

LAPORAN PENELITIAN STRATEGIS

TEMA
Teknologi Berkelanjutan



**FABRIKASI ALUMINIUM FOAM MENGGUNAKAN
METODE METALURGI SERBUK DENGAN
MEMANFAATKAN PUPUK UREA ((NH₂)₂CO)
SEBAGAI BAHAN *SPACE HOLDER***

Oleh :

Ir. Aris Widyo Nugroho, MT (123022/0507037001)

**Didanai melalui Mata Anggaran 01.01.05.01
Sesuai SK Rektor Universitas Muhammadiyah Yogyakarta**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA
JUNI 2013**

Halaman Pengesahan

- a. Judul Penelitian : FABRIKASI ALUMINIUM BERPORI
MENGUNAKAN METODE METALURGI
SERBUK DENGAN MEMANFAATKAN UREA
($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) SEBAGAI *SPACE HOLDER*
- b. Ketua Peneliti : Ir. Aris Widyo Nugroho, MT
- c. Nama Lengkap dan Gelar : Ir. Aris Widyo Nugroho, MT
- d. Golongan Pangkat dan NIP : IIC/1230022
- e. Jabatan Fungsional : Lektor
- f. Jabatan Struktural : Sekretaris jurusan
- g. Fakultas/Program Studi : Teknik/Teknik Mesin
- h. Perguruan Tinggi : Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
- i. Bidang Keahlian : Ilmu Bahan
- j. Waktu untuk Penelitian ini : 4 bulan
- k. Tema (*khusus KPD*) : Pengembangan Teknologi Material dan
Manufaktur untuk mendukung kebijakan energi
nasional
- l. Tenaga Laboran/Teknisi : Joko Suminto
- m. Biaya : Rp.. 5.000.000,- (lima juta rupiah)

Yogyakarta, 29 Juli 2013

Mengetahui,
Dekan

Ketua Peneliti

Jazaul Ihsan, ST, MT., PhD
NIK. 123037

Ir. Aris Widyo Nugroho, MT
NIK. 123022

Kata Pengantar

Alhamdulillah , puji syukur kita panjatkan kehadiran Allah SWT, karena dengan limpahan rahmat dan hidayahnya sehingga Penelitian ini yang berjudul “FABRIKASI ALUMINIUM BERPORI MENGGUNAKAN METODE METALURGI SERBUK DENGAN MEMANFAATKAN UREA ((NH₂)₂CO) SEBAGAI *SPACE HOLDER* dapat diselesaikan sesuai dengan harapan.

Penelitian ini merupakan penelitian dasar yang diharapkan dapat memberikan wawasan baru dalam pembuatan aluminium berpori yang banyak digunakan dalam konstruksi keteknikan. Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbangan alternatif produksi dari aluminium berpori yang dapat diproduksi di dalam negeri, sehingga ke depan dapat mengurangi import bahan aluminium berpori dan bernilai ekonomis.

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dimana melalui LP3M memberikan dukungan dana penelitian kepada penulis dengan cara meraih kompetisi paket Hibah Penelitian Strategis ini.

Selanjutnya kami sampaikan banyak terima kasih kepada saudara Sohibul Fadli, Arif Prasetyo, Anung Setiawan atas bantuannya dalam pelaksanaan penelitian ini dan pengumpulan datanya. Juga tak lupa terima kasih atas bantuan dari Bapak Joko Suminto atas pengurusan administrasi sejak pembuatan proposal sampai dengan pengumpulan laporan penelitian ini.

Akhirkata, laporan penelitian ini masih jauh dari sempurna, ke depan dengan masukan dari para pembaca maka penelitian ini akan lebih sempurna.

Intisari

Penelitian untuk mengembangkan proses fabrikasi aluminium berpori dengan metalurgi serbuk dengan urea sebagai space holder telah dilakukan. Serbuk aluminium berbentuk flake dicampur dengan enam variasi fraksi massa urea sebagai space holder. Campuran tersebut kemudian di kompakasi dengan tekanan 300 kg/cm² sehingga membentuk green body. Spesimen diperoleh setelah sinterring dua tahap dilakukan atas green body yaitu sintering suhu rendah, dan dilanjutkan dengan sintering pada suhu mendekati titik leleh aluminium. Spesimen diuji struktur mikro dengan mikroskop optik dan ditentukan porositasnya dengan penimbangan dan pengukuran dimensinya. Sedangkan kekuatan tarik dan Modulus Young's diperoleh dari uji tekan menggunakan UTM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aluminium berpori saling berhubungan dapat diproduksi, dengan porositas mencapai 49.662% pada fraksi massa space holder sebesar 0.6. Kurva-kurva berbentuk plateau yang dihasilkan dari pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa nilai kekuatan dan modulus Young's menurun seiring dengan peningkatan porositas material.

