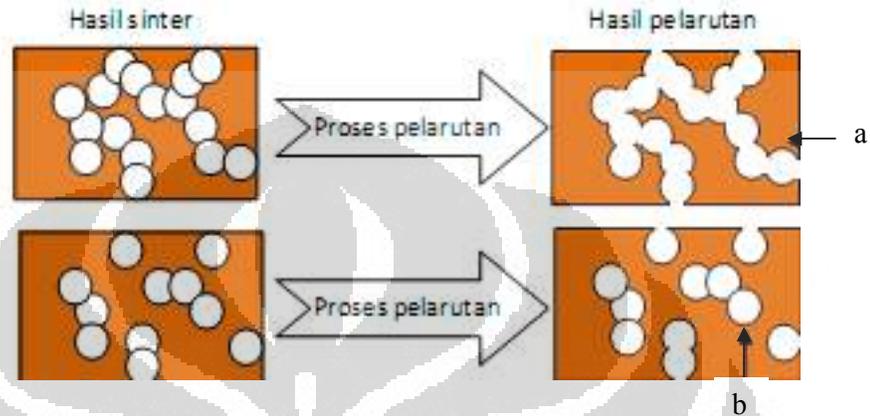
3. Atmosfer sinter

Atmosfer sinter diperlukan untuk mengontrol terjadinya reaksi antara bakalan dengan lingkungan luar dari dapur pada saat *sintering*. Apabila terjadi oksida pada bakalan akan mempengaruhi terjadinya difusi pada bakalan dalam proses *sintering*. Atmosfer yang dapat digunakan pada saat proses sinter adalah hidrogen, amoniak, gas inert, nitrogen, vakum dan gas alam.

2.3.2. Proses Pelarutan

Proses ini merupakan tahap akhir dari proses pembuatan logam busa dengan menggunakan metoda sinter dan pelarutan karbonat. Tujuannya adalah untuk melarutkan karbonat yang terkandung dalam bakalan hasil sinter. Akibat dari pelarutan ini adalah timbulnya jejak garam karbonat berupa pori-pori pada sampel.

Media pelarutan juga tergantung pada jenis garam yang digunakan. Dalam pengujian ini garam yang digunakan adalah potassium karbonat yang dapat larut dalam air pada suhu ruang. Sehingga proses pelarutan yang dilakukan dapat dengan air biasa dan temperatur ruang.



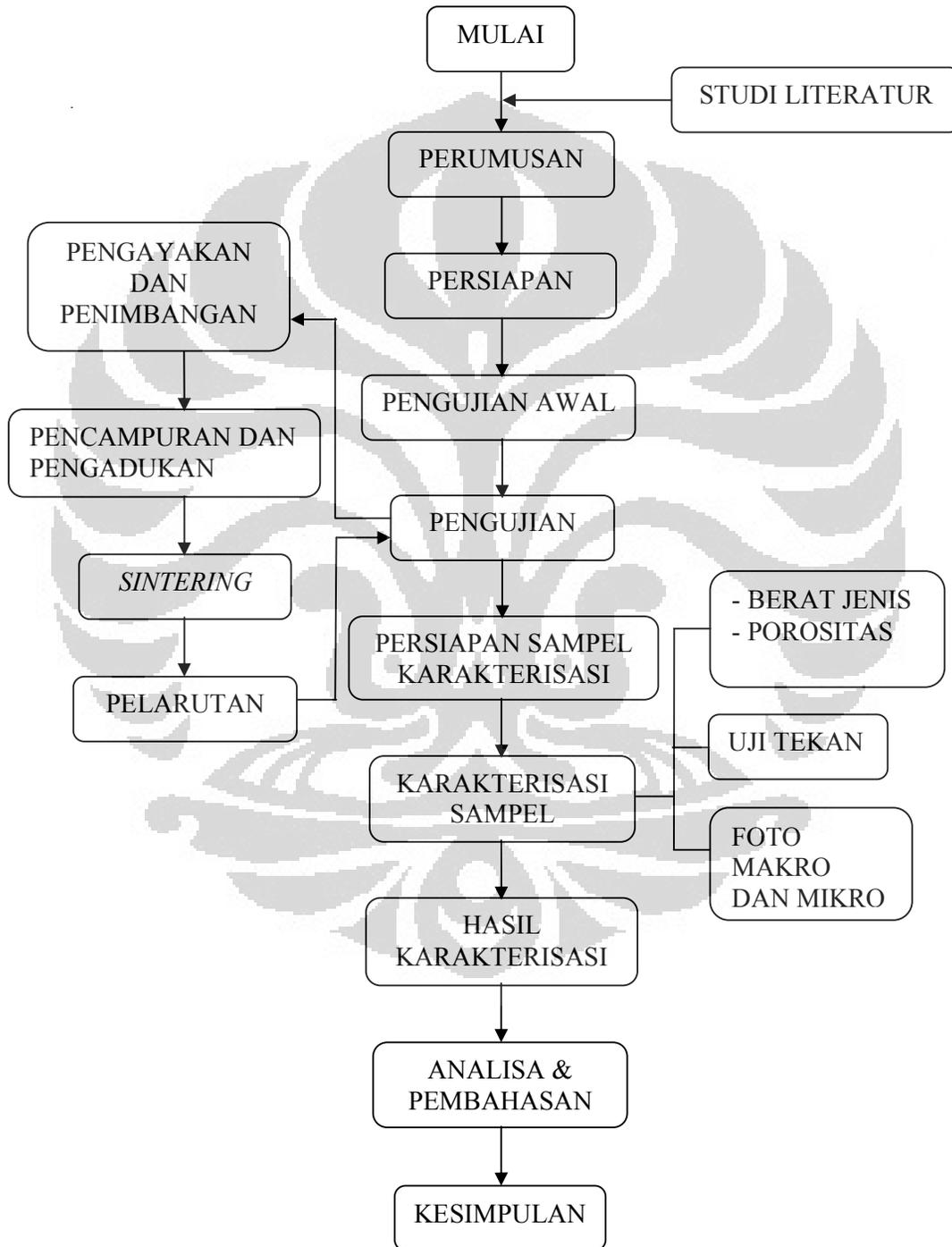
Gambar 2.15. Ilustrasi pelarutan garam pada logam busa. (a)garam terlarut sempurna karena saling terhubung (b) ada garam yang tidak larut dalam matriks logam.

Ukuran fraksi volum garam juga mempengaruhi pori yang terbentuk, dimana makin besar fraksi volum garam dan terhubung, maka makin mudah pula proses pelarutan garam yang dapat dilakukan. Begitu juga sebaliknya, bila fraksi volum garam makin kecil dan hanya sedikit yang terhubung, maka ada kemungkinan garam yang masih terperangkap dalam matriks logam (gambar 2.15).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. DIAGRAM ALIR PENELITIAN

Tahapan prosedur yang digunakan adalah seperti gambar .



3.2. BAHAN-BAHAN PENELITIAN

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Serbuk tembaga yang berasal dari Merck
- Serbuk potassium karbonat yang dibeli dari PT. Harumsari
- *Zinc stearate*
- Ethanol
- Air (aquades) yang digunakan untuk melarutkan sampel setelah proses *sintering*
- Gas nitrogen
- WD 40

3.3. PERALATAN PENELITIAN

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini meliputi proses pengayakan (sieving), penimbangan serbuk, pencampuran (*mixing*), kompaksi, *sintering*, pelarutan, dan pengujian sampel akhir.

Pada proses pengayakan, digunakan mesin siever yang ada di dalam Lab Metalurgi Proses DTMM FTUI. Sedangkan pada proses penimbangan, alat yang digunakan adalah timbangan analitik digital dengan ketelitian 0,01 gram. Pada proses pencampuran serbuk, alat yang digunakan adalah wadah silinder dengan diameter 4 x 7 cm, bola pejal dengan diameter 0,5 cm serta mesin bubut yang berada di workshop DTMM FTUI.

Untuk proses kompaksi, alat yang digunakan adalah cetakan (*dies*) dengan diameter 2 cm dan mesin kompres Krisbow. Sedangkan untuk proses *sintering*, alat-alat yang digunakan adalah Tube Gas Furnace Nabertherm dan refraktori sebagai tempat untuk menaruh sampel. Untuk proses pelarutan, alat yang digunakan adalah magnetic steerer, magnetic bar dan *beaker glass*.

Pada proses pengujian sampel, peralatan yang digunakan adalah *beaker glass*, timbangan analitik digital dengan ketelitian 0,01 gram, kawat dan dapur Nabertherm untuk mengetahui densitas dan porpsitas pada sampel pengujian. Sedangkan untuk pengujian makrostruktur dan mikrostruktur digunakan mikroskop optik dan mesin SEM Leo 420i yang ada di DTMM FTUI.

3.4. PROSEDUR PENELITIAN

3.4.1. Karakterisasi Serbuk

Pada proses karakterisasi serbuk yang digunakan dalam penelitian ini, didapatkan data-data sebagai berikut:

- Serbuk tembaga

Komposisi kimia sesuai spesifikasi dari Merck.Inc :

Unsur	%
Cu	99.7
P	0.001
Ag	0.002
As	0.0005
Fe	0.005
Mn	0.001
Pb	0.01
Sb	0.001
Sn	0.01

Bentuk serbuk : dendritik

Ukuran serbuk : < 63 μm

Berat jenis : 8.96 gr/cm³

- Serbuk potassium karbonat

Bentuk serbuk : globular

Ukuran serbuk : 250-841 μm

Berat jenis : 2,29 gr/cm³

3.4.2. Persiapan Serbuk

Persiapan pengujian yang dilakukan pada tahap ini adalah persiapan material dasar, partikel pembentuk dan penstabil pori, pelumas dan *binder*. Material dasar yang digunakan dalam pengujian serbuk Cu murni dengan tingkat kemurnian 97 %. Partikel pembentuk pori yang digunakan adalah serbuk

potasium karbonat. Sedangkan untuk pelumas dan *binder* yang digunakan masing-masing adalah *zinc stearate* dan ethanol.

Partikel pembentuk pori yang akan dipakai adalah serbuk potasium karbonat dengan tiga distribusi ukuran partikel, dengan rata-rata ukuran masing-masing 841 μm , 542 μm , dan 420 μm .

3.4.2.1. Pengayakan

Untuk mendapatkan variasi ukuran partikel yang diinginkan, maka dilakukan proses pengayakan (*sieving*) sehingga didapatkan distribusi ukuran serbuk potasium karbonat yang sesuai dengan ukuran tersebut.

Proses pengayakan dilakukan selama 20 menit dengan menggunakan mesin ayakan di Lab Metalurgi Proses. DTMM FTUI.

3.4.2.2. Penimbangan

Bahan yang dibutuhkan dalam pengujian ditimbang dengan menggunakan timbangan digital sesuai dengan komposisi berat yang ditentukan untuk membuat sampel uji.

Tahapan proses penimbangan bahan yang dilakukan adalah :

1. Serbuk tembaga seberat 50% dari total berat campuran tembaga dan potasium karbonat atau 4 gram.
2. Potasium karbonat sebanyak 50% dari total berat campuran tembaga dan potasium karbonat atau 4 gram, dimana masing-masing ukuran partikel ditimbang untuk empat variasi temperatur (825°C, 850°C, 900°C, dan 950°C),
3. *Zinc stearate* seberat 2% dari total berat campuran tembaga dan potasium karbonat atau 0,16 gram.
4. Ethanol seberat 1% dari total berat campuran tembaga dan potasium karbonat atau 0,08 gram.

Kemudian serbuk disimpan ke dalam kertas minyak dan plastik klip. Untuk memudahkan analisa sampel, maka dilakukan penandaan pada sampel yang akan diuji, seperti yang terlihat pada table 3.1.

Tabel 3.1. Penandaan Sampel Percobaan

Serbuk potassium karbonat	Temperatur <i>sintering</i> (°C)			
	825	850	900	950
Serbuk 1	C1 - 825	C1 - 850	C1 - 900	C1 - 950
Serbuk 2	C2 - 825	C2 - 850	C2 - 900	C2 - 950
Serbuk 3	C3 - 825	C3 - 850	C3 - 900	C3 - 950

Keterangan:

Serbuk 1 : serbuk potassium karbonat dengan ukuran diameter partikel garam 841 μm

Serbuk 2 : serbuk potassium karbonat dengan ukuran diameter partikel garam 542 μm

Serbuk 3 : serbuk potassium karbonat dengan ukuran diameter partikel garam 420 μm



Gambar 3.1. Timbangan analitik digital

3.4.2.3. Pencampuran

Proses pencampuran bahan dilakukan agar penyebaran serbuk atau partikel garam dan zat aditif lainnya lebih merata. Proses pencampuran dilakukan dengan

menggunakan mesin bubut dan silinder sebagai media pencampur (lihat gambar 3.2).

Pada proses ini serbuk tembaga, potassium karbonat, *zinc stearate* dan ethanol dicampur sesuai dengan ukuran partikel potassium karbonat .

Tahapan proses pencampuran yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Media pencampur berbentuk silinder dibersihkan terlebih dahulu dengan menggunakan WD40 dan dilap hingga bersih.
2. Bahan-bahan yang dibutuhkan untuk membuat sampel dimasukkan ke dalam media pencampur.
3. Media pencampur dipasang pada mesin bubut untuk mencampur bahan-bahan pembentuk sampel.
4. Mesin bubut dinyalakan sehingga terjadi proses *mixing* dan dilakukan selama 3 menit.
5. Setelah selesai, serbuk yang telah dicampurkan ditimbang dan didapatkan sampel dengan berat rata-rata 8,2 gram.



Gambar 3.2. Wadah silinder untuk mencampur serbuk(a) dan mesin bubut (b)

3.4.2.4. Kompaksi serbuk

Kompaksi serbuk dilakukan dengan menggunakan dies berbentuk silinder dan mesin kompaksi Krisbow yang ada di DTMM FTUI (gambar 3.3). Diameter rongga pada *dies* yang digunakan memiliki diameter 2 cm. sedangkan teknik kompaksi yang dilakukan adalah penekanan satu arah dimana arah pemekanan berasal dari bagian atas cetakan dan bagian bawahnya diam.

Tahapan proses kompaksi yang dilakukan adalah:

1. Rongga cetakan pada *dies* dan punch dibersihkan dengan menggunakan WD40 kemudian dilap hingga bersih.
2. Campuran serbuk hasil proses *mixing* dimasukkan ke dalam rongga cetakan pada *dies*.
3. Bagian atas atau punch dipasang pada cetakan.
4. *Dies* diletakkan pada mesin kompaksi dan diatur letaknya agar posisi cetakan berada tepat di bawah pusat pembebanan.
5. Pembebanan diberikan sesuai dengan yang diinginkan, yaitu sebesar 200 bar dan dilakukan penahanan selama 15 detik.
6. Pembebanan dilepaskan setelah 15 detik dan mengeluarkan *dies* dari mesin kompaksi.
7. Hasil kompaksi dikeluarkan dengan cara memberikan dorongan pada punch ke dalam rongga cetakan.

Penentuan besar tekanan yang diberikan pada saat proses kompaksi dilakukan berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yaitu sebesar 200 bar dan dengan waktu tahan selama 15 detik.



Gambar 3.3. *Dies* atau cetakan (a) dan mesin kompaksi Krisbow (b)

3.4.2.5. *Sintering*

Proses sinter dilakukan dengan menggunakan dapur Tube Nabertherm yang ada pada DTMM FTUI. Dapur ini memiliki kapasitas hingga 1200°C. setelah dilakukan pengecekan dengan termokopel, diketahui perbedaan temperatur antara bagian dalam dapur dengan yang ditunjukkan pada indikator adalah sebesar 20°C-22°C.

Temperatur yang digunakan pada proses sinter kali ini adalah 825°C, 850°C, 900°C, dan 950°C dengan masing-masing waktu tahannya adalah selama 2 jam dan dengan menggunakan atmosfer N₂ untuk menciptakan kondisi inert pada saat proses sinter dilakukan sehingga dapat mengurangi terbentuknya oksida pada sampel.

Adapun tahapan proses sinter yang dilakukan adalah:

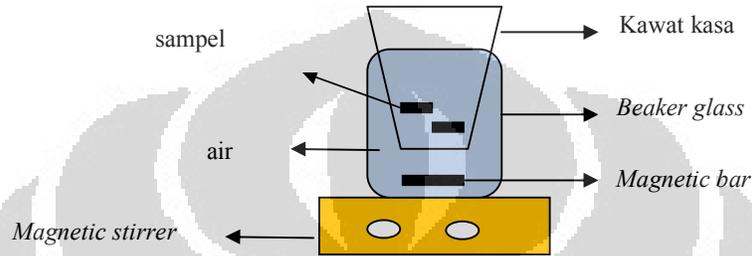
1. Kondisi dapur dan aliran gas ke dalam dapur dicek apakah sudah berjalan dengan baik.
2. Sampel yang telah diletakkan di atas refraktori yang digunakan sebagai alas sampel disiapkan terlebih dahulu.
3. Sampel dimasukkan ke dalam dapur dan menutupnya kembali dengan rapat.
4. Atmosfer di dalam tabung dikondisikan dengan melakukan *flushing* gas nitrogen selama 10 menit dengan tekanan 10 Psi.
5. Setelah 10 menit aliran gas dikecilkan menjadi 5 Psi.
6. Dapur disetel dengan parameter variasi temperatur sinter yang telah ditentukan yaitu 825°C, 850°C, 900°C, dan 950°C. Waktu tahan yang dilakukan adalah 120 menit pada masing-masing variasi temperatur. Sedangkan temperatur *preheating*nya adalah 300°C dengan waktu tahan 30 menit.
7. Sampel dikeluarkan dari dapur.



Gambar 3.4. Dapur gas Nabertherm

3.4.2.6. Pelarutan

Proses pelarutan ini dilakukan bertujuan untuk melarutkan garam yang ada pada sampel sehingga akan terbentuk pori. Pelarutan dilakukan menggunakan *magnetic stirrer* dengan media aquades yang dipanaskan hingga temperatur 50-70°C sebagai pelarut di dalam *glass beaker* (gambar 3.5).



Gambar 3.5. Proses pelarutan karbonat dengan *magnetic stirrer*

Adapun tahapan proses pelarutan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. *Beaker glass* yang telah diisi air disiapkan dan diletakkan pada alat *magnetic stirrer*.
2. Besar kecepatan motor putaran dan temperatur diatur pada *magnetic stirrer*.
3. Mesin dinyalakan dan didiamkan selama proses pelarutan selama 2 jam.
4. Setelah 2 jam, mesin dimatikan dan sampel dikeluarkan dari *beaker glass*.

Untuk selanjutnya sampel disiapkan untuk proses pengujian densitas dan porositas sampel tembaga busa karena pada kedua pengujian ini juga memerlukan proses pencelupan sampel dalam air.

3.4.3. Pengujian

3.4.3.1. Densitas dan porositas

Pengujian ini bertujuan mengetahui densitas sampel hasil pengujian setelah dilakukan proses kompaksi, sinter, dan pelarutan garam pada sampel tembaga busa. Perhitungan densitas yang dilakukan pada pengujian ini adalah dengan membandingkan massa dengan volume sampel hasil pengujian.

Untuk mengetahui volume sampel dengan bentuk yang tidak beraturan, maka digunakan standard pengujian ASTM 373-88 dengan tahapan-tahapan sebagai berikut:

1. *Beaker glass* berisi air disiapkan dan ditimbang di atas timbangan analitik. Setelah itu ubah settingan berat menjadi nol.
2. Setelah pelarutan karbonat pada sampel selesai dilakukan, kemudian sampel direndam di dalam gelas plastik yang berisi air sampai tidak ada gelembung yang terlihat.
3. Selanjutnya sampel digantung dengan seutas kawat dan dicelupkan ke dalam *beaker glass* berisi air hingga seluruh bagian sampel terendam.
4. Catat berat yang ditunjukkan pada timbangan analitik.
5. Sampel dikeluarkan dari air dan dikeringkan dengan menggunakan hair dryer.
6. Sampel yang telah kering selanjutnya ditimbang dan dicatat berat yang ditunjukkan oleh indikator timbangan.

Dari hasil perhitungan berat saat digantung dan dicelup dengan kawat, maka volume sampel akan didapatkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$V = \frac{W}{\rho} \dots \dots \dots (3.1)$$

Dimana diketahui:

V = volume sampel (cm^3)

W = berat sampel (gr)

ρ = densitas air (gr/cm^3)

Selanjutnya dari nilai volume yang diketahui maka akan dapat dihitung densitas dari sampel, yaitu dengan persamaan:

$$\rho = \frac{Wd}{V} \dots \dots \dots (3.2)$$

Dimana diketahui:

ρ = densitas sampel tembaga busa (gr/cm³)

Wd = berat kering sampel tembaga busa (gr)

V = volume tembaga busa (cm³)

Sedangkan untuk perhitungan % porositas sampel tembaga busa, maka dapat diketahui dari persamaan:

$$\text{Porositas}(\%) = \frac{\rho_{\text{teori}} - \rho_{\text{pengujian}}}{\rho_{\text{teori}}} \times 100\% \dots \dots \dots (3.3)$$

Dimana diketahui:

Porositas = persen porositas tembaga busa

ρ teori = densitas teori tembaga (gr/cm³)

ρ pengujian = densitas tembaga hasil pengujian (gr/cm³)

3.4.3.2. Foto makro

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui struktur pori yang terbentuk secara makro dan penyebaran pori yang terdapat pada sampel hasil percobaan.

Pengamatan dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik yang ada di DTMM FTUI dan pengambilan gambarnya dilakukan dengan menggunakan kamera. Pengamatan dan pengukuran dilakukan dengan melakukan perbesaran 10 x dan dengan skala 1mm = 10 μ m

3.4.3.3. Kekuatan Tekan

Pengujian mekanik yang dilakukan adalah pengujian tekan dengan memakai Mesin Uji Tekan Schenck Trebel yang terdapat di Lembaga Uji Konstruksi (LUK).

Pengujian tekan dilakukan untuk mengetahui kekuatan tekan dari masing-masing sampel dengan variabel-variabel yang berbeda, yaitu variabel temperatur *sintering* dan ukuran partikel potassium karbonat.

Tahapan proses pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Permukaan sampel diratakan hingga terlihat sejajar antara permukaan atas dan bawah (gambar 3.6.a).
2. Diameter dan tinggi sampel awal diukur.
3. Beban dipasang pada 5 kN/cm
4. Bagian atas sampel digerakkan hingga menempel pada permukaan sampel.
5. Kertas grafik disiapkan untuk mencatat data yang ada pada saat proses penekanan.
6. Proses penekanan dihentikan ketika beban mencapai 70 kN.
7. Diameter dan tebal akhir dari sampel diukur.
8. Data hasil uji penekanan dikonversi sehingga mendapatkan grafik hubungan tegangan dan regangan.



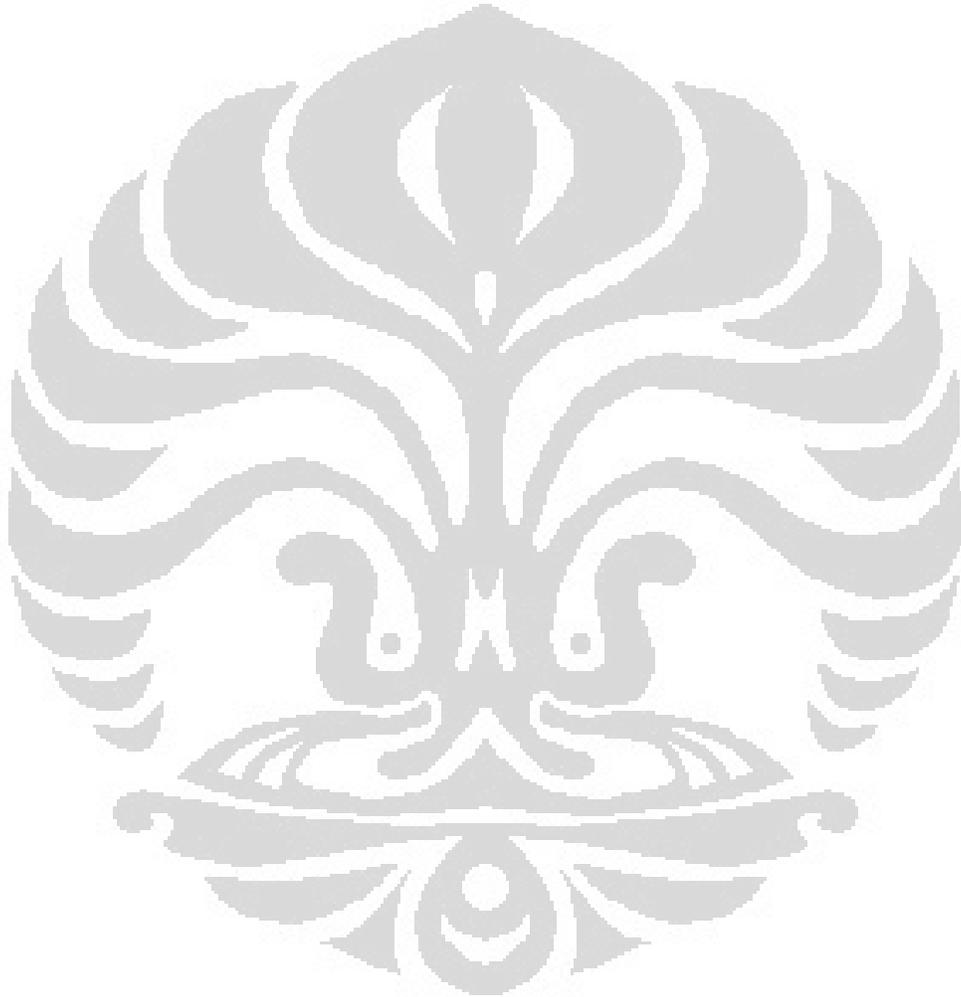
Gambar 3.6. Posisi sampel (a) dan mesin uji tekan Schenck Trebel (b)

3.4.3.4. Foto Mikro

Pengujian foto mikro bertujuan untuk mengetahui fasa baru yang terbentuk pada sampel hasil percobaan. Karakterisasi dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik dan dengan melakukan perbesaran 500x serta dengan melakukan foto SEM dengan perbesaran 20x – 50x.

Selain itu juga dilakukan penghitungan diameter pori tembaga busa dengan menggunakan *measuring microscope* yang ada di DTMM FTUI. Perhitungan dilakukan dengan menentukan empat daerah berbeda pada tembaga

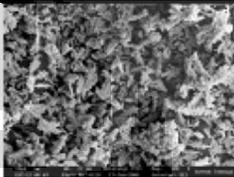
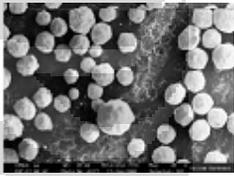
busa dan masing-masing daerah diambil tiga buah pori untuk dihitung diameternya.



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

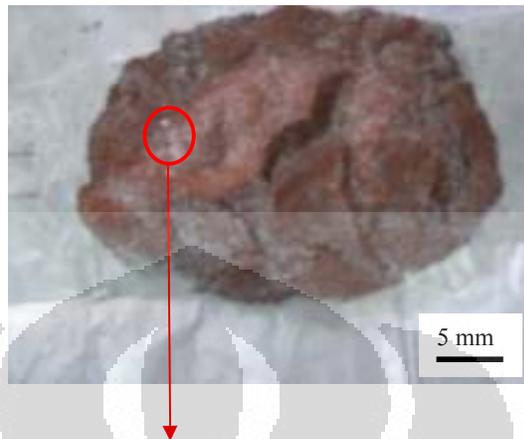
4.1 KARAKTERISTIK BAHAN

Table 4.1. Data mengenai serbuk logam serta garam dan *binder* yang digunakan dalam pembuatan tembaga busa.

BAHAN	FASA	BENTUK PARTIKEL	UKURAN	GAMBAR SEM
Tembaga	padat	dendritik	<63 μm	
Kalium karbonat	padat	globular	841 - 420 μm	
<i>Zinc stearate</i>	padat	poligonal	20-76 μm	

Pada serbuk yang halus, luas area permukaan yang besar akan menyebabkan gesekan antar partikel meningkat sehingga aliran material menjadi kurang efisien, hal ini akan menyebabkan densitas yang rendah pada bakalan^[2]. Ukuran serbuk tembaga yang kecil membuat tembaga memiliki luas area yang besar sehingga akan mempengaruhi densitas bakalan yang rendah yang selanjutnya dapat menyebabkan kekuatan dari tembaga busa menjadi rendah.

4.2. PENCAMPURAN DAN PENGADUKAN



Penggumpalan dan segregasi serbuk kalium karbonat

Gambar 4.1. Serbuk bahan pembuat tembaga busa hasil pencampuran dan pengadukan.

Proses pencampuran dan pengadukan serbuk merupakan salah satu proses yang sangat mempengaruhi hasil akhir dari proses pembuatan tembaga busa dengan menggunakan metoda metalurgi serbuk dan pelarutan. Hal ini dikarenakan proses penyebaran serbuk akan menentukan bentuk dan juga distribusi pori dalam tembaga busa. Selain itu ini juga akan sangat membantu meningkatkan kekuatan mekanis saat melalui proses metalurgi serbuk yang lain, seperti proses kompaksi ataupun sinter.

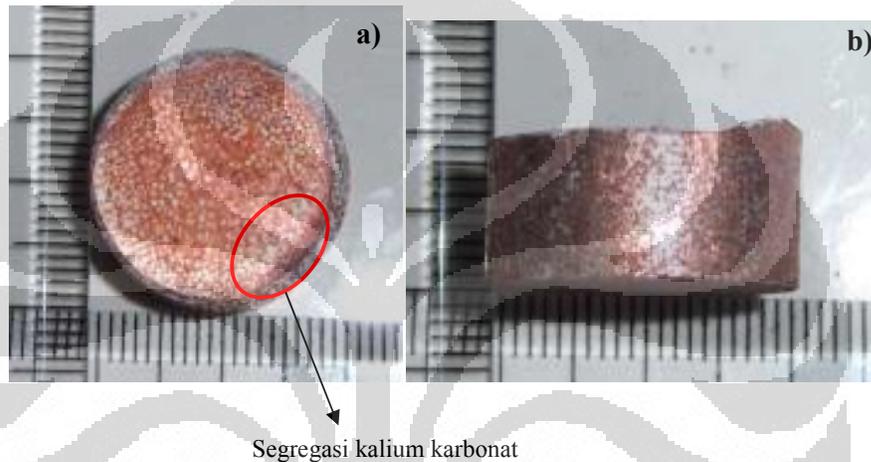
Pada penelitian kali ini serbuk dicampur dalam sebuah wadah silinder dan diaduk menggunakan mesin bubut selama 2 menit dengan kecepatan putaran 120 rpm. Hasil yang ditunjukkan seperti gambar 4.1. menunjukkan masih adanya sebagian serbuk kalium karbonat yang tersegregasi dan menggumpal.

Terjadinya segregasi dan penggumpalan pada sebagian serbuk kalium karbonat disebabkan gaya atau perputaran dari proses pengadukan pada mesin bubut yang terlalu cepat. Proses pencampuran yang baik akan sangat dipengaruhi oleh gaya sentrifugal atau perputaran dari wadah. Apabila gaya sentrifugal terlalu besar, maka serbuk dengan berat jenis yang lebih besar akan cenderung berada pada daerah paling luar di dalam container. Hal ini akan mencegah terjadinya proses pencampuran antar serbuk. Sedangkan apabila gaya sentrifugal terlalu

kecil, maka hal ini dapat menghasilkan proses pencampuran tidak efisien karena gerak yang ditimbulkan sedikit dan memungkinkan timbulnya segregasi.

Sehingga untuk mendapatkan bakalan kompaksi yang lebih baik, serbuk diaduk secara manual terlebih dahulu sebelum dimasukkan ke dalam cetakan kompaksi.