Simbol dan Singkatan

BE-SEM	Backscattered Electron- Scanning Electron Microscope
SE-SEM	Secondary Electron- Scanning Electron Microscope

List of Symbols

C	Proportion Constant
E	Young's elastic modulus
f	Pore volume fraction
mm	Millimetre
n	Exponent factor
σ	Stress
ρ	Density
μm	Micrometre

Subscripts

i	Inclusion materials
pl	Plateau
s	Fully solid
ys	Yield

Superscript

*	Porous materials
---	------------------

Daftar Isi

Halaman Pengesahan	ii
Simbol dan Singkatan	iv
Daftar Isi.....	vi
Daftar Tabel.....	viii
Daftar Gambar	ix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Pendahuluan	5
2.2 Logam Berpori	5
2.3 Sifat-sifat Logam Berpori	7
2.3.1 Sifat-sifat Mekanik	7
2.3.2 Sifat Akustik.....	9
2.3.3 Sifat Termal.....	9
2.3.4 Sifat Permeabilitas	9
2.4 Aplikasi dari Logam Berpori	10
2.5 Fabrikasi dari logam Berpori	11
BAB 3 METODE PENELITIAN	13
3.1 Pendahuluan	13
3.2 Alat dan bahan.....	14
3.3 Prosedure Penelitian	14
3.3.1 Persiapan Sampel.....	14
3.3.2 Pengamatan Struktur.....	19
3.3.3 Pengujian Kuat Tekan.....	22
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	24
4.1 Pendahuluan	24
4.2 Analisa Serbuk Aluminium yang Digunakan	24
4.3 Green Body (Serbuk setelah Dikompaksi)	25
4.4 Sintering.....	28

4.5	Porositas dan morfologi dari lubang pori	29
4.6	Sifat mekanik	34
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		38
5.1	Kesimpulan	38
5.2	Saran	38
Daftar Pustaka		40

Daftar Tabel

Tabel 4. 1. Tegangan luluh dengan porositas untuk setiap spesimen	35
Tabel 4. 2. Tabel perbandingan penelitian.	36

Daftar Gambar

Gambar 2.1 : Jenis jenis logam berpori : (a) closed-cell foam; (b) open-cell foam	5
Gambar 2.2 : (a). Foto SEM dari titanium alloy berpori (porositas 50%) yang difabrikasi menggunakan amonium hidrogen carbonat((NH ₄)HCO ₃) sebagai space holder (Wang et al., 2009), (b) Foto makro alumnum dengan lubang pori memanjang saling berhubungan yang difabrikasi menggunakan paduan Pb-Sn sebagai space holder (Nugroho, 2012), (c) Salah satu penggunaan metal foam dalam <i>heat exchanger</i> yang difabrikasi menggunakan metoda <i>liquid state processing</i> (http://www.exxentis.co.uk/metal-foam.html).....	6
Gambar 2.3 Kurva tegangan-regangan dari uniaxial compression test pada specimen aluminium berpori (porositas 90%)(Ashby et al., 2000).....	8
Gambar 2.4 : Metode fabrikasi logam berpori (Banhart, 2001).....	12
Gambar 3.1 : Diagram alir penelitian	13
Gambar 3.2 Timbangan Digital	15
Gambar 3.3 Aluminium Serbuk.....	15
Gambar 3.4 Urea (<i>Carbamide</i>).....	15
Gambar 3.5 tabung mixer	16
Gambar 3.6 Alat Kompaksi.....	17
Gambar 3.7. Cetakan (<i>dies</i>) kompaksi serbuk.....	17
Gambar 3.8. Nabertherm Furnace	19
Gambar 3.9 Mesin Pengamplas	20
Gambar 3.10 Mikroskop Optik.....	20
Gambar 3.11 Mikroskop Stereo untuk Foto makro	20
Gambar 3.12 Universal Testing Mesin (UTM)	22
Gambar 4.1 Bentuk dan ukuran dari serbuk aluminium yang digunakan (a), dengan perbesaran yang lebih tinggi (b)	24
Gambar 4.2 Hasil Uji komposisi serbuk alumunium dengan EDX.....	25