4.3. BAKALAN HASIL KOMPAKSI



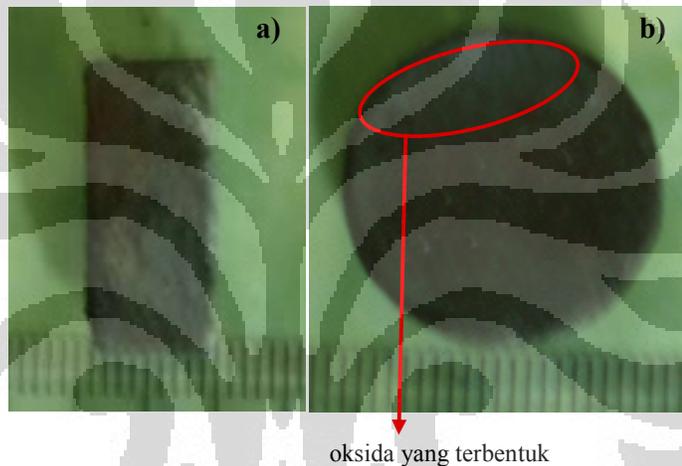
Gambar 4.2. Foto bakalan kompaksi dari penampakan atas (a) dan penampakan samping (b).

Pada gambar 4.2 dapat dilihat contoh bakalan hasil kompaksi yang menunjukkan ada beberapa daerah di dekat permukaan bakalan yang terlihat adanya suatu bentuk pengumpulan atau segregasi kalium karbonat. Namun, segregasi pada bakalan tidak terjadi pada seluruh sampel pengujian, melainkan hanya pada beberapa bakalan yang sebelum dimasukkan ke dalam cetakan tidak dilakukan pengadukan secara manual terlebih dahulu.

Pengumpulan atau segregasi ini terjadi disebabkan karena adanya perbedaan berat jenis serbuk logam dan partikel garam yg digunakan, dimana berat jenis tembaga empat kali lebih besar daripada berat jenis kalium karbonat. Adanya perbedaan berat jenis yang sangat besar ini akan mempengaruhi persebaran serbuk sampel dimana serbuk dengan berat jenis lebih besar umumnya akan berada pada bagian bawah bakalan. Sedangkan serbuk dengan berat jenis

yang rendah cenderung banyak berada di dekat permukaan bakalan. Karena itu untuk mencegah terjadinya segregasi yang besar, maka ketika penuangan serbuk harus memperhatikan proses turunnya serbuk logam dan garam ke dalam cetakan. Ketika serbuk dimasukkan kedalam cetakan kompaksi, serbuk diaduk terlebih dahulu sehingga serbuk yang masuk ke dalam cetakan akan memiliki distribusi serbuk yang lebih merata sehingga akan mengurangi terjadinya segregasi pada bakalan.

4.4. BAKALAN HASIL SINTER



Gambar 4.3. Bakalan hasil *sintering* pada penampakan samping (a) dan penampakan muka (b)

Setelah melalui proses *sintering*, didapatkan bakalan sinter seperti yang terlihat pada gambar 4.3 di atas. Hampir pada seluruh bagian permukaan bakalan teroksidasi pada saat dilakukan proses sinter. Hal ini terjadi dikarenakan oleh kurang optimalnya kondisi atmosfer nitrogen yang diberikan pada saat proses sinter, sehingga tidak dapat mencegah terbentuknya oksida pada bakalan. Namun masih ada bagian pada bakalan yang masih belum teroksidasi sepenuhnya. Tidak optimalnya atmosfer nitrogen yang terbentuk dapat disebabkan karena kecilnya aliran gas nitrogen yang masuk ke dalam dapur pada saat proses sinter berlangsung. Selain itu, tidak optimalnya atmosfer nitrogen yang terbentuk juga

dapat disebabkan aliran gas nitrogen yang masuk ke dalam dapur tidak dapat bersirkulasi dengan baik melewati seluruh sampel karena ada bagian tabung di dalam dapur yang mengalami keretakan, sehingga gas nitrogen dapat mengalir keluar melalui celah retak yang terbentuk.

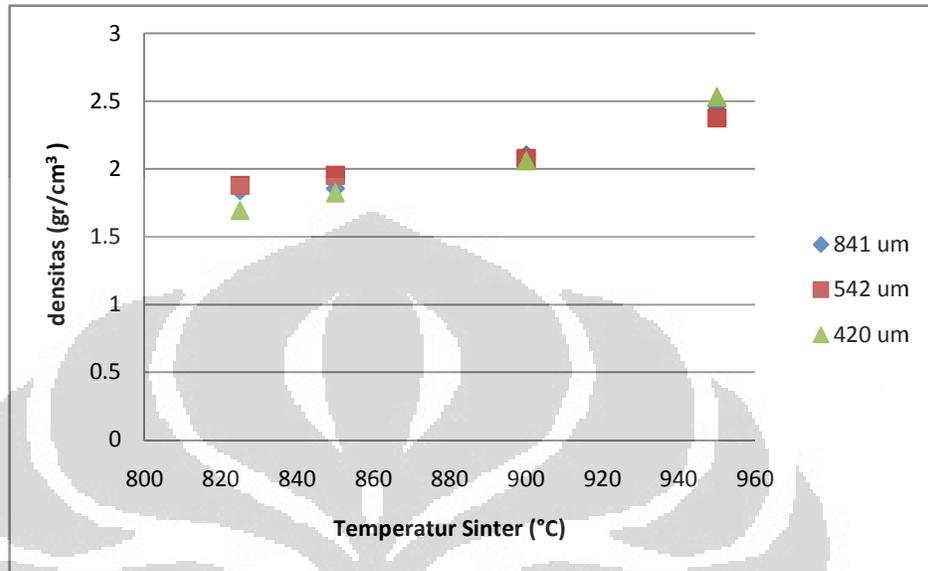
Oksida yang terbentuk adalah *cupric oxide* (CuO) yang merupakan hasil reaksi antara tembaga dengan oksigen (O₂)^[12]. Terbentuknya oksida menunjukkan adanya kontaminasi gas oksigen yang masuk ke dalam ruang dapur pada saat proses sinter berlangsung baik melalui salah satu celah pada ujung pintu masuk dapur ataupun melalui celah yang ada di dalam dapur. Hal ini dikarenakan belum adanya lagi proses maintenance pada dapur sehingga bagian dapur yang masih rusak, yaitu ada bagian tube dapur yang retak dan pecah, belum diperbaiki atau diganti dengan yang lebih baik kondisinya. Selain itu, oksida yang terbentuk juga dapat disebabkan terbentuknya CuO hasil penguraian senyawa tembaga karbonat, yaitu senyawa yang terbentuk dari reaksi tembaga dengan kalium karbonat, dan mengalami proses pemanasan pada saat proses sinter sehingga terurai menjadi tembaga oksida dan gas CO₂^[13]. Tembaga oksida ini ditandai dengan bagian yang berwarna hitam pekat pada bakalan hasil sinter.

Apabila penyebab terbentuknya oksida adalah karena pengaruh kontaminasi gas oksigen, maka hal yang dapat dilakukan untuk mencegah oksidasi adalah dengan cara memperbaiki bagian dapur yang rusak, merapatkan penutup pada dapur saat akan melakukan sinter agar tidak ada gas atau kontaminan dari luar dapur yang masuk ke dalam dapur saat proses sinter berlangsung. Selain itu oksida juga dapat dicegah dengan memperbesar aliran gas nitrogen ke dalam dapur saat proses sinter sehingga atmosfer menjadi lebih optimal atau mengganti gas yang digunakan dengan gas inert seperti gas argon.

4.5. DENSITAS LOGAM BUSA

Pada Gambar 4.4 terlihat hubungan antara temperatur sinter dan ukuran serbuk dengan densitas yang menunjukkan pengaruh kenaikan temperatur sinter terhadap nilai densitas logam busa. Sampel yang mengalami proses sinter dengan temperatur sinter lebih tinggi memiliki nilai densitas yang besar dibandingkan

dengan sampel yang mengalami proses sinter dengan temperatur lebih rendah pada waktu tahan yang sama (120 menit).



Gambar 4.4. Grafik hubungan ukuran partikel dan temperatur sinter (825°C, 850°C, 900°C, dan 950°C) selama 2 jam dengan nilai densitas logam.

Pada Gambar 4.4 terlihat hubungan antara temperatur sinter dan ukuran serbuk dengan densitas yang menunjukkan pengaruh kenaikan temperatur sinter terhadap nilai densitas logam busa. Sampel yang mengalami proses sinter dengan temperatur sinter lebih tinggi memiliki nilai densitas yang besar dibandingkan dengan sampel yang mengalami proses sinter dengan temperatur lebih rendah pada waktu tahan yang sama (120 menit). Hal ini disebabkan karena semakin meningkatnya temperatur sinter, maka bakalan akan mengalami penyusutan dimensi (*shrinkage*) sehingga densitasnya menjadi lebih besar. Densitas yang semakin besar juga disebabkan karena besar pori yang semakin menyusut karena pengaruh difusi antar partikel bakalan. Karena pada waktu tahan yang sama, seiring dengan meningkatnya temperatur sinter, maka laju proses difusi antar partikel bakalan juga akan semakin meningkat.

Sedangkan apabila dilihat hubungan ukuran partikel garam terhadap nilai densitas logam busa, perubahan nilai densitas tidak menunjukkan kecenderungan yang sama pada tiap kenaikan temperatur. Misalnya pada temperatur 825°C dan 850°C, densitas logam busa memiliki nilai tertinggi pada bakalan dengan ukuran

partikel 542 μm . Namun pada temperatur sinter 900°C dan 950°C densitas bakalan dengan ukuran garam 542 μm menjadi lebih rendah daripada bakalan dengan ukuran 842 μm . Sedangkan pada bakalan dengan ukuran partikel yang paling kecil (420 μm), bakalan memiliki kecenderungan densitas yang lebih rendah dibandingkan dengan bakalan dengan partikel berukuran yang lebih besar, namun pada temperatur yang paling tinggi (950°C), densitasnya lebih tinggi dibandingkan dengan sampel yang memiliki rata-rata ukuran partikel karbonat yang lebih besar (842 μm dan 542 μm).

Hal ini terjadi karena adanya pengaruh ukuran diameter pori seperti yang ditunjukkan pada grafik dalam gambar 4.9, yang menunjukkan ukuran rata-rata diameter pori tembaga busa. Pada sampel dengan ukuran partikel garam 420 μm , diameter pori terkecil ada pada sampel yang disinter dengan temperatur sinter 950°C. Dengan semakin kecil ukuran diameter pori yang terbentuk, maka akan meningkatkan densitas dari tembaga busa.

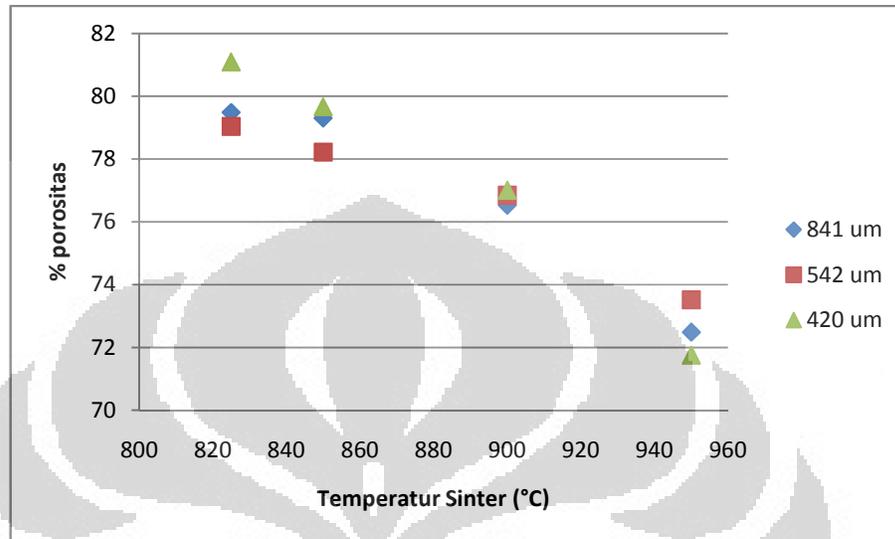
Namun adanya perlakuan temperatur sinter yang berbeda terhadap sampel tembaga busa juga ikut mempengaruhi nilai densitas suatu logam busa. Hal ini dikarenakan pori yang dimiliki oleh tembaga busa tidak hanya terbentuk karena pengaruh garam karbonat yang dicampur dan dilarutkan, tetapi juga dapat terjadi karena belum terdifusinya serbuk tembaga secara sempurna, sehingga masih meninggalkan pori antar serbuk tembaga.

4.6. POROSITAS TEMBAGA BUSA

Pada gambar 4.5. menunjukkan bahwa kenaikan temperatur akan menurunkan nilai porositas dari logam busa. Hal ini terjadi disebabkan selain karena proses difusi yang semakin besar antara partikel logam, juga disebabkan kemungkinan adanya pertumbuhan butir yang dapat menyebabkan berkurangnya fraksi volume pori logam busa.

Secara langsung, volume fraksi yang semakin mengecil juga menyebabkan terjadinya *shrinkage* atau penyusutan dimensi bakalan yang artinya bakalan menjadi semakin padat. Karena pemadatan yang terjadi pada bakalan, maka porositas yang terbentuk juga semakin kecil. Dari uraian dan grafik di atas dapat

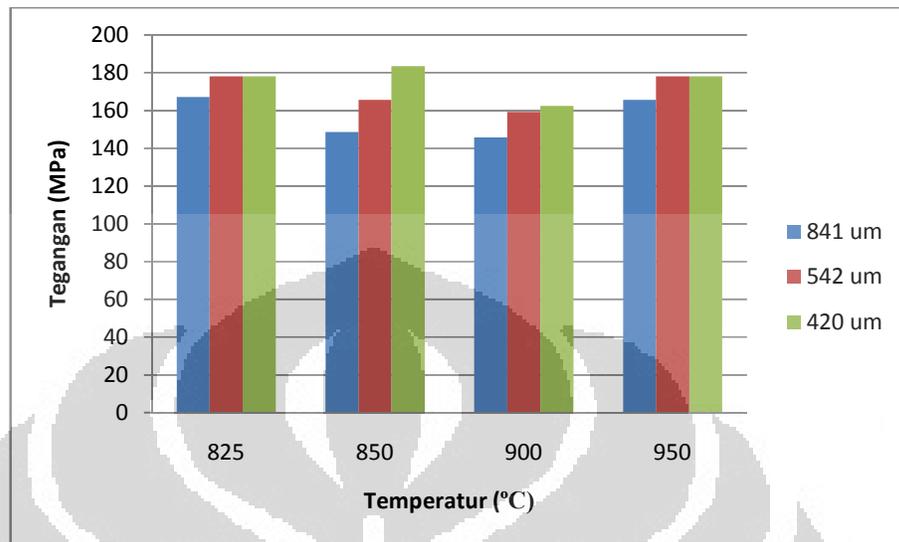
disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur, maka prosentase porositas yang terjadi juga makin menurun.



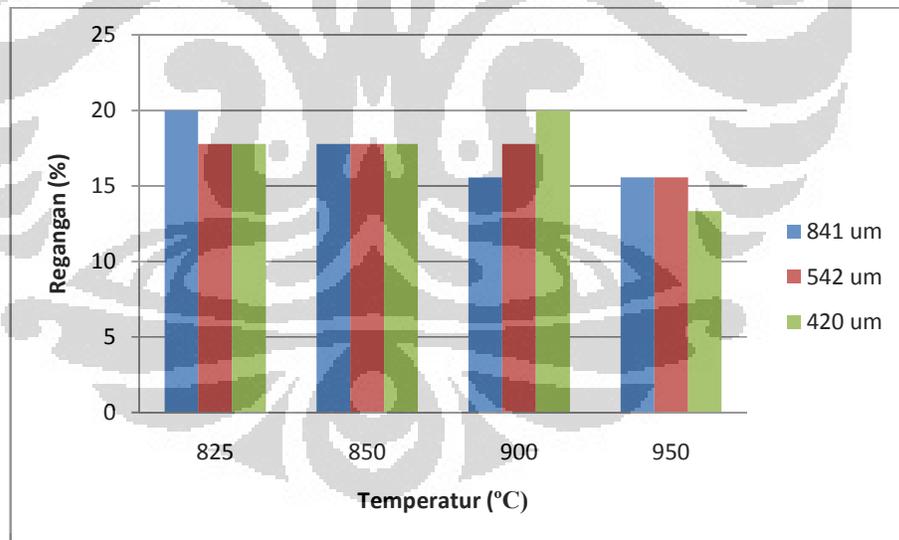
Gambar 4.5. Grafik hubungan ukuran partikel dan temperatur sinter selama 2 jam dengan nilai porositas logam.

Sedangkan pada hubungan antara ukuran partikel dengan nilai prosentase porositas menunjukkan besarnya nilai prosentase porositas yang terjadi pada bakalan dengan ukuran partikel garam 841 μm dan 420 μm dengan temperatur sinter 825°C dan 850 °C disebabkan karena besarnya volume pori dan banyaknya jumlah pori yang ada pada bakalan. Namun prosentase porositas ini juga tidak dapat terlepas dari pengaruh perlakuan temperatur *sintering* yang dilakukan. Pada perlakuan temperatur 900°C dan 950°C, bakalan dengan ukuran partikel garam karbonat 841 μm dan 420 μm , prosentase porositas bakalan nya menurun dan cenderung menjadi lebih rendah dibandingkan dengan bakalan yang memiliki ukuran partikel 542 μm . Hal ini juga disebabkan karena terjadi *shrinkage* dan pengurangan fraksi volume pori yang lebih besar karena pengaruh persebaran pori yang lebih merata.

4.7. KEKUATAN TEKAN TEMBAGA BUSA



Gambar 4.6. Grafik kekuatan tegangan tekan hasil pengujian sampel tembaga busa pada tiap temperatur sinter selama 2 jam.



Gambar 4.7. Grafik kekuatan regangan tekan hasil pengujian sampel tembaga busa pada tiap temperatur sinter selama 2 jam.

Porositas yang menyusun tembaga busa akan mempengaruhi sifat mekanis dari tembaga busa. Ketika benda berpori mengalami atau menerima beban penekanan dari luar, maka gaya tersebut akan terkonsentrasi pada dinding pori

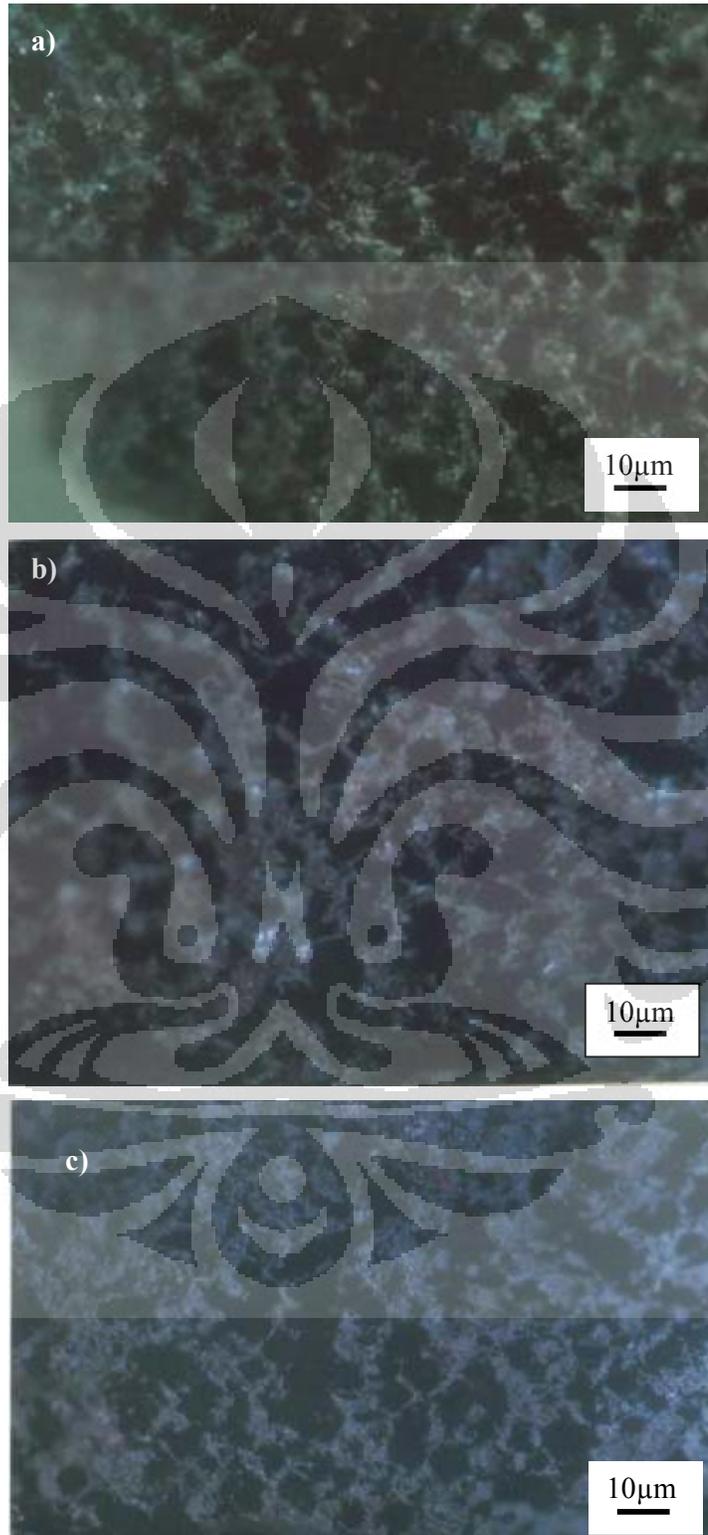
yang menyebabkan terjadinya deformasi dengan mudah. Pada penelitian yang dilakukan sebelumnya oleh Iman Firmansyah I.^[11], dimana di dalam penelitian tersebut menggunakan variabel perbedaan prosentase berat kalium karbonat yang digunakan, masing-masing variabel memiliki perbedaan kekuatan tekan yang sangat signifikan. Pada penelitian tersebut disebutkan bahwa sampel dengan prosentase 30% berat kalium karbonat memiliki kekuatan tekan lebih besar daripada sampel dengan 0% berat kalium karbonat. Namun pada prosentase yang lebih besar (40%-60%), kekuatan tekannya kembali menurun. Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan tekan logam busa tidak hanya dipengaruhi oleh tingkat porositas saja.

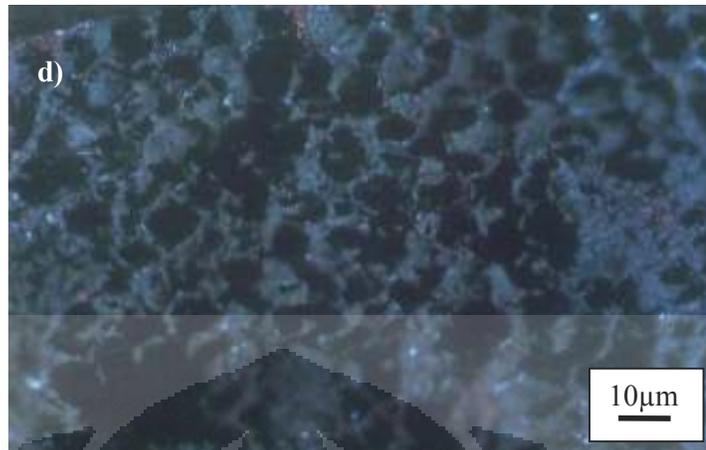
Gambar 4.6. menunjukkan bahwa pada setiap variabel, baik yang menggunakan perbedaan temperatur sinter ataupun perbedaan ukuran partikel kalium karbonat, memiliki kekuatan tegangan tekan yang hampir sama pada tiap pengujian.

Namun apabila data kekuatan tekan dibandingkan dengan data densitas dan porositas tembaga busa pada gambar 4.4 dan 4.5, yang menggambarkan tingkat densitas dan porositas tembaga busa menunjukkan sampel dengan porositas tertinggi (temperatur 825°C dengan ukuran garam karbonat 420µm) memiliki kekuatan tekan maksimal yang sama dengan sampel yang memiliki porositas terendah (temperatur sinter 950 °C dengan ukuran rata-rata garam karbonat 420µm) yaitu sebesar 178,2 MPa.

Hal ini menunjukkan besarnya pengaruh jumlah pori yang terbentuk pada tembaga busa dalam terhadap sifat mekanis tembaga busa, dalam hal ini adalah kekuatan tekan. Selain itu kekuatan tekan logam busa juga dipengaruhi oleh kondisi distribusi serta bentuk pori yang dimiliki oleh tembaga busa. Karena pori yang terbentuk dalam logam busa menjadi salah satu faktor yang membuat ketahanan tekan suatu logam busa meningkat^[3].

4.8. STRUKTUR MAKRO TEMBAGA BUSA



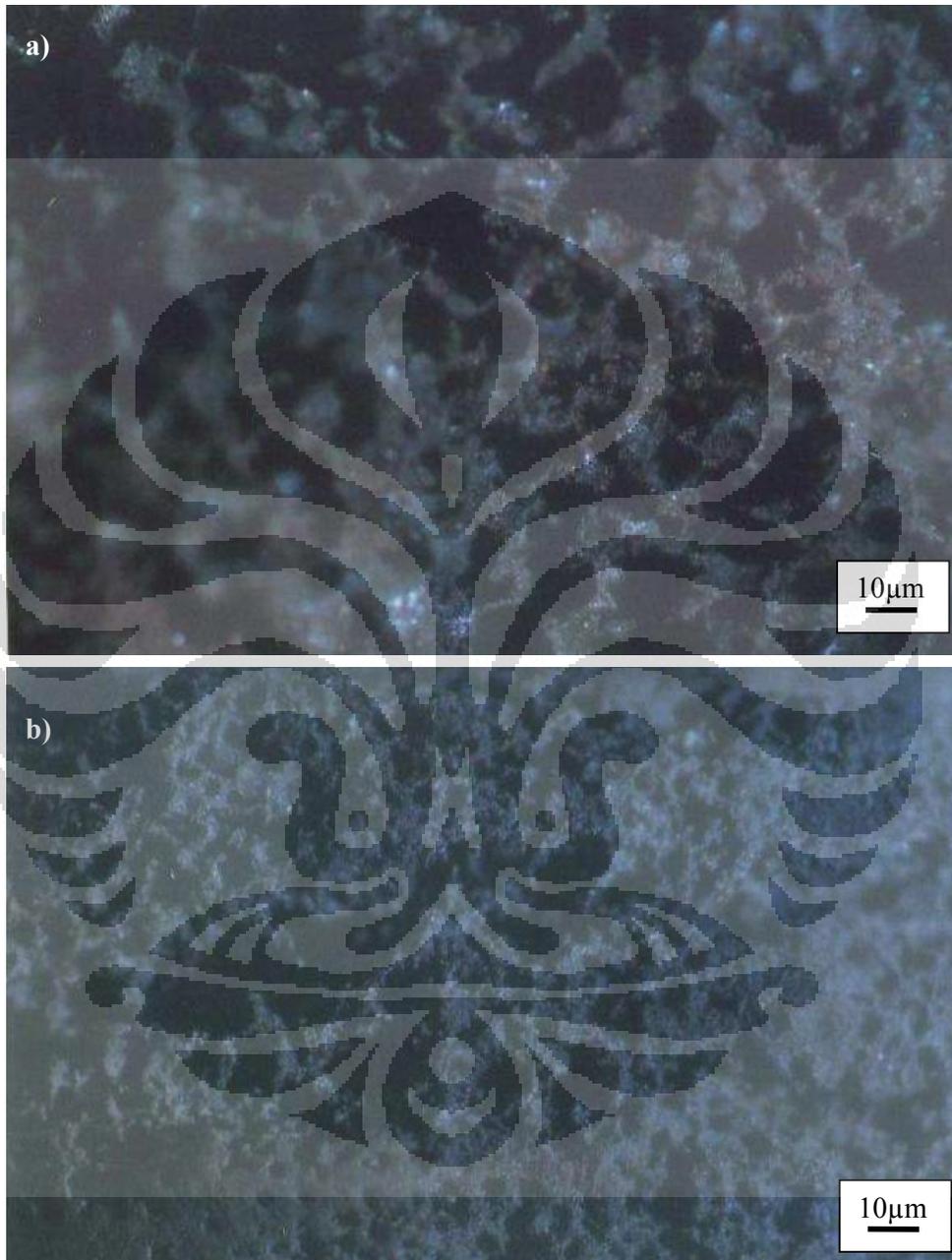


Gambar 4.8. Struktur pori tembaga busa dengan rata-rata ukuran partikel garam 842 μm (perbesaran 10 x). proses sinter 825°C(a), proses sinter 850°C(b), proses sinter 900°C(c), dan proses sinter 950°C(d) dan dengan waktu tahan sinter selama 2 jam.

Pada gambar 4.7 terlihat struktur makro pori dari tembaga busa yang memiliki ukuran partikel garam kalium karbonat dengan diameter rata-rata 842 μm setelah mengalami proses pelarutan. Dari gambar di atas dapat dilihat perbedaan bentuk pori yang terbentuk pada tembaga busa. Pada gambar 4.7 a), pori yang membentuk sel terbuka hampir tidak terlihat. Pada gambar 4.7 b), di beberapa bagian juga terbentuk pori dengan sifat sel terbuka namun dengan jumlah yang masih sedikit. Sedangkan pada gambar 4.7 c), pori pada sampel yang terbentuk sudah mulai banyak terlihat pori yang berupa sel terbuka. Dan pada sampel 4.7 d) memiliki sel pori yang bersifat terbuka yang terlihat dengan jelas.

Adanya perbedaan struktur pori gambar 4.7 dikarenakan pada sampel yang mengalami proses sinter dengan temperatur yang lebih rendah (825°C) memiliki kecenderungan membentuk pori dengan sifat sel terbuka yang lebih kecil dibandingkan dengan sampel yang mengalami proses sinter dengan temperatur yang lebih tinggi (950°C). Pada sinter dengan temperatur yang lebih tinggi, yaitu pada temperatur 900°C dan 950°C sudah merupakan titik lebur bagi kalium karbonat, dimana titik lebur potassium karbonat pada kondisi atmosfer Nitrogen adalah 900°C ^[15]. Akibatnya, ketika kalium karbonat melebur, maka akan membuat pori dimana kalium karbonat berada saling terkoneksi yang juga didorong oleh pemuaiian yang terjadi. Sedangkan pada temperatur rendah di

bawah titik lebur garam (825°C dan 850°C), pemuaian yang terjadi tidak begitu besar karena terhalang oleh proses difusi serbuk tembaga.

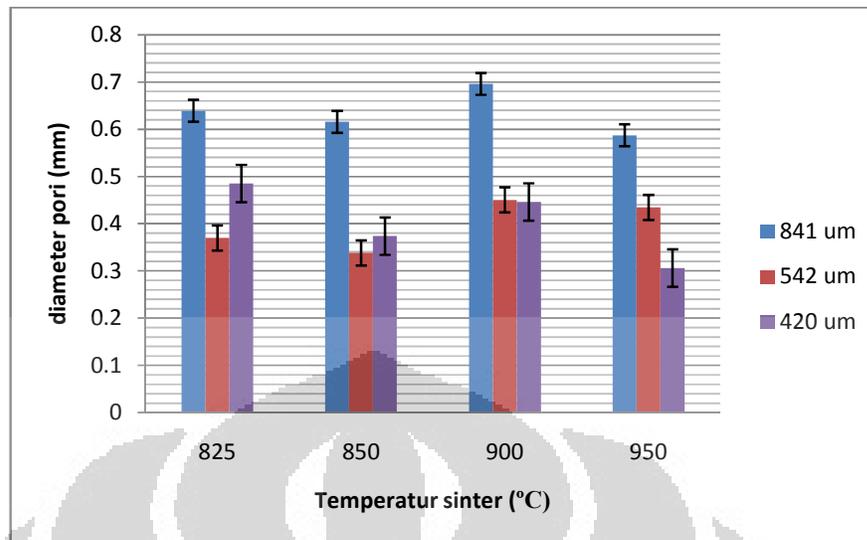




Gambar 4.9. Struktur pori sampel dengan proses temperatur sinter 850°C selama 2 jam(perbesaran 10x).ukuran partikel rata-rata garam 842 um(a), ukuran partikel rata-rata garam 541 um(b), ukuran partikel rata-rata garam 420 um(c).

Pada gambar 4.8., sampel a membentuk pori sel terbuka namun dengan jumlah yang relative masih sedikit bila dibandingkan dengan sampel b ataupun c. perbedaan banyaknya jumlah sel yang terbentuk ini juga sudah dijelaskan sebelumnya, dimana pengaruh fraksi volume garam yang digunakan juga berpengaruh. Pada sampel c yang memiliki ukuran partikel rata-rata garam paling kecil terlihat membentuk pori dengan sel terbuka yang lebih banyak dibandingkan sampel yang lain. Hal ini dikarenakan semakin besar ukuran partikel garam, maka semakin sedikit pula fraksi volumenya. Akibatnya kesempatan bagi pori untuk saling terhubung juga semakin kecil. Sedangkan pada partikel yang ukurannya lebih kecil, walaupun cenderung mengalami segregasi, tetapi karena memiliki fraksi volume yang jauh lebih besar tetap memungkinkan terjadinya koneksi antar pori.

Pada gambar 4.9. menunjukkan ukuran rata-rata diameter pori yang terbentuk pada tembaga busa hasil penelitian. Pengukuran rata-rata diameter pori dilakukan dengan menggunakan *measuring microscope* yang ada di DTMM FTUI. Pengukuran dilakukan pada tiga buah pori pada masing-masing sampel dimana pori yang diukur dipilih secara acak.



Gambar 4.10. Grafik hubungan ukuran butir garam karbonat dengan rata-rata diameter pori yang terbentuk pada tembaga busa pada masing-masing temperatur sinter dengan waktu tahan selama 2 jam.

Hasil pengukuran diameter pori ini menunjukkan tembaga busa yang menggunakan garam karbonat berukuran rata-rata 841 μm memiliki ukuran pori yang terbentuk lebih besar daripada tembaga busa yang menggunakan garam karbonat dengan ukuran partikel yang lebih kecil, yaitu ukuran 542 μm dan 420 μm . Namun pada sebagian sampel dengan ukuran partikel 542 μm , kecuali sampel yang disinter pada temperatur 950°C, menunjukkan rata-rata diameter pori yang dimiliki berukuran lebih kecil daripada tembaga busa yang menggunakan garam karbonat dengan ukuran rata-rata 420 μm .

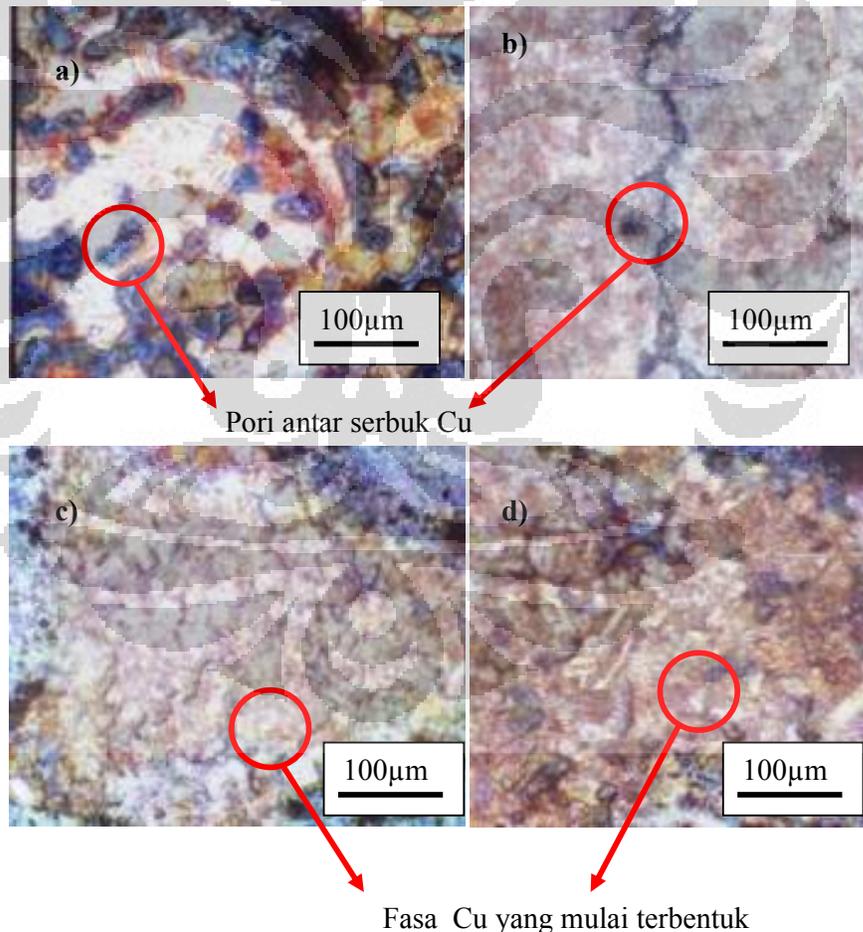
Adapun hal yang menyebabkan terjadinya perbedaan ukuran diameter pori yang terbentuk pada tembaga busa. Yang pertama adalah karena banyaknya terbentuk sel pori yang bersifat terbuka pada sampel dengan ukuran partikel garam 420 μm , sehingga ada beberapa pori yang terbentuk karena tergabungnya dua pori atau lebih, sehingga membentuk pori dengan ukuran yang lebih besar.

Namun apabila gambar 4.10 dibandingkan dengan gambar 4.4 dan 4.5, ketiga grafik tersebut menunjukkan adanya fenomena yang terjadi pada saat temperatur 900°C. Dimana sampel dengan ukuran partikel garam karbonat 420 μm mengalami peningkatan densitas dan penurunan porositas yang lebih besar daripada sampel dengan ukuran partikel yang lebih besar.

Begitu juga pada gambar 4.10 yang menunjukkan diameter pori sampel dengan ukuran partikel garam karbonat $420\ \mu\text{m}$ yang pada temperatur 825°C dan 850°C lebih besar daripada sampel dengan ukuran partikel karbonat $542\ \mu\text{m}$, namun pada temperatur 900°C dan 950°C memiliki diameter lebih rendah.

Fenomena ini menunjukkan adanya pengaruh temperatur sinter terhadap pengontrolan pori tembaga busa. Dalam penelitian ini, secara kualitatif pada temperatur 825°C dan 850°C masih dimungkinkan untuk dilakukan pengontrolan pori pada tembaga busa. Namun mulai temperatur 900°C dan 950°C , pengontrolan pori dengan ukuran partikel garam karbonat tidak memberikan pengaruh yang berarti.

4.9. STRUKTUR MIKRO TEMBAGA BUSA

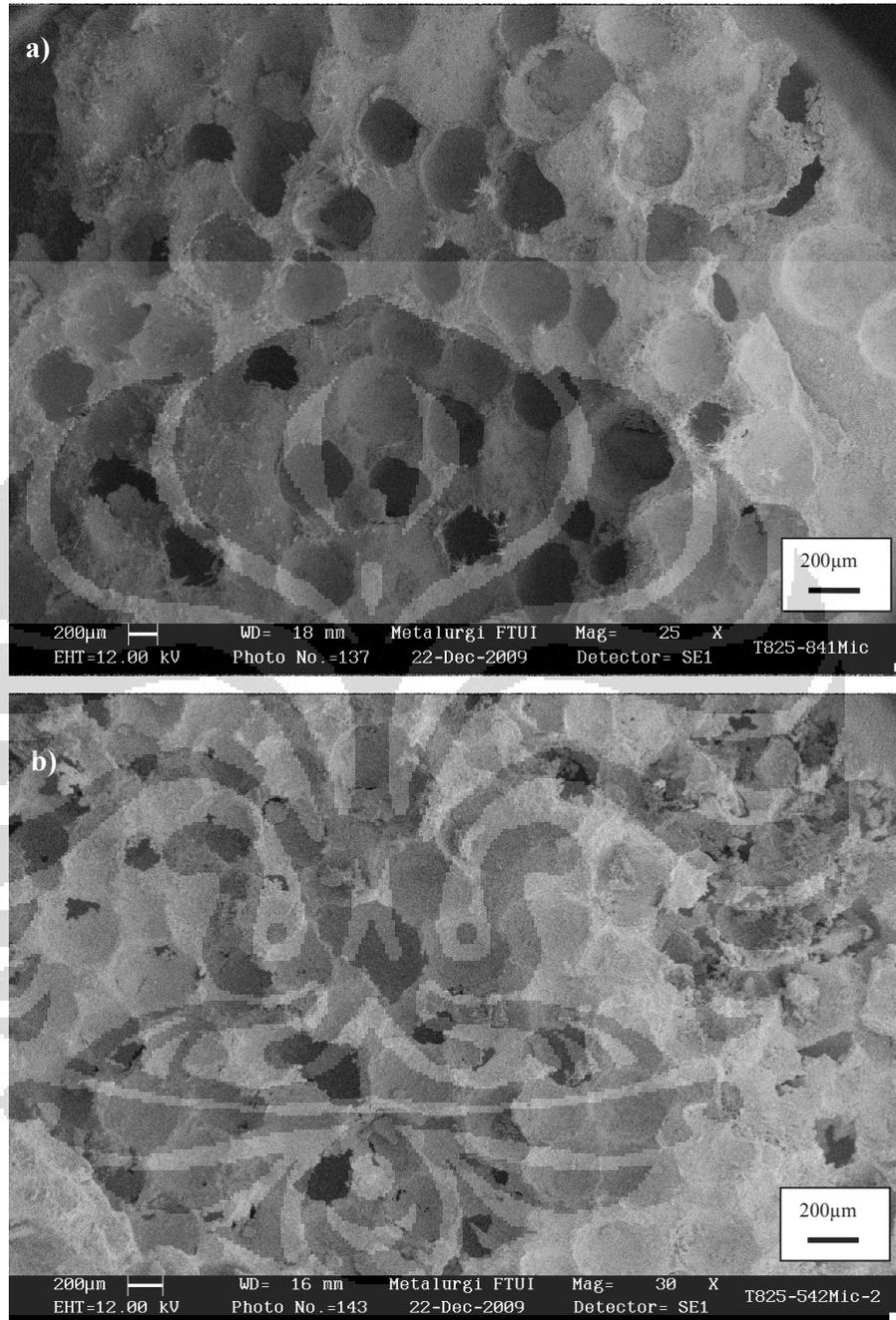


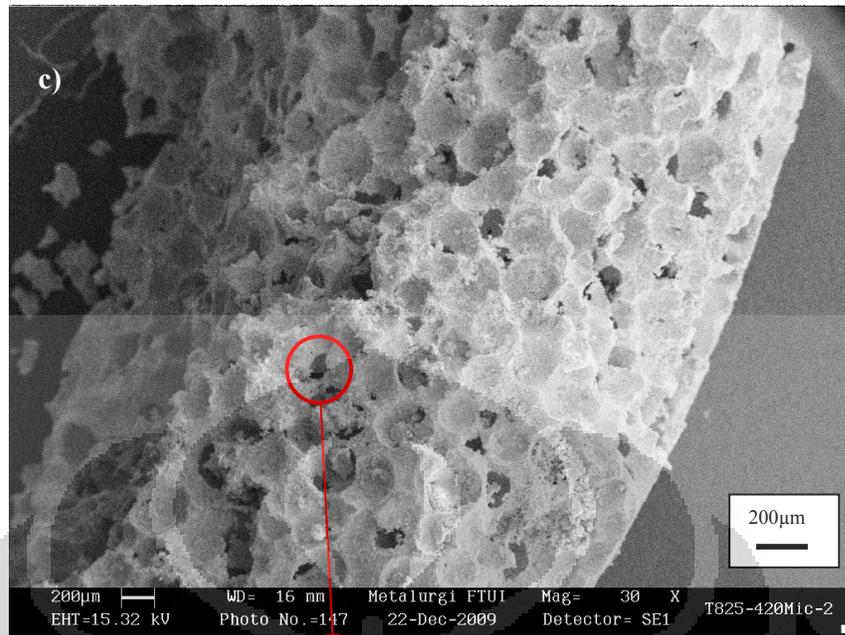
Gambar 4.11. Foto struktur mikro pembentukan fasa Cu pada tembaga busa dengan ukuran rata-rata partikel garam $842\ \mu\text{m}$ dan pada temperatur sinter 825°C (a), 850°C (b), 900°C (c), dan 950°C (d)

Pemotretan foto mikro untuk mengetahui adanya fasa yang terbentuk pada tembaga busa dilakukan dengan menggunakan perbesaran 500x. Pada gambar 4.10 a., sampel dengan temperatur sinter 825°C belum terlihat terbentuknya fasa Cu. Pada foto tersebut terlihat banyak pori antar serbuk tembaga yang ditandakan dengan gambar berwarna gelap dan berbentuk agak kebulatan. Pori ini bukanlah pori yang terjadi akibat larutnya garam karbonat, tapi merupakan akibat dari belum sempurnanya difusi yang terjadi antar partikel tembaga. Pada gambar 4.10 b juga belum terlihat dengan jelas terbentuknya fasa. Seperti halnya pada gambar 4.10.a, kemungkinan juga masih belum terdifusinya serbuk tembaga pada temperatur 850 °C. Sedangkan pada sampel yang mengalami proses sinter pada temperatur 900°C sudah mulai terlihat terbentuknya fasa yang walaupun masih belum terlihat dengan jelas. Sedangkan pada gambar 4.10.d, menunjukkan struktur fasa yang mulai terbentuk.

Hal ini menunjukkan adanya pengaruh temperatur yang digunakan dalam proses sinter terhadap terbentuknya fasa pada tembaga busa. Semakin tinggi temperatur yang digunakan, akan makin jelas fasa yang terbentuk karena serbuk yang telah berdifusi dengan lebih sempurna. Pada gambar 4.10 juga terlihat berkurangnya pori yang terbentuk antar serbuk tembaga karena tereliminasi oleh difusi serbuk tembaga. Akibatnya, semakin baik difusi antar serbuk yang terjadi, makin baik pula sifat mekanis serta konduktivitas yang dimiliki oleh tembaga busa. Namun tentunya akan membutuhkan biaya yang lebih besar.

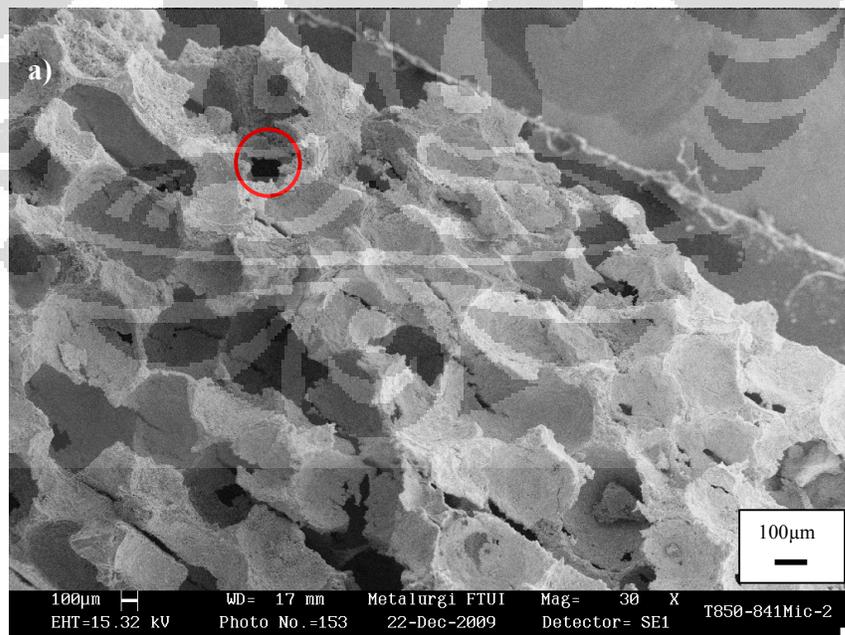
4.10. STRUKTUR MIKRO TEMBAGA BUSA (FOTO SEM)

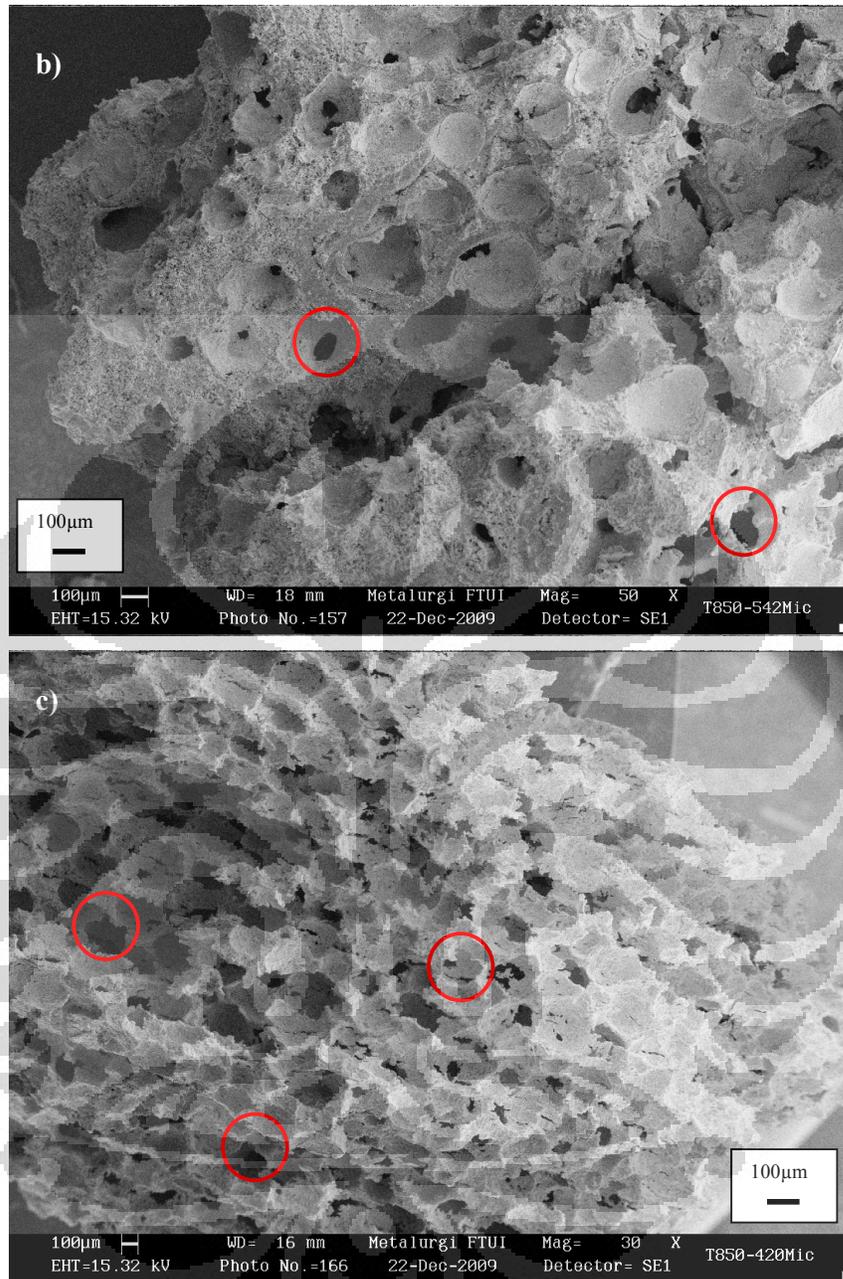




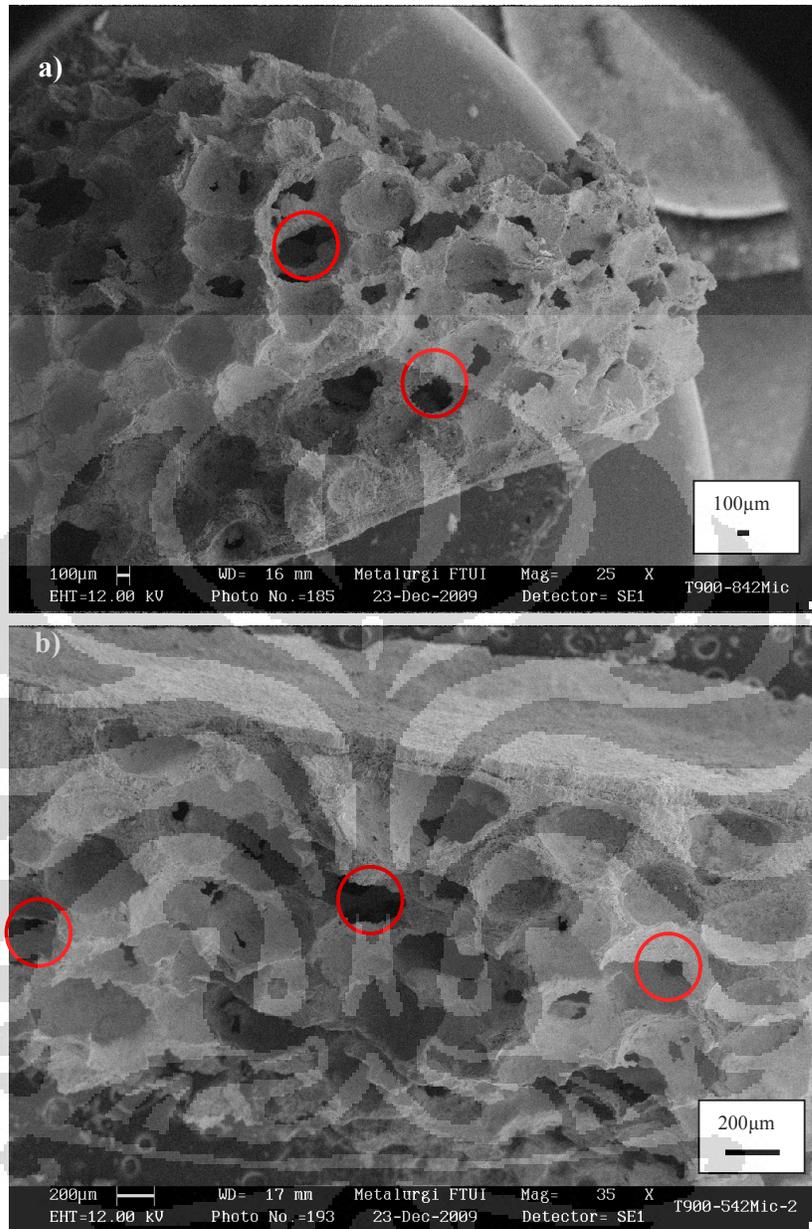
interkoneksi

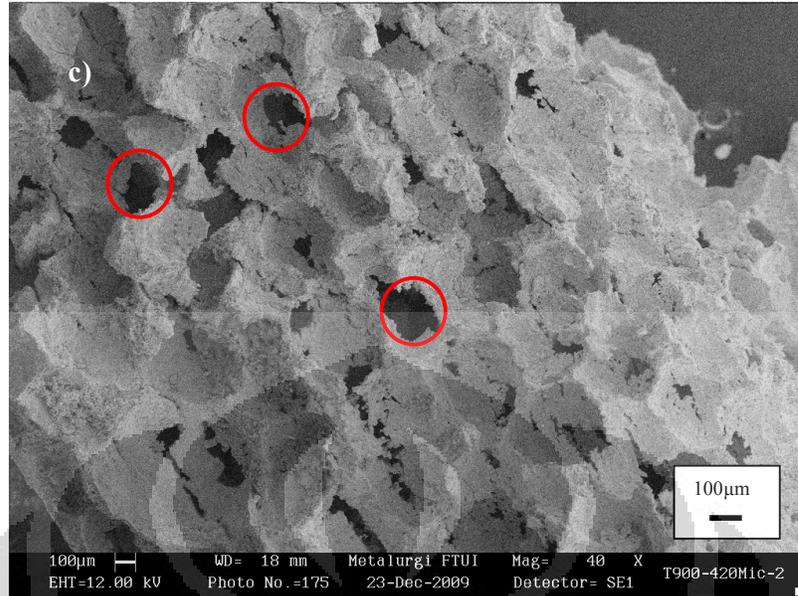
Gambar 4.12. Foto SEM tembaga busa yang disinter dengan temperatur 825°C selama 2 jam. a) ukuran partikel karbonat 842μm, b) ukuran partikel karbonat 541μm, c) ukuran partikel karbonat 420μm.



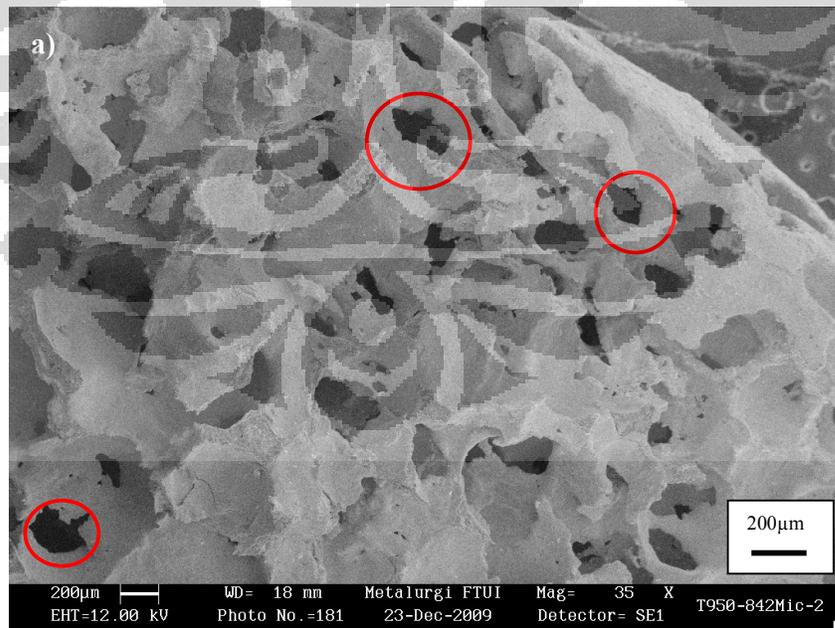


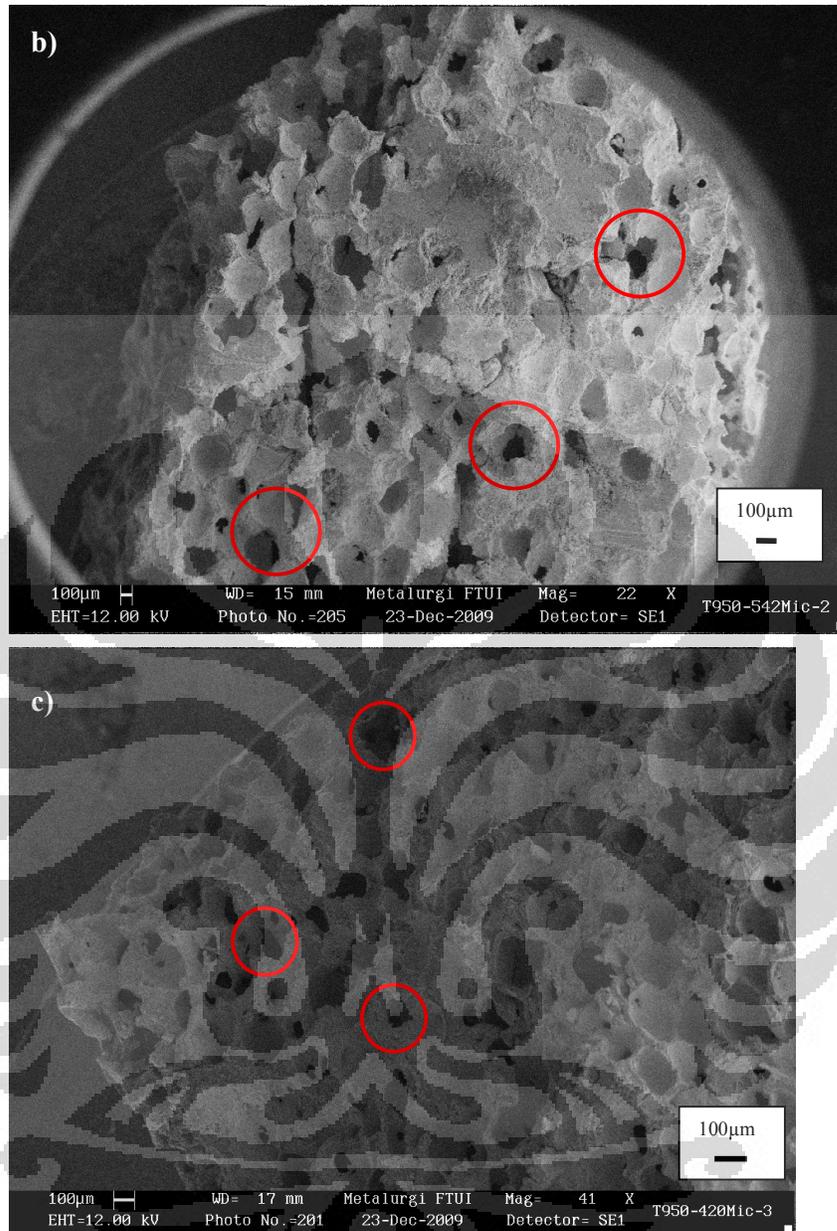
Gambar 4.13. Foto SEM tembaga busa yang disinter dengan temperatur 850 °C selama 2 jam. a) ukuran partikel karbonat 842µm, b) ukuran partikel karbonat 541µm, c) ukuran partikel karbonat 420µm. Contoh interkoneksi pori ditandai dengan lingkaran berwarna merah.





Gambar 4.14. Foto SEM tembaga busa yang disinter dengan temperatur 900°C selama 2 jam. a) ukuran partikel karbonat 842μm, b) ukuran partikel karbonat 541μm, c) ukuran partikel karbonat 420μm. Contoh interkoneksi pori ditandai dengan lingkaran berwarna merah.





Gambar 4.15. Foto SEM tembaga busa yang disinter dengan temperatur 950°C selama 2 jam. a) ukuran partikel karbonat 842 μm , b) ukuran partikel karbonat 541 μm , c) ukuran partikel karbonat 420 μm . Contoh interkoneksi pori ditandai dengan lingkaran berwarna merah.

Selain melakukan foto mikro untuk mengetahui struktur fasa, juga dilakukan foto SEM untuk mengetahui morfologi pori yang terbentuk pada tembaga busa dalam skala mikro.

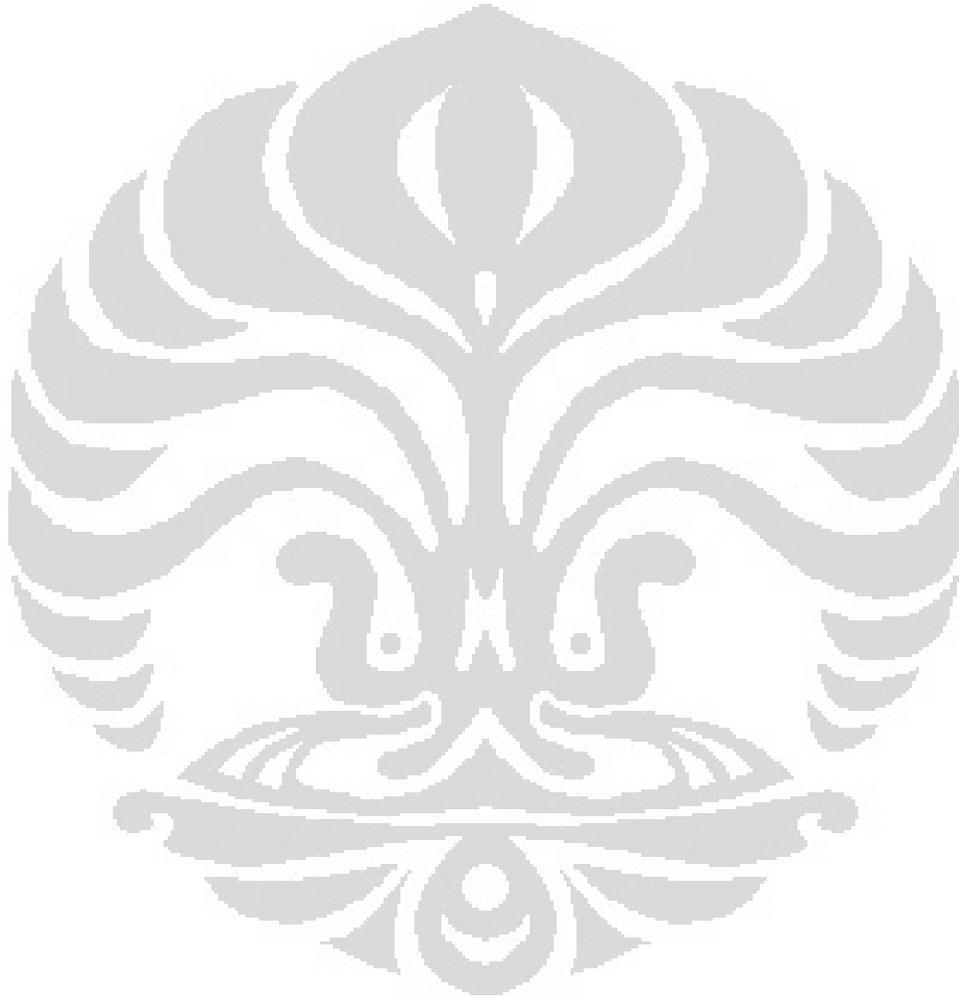
Pada gambar 4.11. a dan b tidak menunjukkan terbentuknya struktur pori pada tembaga busa dengan sifat sel terbuka. Sifat sel terbuka baru mulai terlihat pada gambar 4.11. c, yang merupakan sampel dengan ukuran rata-rata kalium karbonat yang paling kecil diantara ketiga sampel yang disinter dengan temperatur 825°C selama 2 jam. Namun jumlah pori dengan sifat sel terbuka yang terbentuk masih sangat sedikit.

Pada gambar 4.12., pori dengan sel terbuka mulai terlihat pada sampel a yang memiliki ukuran rata-rata kalium karbonat 841 μm walaupun jumlahnya masih sangat sedikit. Namun pada sampel gambar 4.12 b dan c, sel terbuka yang terbentuk mulai terlihat lebih banyak dibandingkan dengan gambar 4.11 yang disinter dengan temperatur 825°C selama 2 jam. Begitu juga pada gambar 4.13 dan 4.14 dimana jumlah sel terbuka yang terbentuk mulai terlihat lebih banyak dibandingkan dengan gambar 4.11 dan 4.12. Fenomena terbentuknya sel pori terbuka pada sampel dengan ukuran kalium karbonat yang lebih kecil pada temperature sinter yang sama (sampel c lebih banyak dan jelas terlihat dari sampel a dan b, dan sampel b lebih banyak dan jelas terlihat dari sampel a) juga terjadi pada masing-masing temperatur sinter.

Hal ini menunjukkan adanya pengaruh temperatur sinter terhadap terbentuknya sel pori terbuka pada tembaga busa. Dimana semakin tinggi temperatur sinter yang digunakan, maka akan semakin banyak sel pori terbuka yang terbentuk pada tembaga busa. Ini disebabkan makin tinggi temperatur sinter, maka kalium karbonat akan mendekati titik leburnya (900°C pada atmosfer nitrogen), sehingga akan menyebabkan ukuran pori yang dibentuk oleh garam karbonat makin memuai. Semakin besar pemuaiannya yang terjadi akan menyebabkan pori yang ada saling terhubung (terjadi interkoneksi) sehingga terbentuklah pori dengan sifat sel yang terbuka.

Selain itu ukuran kalium karbonat yang digunakan juga ikut mempengaruhi kemungkinan terbentuknya sel pori yang bersifat terbuka, dimana makin kecil ukuran kalium karbonat yang digunakan, maka akan makin banyak kemungkinan sel pori terbuka yang terbentuk. Hal ini

disebabkan makin kecil ukuran partikel kalium karbonat yang digunakan, makin luas permukaan pori yang terbentuk. Dengan semakin luas pori yang terbentuk, pada fraksi berat garam karbonat yang sama, akan semakin besar kemungkinan terbentuknya interkoneksi antar pori yang terbentuk, sehingga sel pori terbuka yang terbentuk akan semakin banyak.



BAB V

KESIMPULAN

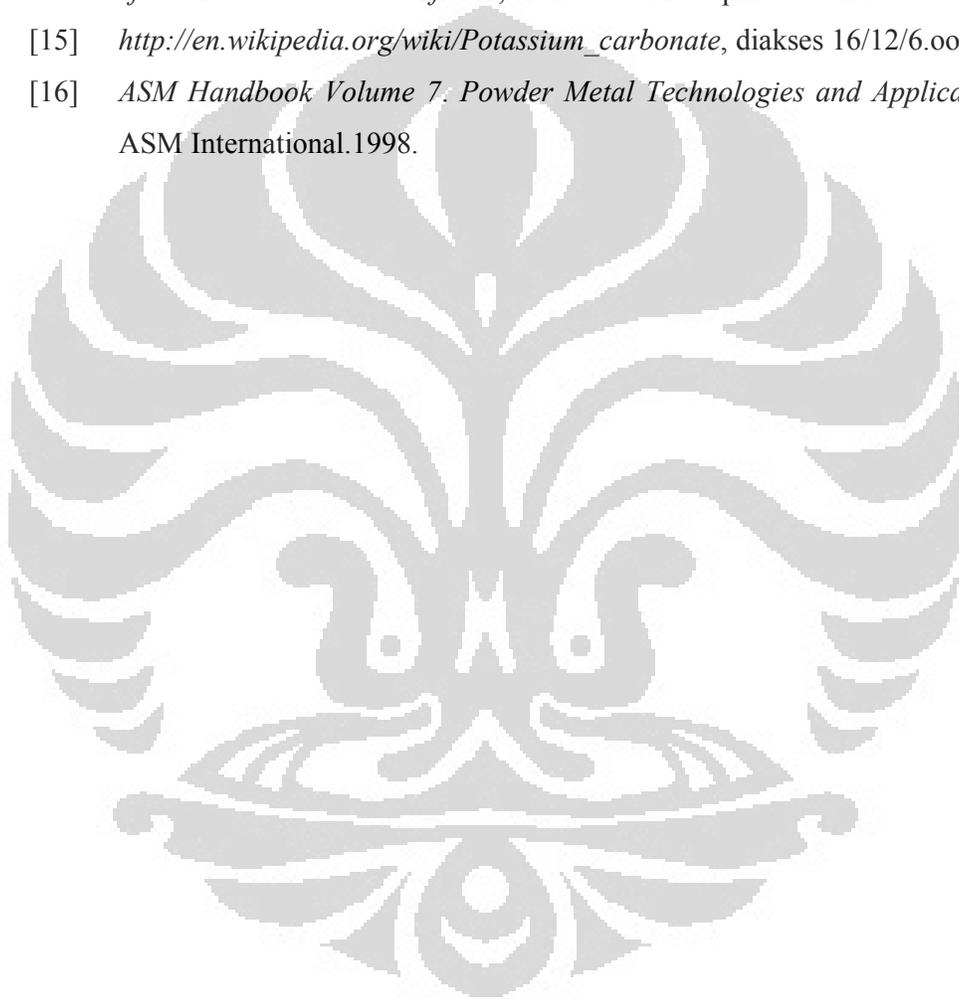
5. KESIMPULAN

1. Densitas tembaga busa yang paling tinggi yaitu $2,531 \text{ gr/cm}^3$ adalah pada tembaga busa dengan ukuran partikel $420 \text{ }\mu\text{m}$ dan pada proses sinter dengan temperatur 950°C selama 2 jam. Sedangkan densitas terendah sebesar $1,694 \text{ gr/cm}^3$ dimiliki oleh tembaga busa dengan ukuran partikel garam $420 \text{ }\mu\text{m}$ dan temperatur sinter 825°C selama 2 jam.
2. Porositas tembaga busa yang paling tinggi sebesar $81,092\%$ dimiliki oleh tembaga busa dengan ukuran partikel garam $420 \text{ }\mu\text{m}$ dan dengan proses sinter pada temperatur 825°C selama 2 jam. Sedangkan porositas terendah sebesar $71,748\%$ dimiliki oleh tembaga busa dengan ukuran partikel garam $420 \text{ }\mu\text{m}$ dan temperatur sinter 950°C selama 2 jam.
3. Pada hasil pengamatan struktur makro dan mikro menunjukkan tembaga busa hasil penelitian memiliki pori sel terbuka paling banyak terbentuk pada tembaga busa yang memiliki ukuran partikel garam $420 \text{ }\mu\text{m}$ dan pada temperatur sinter 950°C .
4. Fasa yang terbentuk pada tembaga busa baru mulai terlihat ketika mengalami proses sinter dengan temperatur 900°C dan 950°C .
5. Secara kualitatif diameter pori yang makin besar, porositas yang tinggi, serta struktur sel pori yang terbuka akan meningkatkan kemampuan menyerap energi logam busa.
6. Tingkat porositas dan densitas tembaga busa lebih banyak dipengaruhi oleh perbedaan perlakuan temperatur sinter, dimana semakin tinggi temperatur akan menurunkan porositas tembaga busa dan meningkatkan densitasnya.
7. Proses pengontrolan pori pada tembaga busa dengan menggunakan ukuran partikel garam karbonat dapat dilakukan pada temperatur sinter 825°C dan 850°C , sedangkan pada temperatur 900°C dan 950°C , proses pengontrolan pori tidak dapat dilakukan.

DAFTAR ACUAN

- [1] Banhart, John (2001). *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams*. Progress in Materials Science, 46, 559–632.
- [2] N. Babcsán, J. Banhart, and D. Leitlmeier. *Metal Foams – Manufacture and Physics of Foaming*.
- [3] Louis Philippe Lefebvre , John Banhart , David Dunand. *MetFoam 2007: Porous Metal and Metallic Foams*. Proceedings of the Fifth International Conference on Porous Metals and Metallic Foams, September 5–7, 2007, Montreal, Canada.
- [4] J. Baumeister U, J. Banhart, M. Weber. *Aluminium Foams for Transport Industry*. Materials & Design, Vol.18,Nos.4/6, pp. 217-220. (1997)
- [5] Banhart, Joe. *Metallic Foams*. Europhysics News. 1 .(1999)
- [6] Azzi, Wassim Elias. *A Systematic Study on The Mechanical and Thermal Properties of Open Cell Metal Foams for Aerospace Applications*. Mechanical Engineering, North Carolina State University.
- [7] Banhart, Joe. *Manufacturing Routes for Metallic Foams*. Solidification Science, JOM, December. 2000.
- [8] Zhao.Y.Y , Fung .T, Zhang.L.P, Zhang.F.L (2005). *Lost Carbonate Sintering Process for Manufacturing Metal Foams*. Scripta Materialia Volume 52, 295-298.
- [9] German. Randall M., *Powder Metallurgy Science*. (New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 1984)
- [10] *Rangkuman Kuliah Pengantar Metalurgi Serbuk*, Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- [11] F.I., Ika. *Pembuatan Tembaga Busa Dengan Menggunakan Proses Sinter dan Pelarutan Karbonat*. Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia. 2008.
- [12] <http://www.leekhigh.staffs.sch.uk/science/chemistry/chim/CRfolder/%25YCuC03.htm>, diakses 16/12/09 pkl 5.00 AM

- [13] <http://www.springerlink.com/content/pm342467674722xj/>, diakses 16/12/09 pkl 6.00 AM
- [14] http://www.sciencedirect.com/sciencse?_ob=ArticleURL&_udi=B6THV-3T17JNN1&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=113725915&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=c85ceefa5d9299c6ec7c94dd8a2fc8c1, diakses 16/12/09 pkl 6.00 AM
- [15] http://en.wikipedia.org/wiki/Potassium_carbonate, diakses 16/12/6.00 AM
- [16] *ASM Handbook Volume 7. Powder Metal Technologies and Application.* ASM International.1998.



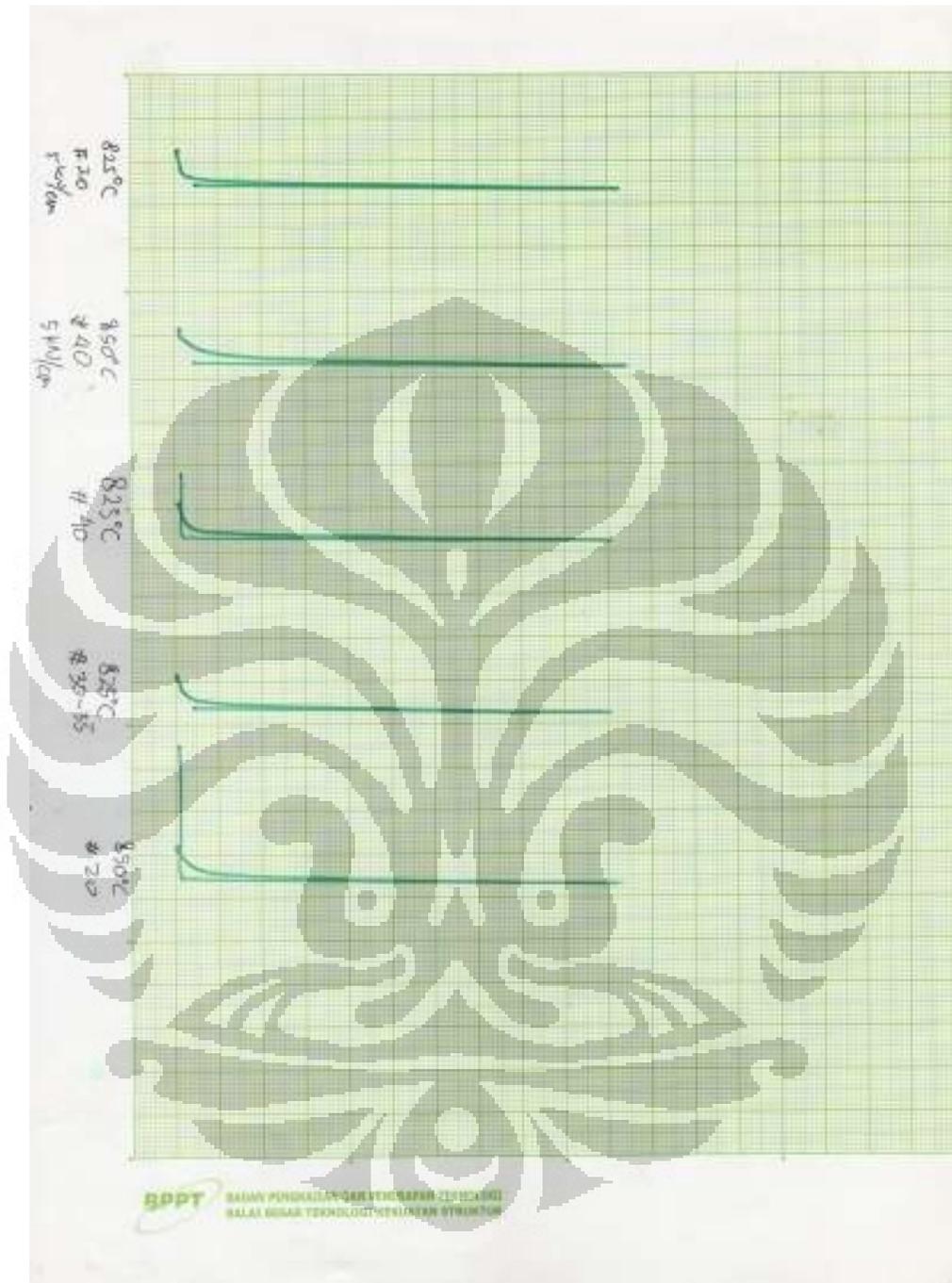


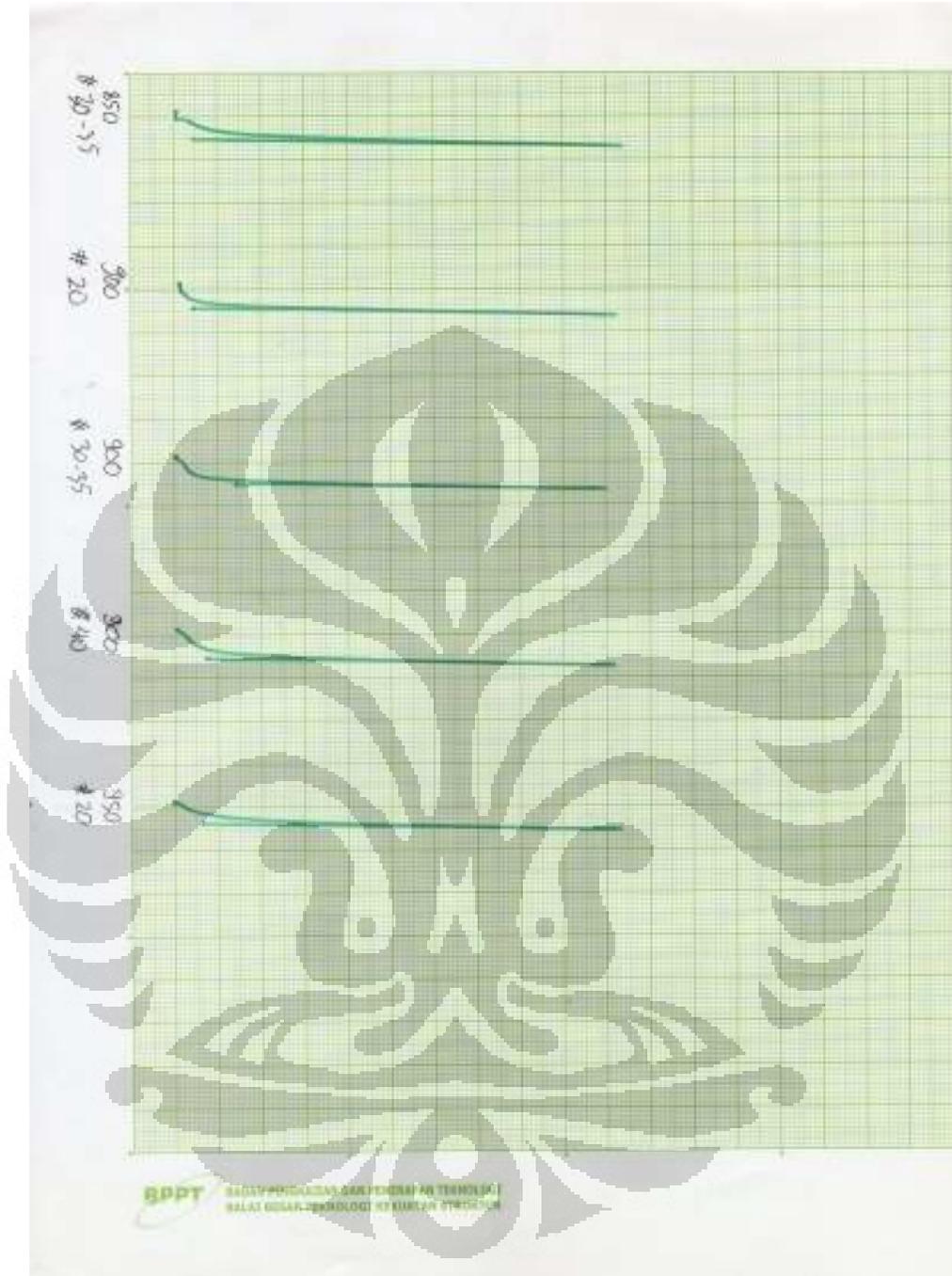
LAMPIRAN 1
DATA POROSITAS DAN DENSITAS

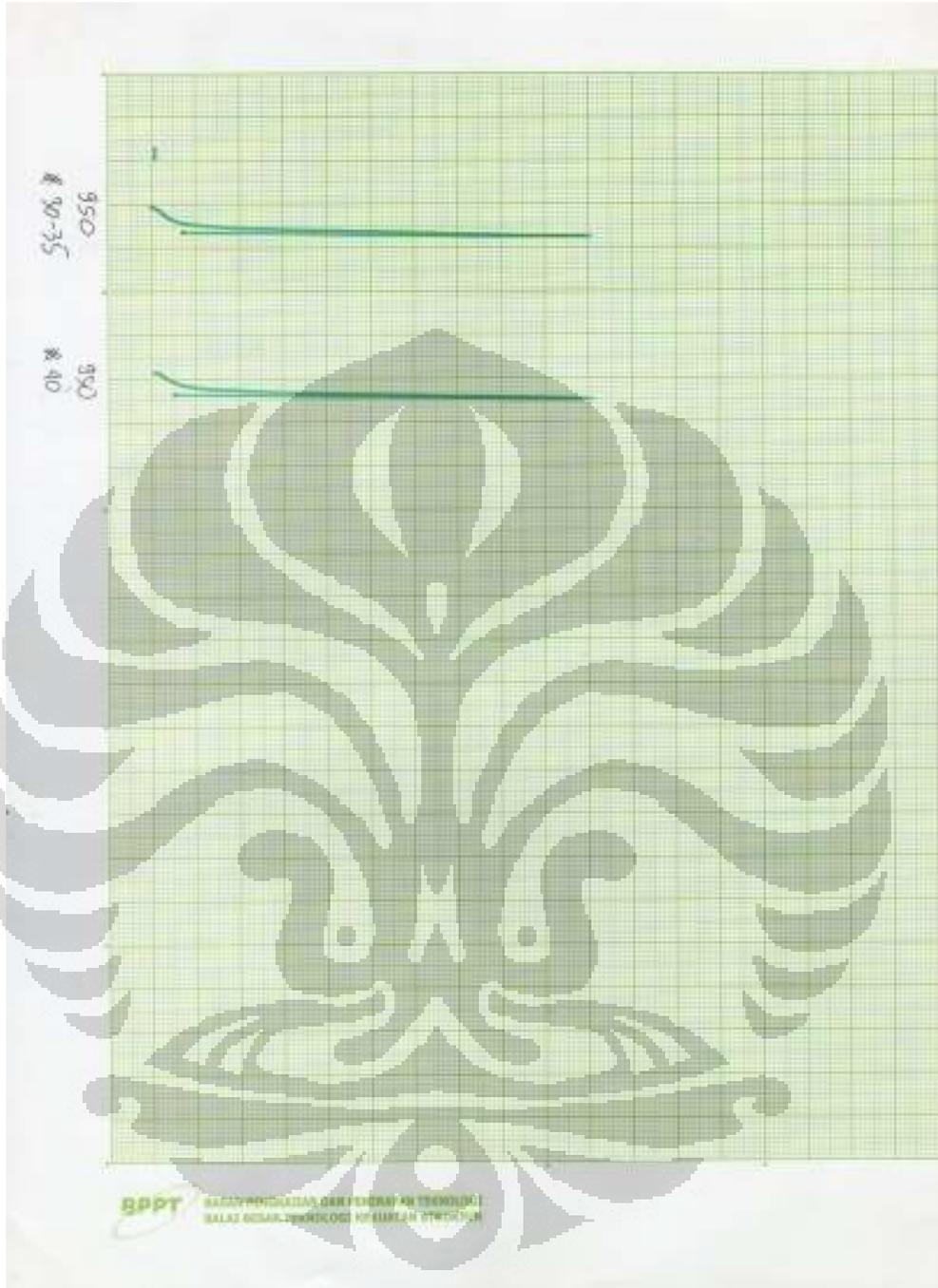
Temperatur sinter (°C)	Ukuran rata-rata Kalium Karbonat (um)	Berat basah (gr)	Berat kering (gr)	V (cm ³)	ρ_{ave} (gr/cm ³)	Porositas ave (%)
825	841	1.95	3.69	1.95	1.838194771	79.48443336
		1.9	3.48	1.9		
		1.72	3.08	1.72		
	542	2.25	4.19	2.25	1.878376275	79.03597908
		2.16	4.13	2.16		
		2.3	4.28	2.3		
	420	2.57	4.08	2.57	1.694144736	81.09213465
		2.54	4.07	2.54		
		2.14	4.05	2.14		
850	841	1.9	3.44	1.9	1.854315989	79.30450905
		1.95	3.67	1.95		
		2.16	4.04	2.16		
	542	2.09	4.05	2.09	1.95176821	78.21687265
		2.33	4.5	2.33		
		2.17	4.31	2.17		
	420	2.13	3.79	2.13	1.822211121	79.66282231
		2	3.68	2		
		2.03	3.75	2.03		
900	841	1.96	3.97	1.96	2.103110576	76.52778375
		1.78	3.88	1.78		
		1.73	3.64	1.73		
	542	1.91	3.85	1.91	2.075022821	76.84126315
		1.98	4.15	1.98		
		1.94	4.1	1.94		
	420	1.75	3.92	1.75	2.06028146	77.00578728
		2.1	4	2.1		
		1.94	3.95	1.94		
950	841	1.7	4.34	1.7	2.465763357	72.48031968
		1.48	3.51	1.48		
		1.65	4.08	1.65		
	542	1.87	4	1.87	2.373535982	73.50964306
		1.56	3.92	1.56		
		1.6	3.95	1.6		
	420	1.6	4.21	1.6	2.531353855	71.74828287
		1.7	4.23	1.7		
		1.77	4.38	1.77		



LAMPIRAN 2
GRAFIK UJI TEKAN DARI MESIN SCHRENCK









LAMPIRAN 3
GRAFIK HASIL UJI PERHITUNGAN KEKUATAN TEKAN

X : 5:1
Y : 5 kN/cm

Temperatur Sinter (°C)	Ukuran Kalium Karbonat (μm)	x	y	x1 (mm)	y1 (N)	σ (Mpa)	ε (%)
825	20	0	0	0	0	0	0
		1	1	0.2	500	1.592356688	2.222222222
		2	1	0.4	500	1.592356688	4.444444444
		3	2	0.6	1000	3.184713376	6.666666667
		4	2	0.8	1000	3.184713376	8.888888889
		5	2	1	1000	3.184713376	11.111111111
		6	4	1.2	2000	6.369426752	13.333333333
		7	4	1.4	2000	6.369426752	15.555555556
		8	25	1.6	12500	39.8089172	17.777777778
	9	105	1.8	52500	167.1974522	20	
	30	0	0	0	0	0	0
		1	1	0.2	500	1.764384142	2.222222222
		2	1	0.4	500	1.764384142	4.444444444
		3	2	0.6	1000	3.528768283	6.666666667
		4	4	0.8	2000	7.057536567	8.888888889
		5	6	1	3000	10.58630485	11.111111111
		6	25	1.2	12500	44.10960354	13.333333333
		7	65	1.4	32500	114.6849692	15.555555556
		8	101	1.6	50500	178.2027983	17.777777778
	40	0	0	0	0	0	0
		1	1	0.2	500	1.764384142	2.222222222
		2	2	0.4	1000	3.528768283	4.444444444
		3	3	0.6	1500	5.293152425	6.666666667
		4	3	0.8	1500	5.293152425	8.888888889
5		5	1	2500	8.821920709	11.111111111	
6		20	1.2	10000	35.28768283	13.333333333	
7		50	1.4	25000	88.21920709	15.555555556	
8		101	1.6	50500	178.2027983	17.777777778	

X : 5:1
Y : 5 kN/cm

Temperatur Sinter (°C)	Ukuran Kalium Karbonat (μm)	x	y	x1 (mm)	y1 (N)	σ (Mpa)	ε (%)
850	20	0	0	0	0	0	0
		1	1	0.2	500	1.44431	2.22222
		2	2	0.4	1000	2.88863	4.44444
		3	3	0.6	1500	4.33294	6.66667
		4	4	0.8	2000	5.77726	8.88889
		5	6	1	3000	8.66589	11.1111
		6	15	1.2	7500	21.6647	13.3333
		7	36	1.4	18000	51.9953	15.5556
	8	103	1.6	51500	148.764	17.7778	
	0	0	0	0	0	0	0
	1	3	0.2	1500	4.77707	2.22222	
	2	5	0.4	2500	7.96178	4.44444	
	3	8	0.6	4000	12.7389	6.66667	
	4	13	0.8	6500	20.7006	8.88889	
	5	28	1	14000	44.586	11.1111	
	6	55	1.2	27500	87.5796	13.3333	
	7	90	1.4	45000	143.312	15.5556	
	8	104	1.6	52000	165.605	17.7778	
	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0.2	500	1.76438	2.22222	
	2	2	0.4	1000	3.52877	4.44444	
	3	4	0.6	2000	7.05754	6.66667	
	4	7	0.8	3500	12.3507	8.88889	
	5	15	1	7500	26.4658	11.1111	
6	34	1.2	17000	59.9891	13.3333		
7	68	1.4	34000	119.978	15.5556		
8	104	1.6	52000	183.496	17.7778		

X : 5:1
Y : 5 kN/cm

Temperatur Sinter (°C)	Ukuran Kalium Karbonat (μm)	x	y	x1 (mm)	y1 (N)	σ (Mpa)	ε (%)	
900	20	0	0	0	0	0	0	
		1	1	0.2	500	1.44431	2.22222	
		2	2	0.4	1000	2.88863	4.44444	
		3	6	0.6	3000	8.66589	6.66667	
		4	16	0.8	8000	23.109	8.88889	
		5	44	1	22000	63.5498	11.11111	
		6	80	1.2	40000	115.545	13.33333	
	7	101	1.4	50500	145.876	15.55556		
	30	0	0	0	0	0	0	0
		1	1	0.2	500	1.59236	2.22222	
		2	3	0.4	1500	4.77707	4.44444	
		3	3	0.6	1500	4.77707	6.66667	
		4	5	0.8	2500	7.96178	8.88889	
		5	11	1	5500	17.5159	11.11111	
		6	30	1.2	15000	47.7707	13.33333	
		7	60	1.4	30000	95.5414	15.55556	
	8	100	1.6	50000	159.236	17.7778		
	40	0	0	0	0	0	0	0
		1	2	0.2	1000	3.18471	2.22222	
		2	3	0.4	1500	4.77707	4.44444	
		3	4	0.6	2000	6.36943	6.66667	
		4	6	0.8	3000	9.55414	8.88889	
		5	10	1	5000	15.9236	11.11111	
		6	20	1.2	10000	31.8471	13.33333	
		7	40	1.4	20000	63.6943	15.55556	
8		70	1.6	35000	111.465	17.7778		
9	102	1.8	51000	162.42	20			

X : 5:1
Y : 5 kN/cm

Temperatur Sinter (°C)	Ukuran Kalium Karbonat (μm)	x	y	x1 (mm)	y1 (N)	σ (Mpa)	ε (%)	
950	20	0	0	0	0	0	0	
		1	2	0.2	1000	3.18471	2.22222	
		2	4	0.4	2000	6.36943	4.44444	
		3	9	0.6	4500	14.3312	6.66667	
		4	15	0.8	7500	23.8854	8.88889	
		5	32	1	16000	50.9554	11.1111	
		6	62	1.2	31000	98.7261	13.3333	
	7	104	1.4	52000	165.605	15.5556		
	30	0	0	0	0	0	0	0
		1	2	0.2	1000	3.52877	2.22222	
		2	4	0.4	2000	7.05754	4.44444	
		3	5	0.6	2500	8.82192	6.66667	
		4	9	0.8	4500	15.8795	8.88889	
		5	25	1	12500	44.1096	11.1111	
		6	35	1.2	17500	61.7534	13.3333	
	7	101	1.4	50500	178.203	15.5556		
	40	0	0	0	0	0	0	0
		1	3	0.2	1500	5.29315	2.22222	
		2	5	0.4	2500	8.82192	4.44444	
		3	8	0.6	4000	14.1151	6.66667	
		4	20	0.8	10000	35.2877	8.88889	
5		30	1	15000	52.9315	11.1111		
6	101	1.2	50500	178.203	13.3333			