Gambar 4.3 Bentuk dan dimensi dari green body dengan beberapa variasi fraksi massa urea.....	27
Gambar 4.4. Bentuk ruang-ruang kosong yang ditinggalkan oleh space holder urea (dengan mikroskope stereo perbesaran 19 x)	28
Gambar 4.5 Spesimen setelah proses sintering langsung diambil dari furnace dilihat dari samping dengan fraksi massa urea 70%.....	29
Gambar 4.6 Spesimen setelah dipotong dan dibersihkan dilihat dari samping.....	30
Gambar 4.7 Struktur mikro dari alumunium yang disinter pada daerah tanpa <i>space holder</i>	31
Gambar 4.8 Foto makro dari aluminium berpori dengan variasi bentuk lubang pori yang berasal dari space holder berbentuk (a) 10% (b) 20% (c) 30%, (d) 40%, (e) 50% dan (f) 60%	31
Gambar 4.9 Foto makro dari aluminium berpori dengan variasi bentuk lubang pori yang berasal dari space holder berbentuk (a) anyaman 0,8 mm, (b) gabungan 2 mm dan 0,8 mm, (c) spiral 2 mm.....	32
Gambar 4.10 Struktumikro dari aluminum foam dengna fraksi massa 60% urea H ₂ NCONH ₂ diambil menggunakan SEM	33
Gambar 4.11 Grafik perubahan porositas terhadap massa urea	33
Gambar 4.12 Kurva tegangan-regangan dari alumnnium dengan variasi porositas.....	34
Gambar 4.13.Grafik tegangan luluh dan Modulus Young terhadap porositas untuk masing-masing spesimen.	35
Gambar 4.14. Spesimenfraksi (a) 10% (b) 20% (c) 30% (d) 40% (e) 50% (f) 60%	36

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Material berpori (porous materials atau metals foam atau cellular materials) telah dikenal sebagai salah satu jenis material teknik yang memiliki banyak pori-pori di dalam strukturnya sehingga kerapatan mereka jauh lebih rendah dari material padat (solid materials). Dengan struktur berpori ini material tersebut dapat menampilkan fitur seperti kapasitas menyerap energi, sifat termal, bobot dan sifat peredaman suara yang unik. Fitur-fitur ini sangat menarik dalam aplikasi di industri transportasi (Baumeister et al., 1997) industri mobil mobil (Ito and Kobayashi, 2006), pesawat terbang dan kereta api (Rausch dan Stöbener, 2005) dan biomedis (Lee et al., 2009). Aplikasi penting yang lain adalah sebagai penyekat panas ataupun sebagai alat penukar kalor.

Berbagai macam proses fabrikasi logam berpori telah dikembangkan sejak proses pembentukan aluminium berpori pertama kali dikenalkan oleh Sosnick (1948). Secara garis besar proses pabrikan tersebut dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis metode, yaitu liquid state processing dan solid state processing. Dalam liquid state processing ini, logam dipanaskan sampai temperatur lelehnya sehingga mencair kemudian ditambahkan bahan pengembang atau gelembung gas diinjeksikan secara langsung. Selama proses pendinginan, gas terperangkap di dalamnya sehingga terbentuk pori-pori (rongga-rongga) di dalam material tersebut. Aluminium berpori umumnya dibuat dengan proses lelehan ini dengan menambahkan agen pengembang seperti titanium hidrida (TiH_2) atau zirkonium hidrida (ZrH_2) seperti yang telah dilakukan oleh Elliott (1956) atau dengan metoda replica casting. Blok aluminium berpori secara komersial telah diproduksi menggunakan jenis proses lelehan ini oleh beberapa industri seperti ALPORAS, ALCAN, CYMAT, NORSK-HYDRO dan sebagainya (Ashby et al., 2000). Proses lelehan ini sesuai untuk produksi massal logam berpori dengan bentuk sederhana atau berupa lembaran yang umumnya diaplikasikan sebagai penyerap energi, peredam suara atau penyekat panas. Namun demikian harga foaming agent seperti TiH_2 dan ZnH_2 beberapa kali lipat dari harga

logam dasarnya (aluminium) dan diperoleh dengan mengimport dari luar negeri. Saat ini, di Jerman, untuk pembelian dalam jumlah besar (tons), 1 kilogram TiH₂ mencapai harga kurang lebih 400 euro. Ditambah lagi proses pencairan aluminium yang mencapai temperatur 850oC akan menambah biaya produksi.

Proses fabrikasi dengan menggunakan metode solid state processing melalui metalurgi serbuk, temperatur yang dibutuhkan selama proses fabrikasi lebih rendah dibanding dengan proses lelehan dan tidak membutuhkan foaming agent yang mahal. Metode solid state forming ini dikenalkan pada awalnya dalam fabrikasi titanium berpori. Rongga atau pori-pori diperoleh antara lain dari : sintering antar butir serbuk logam yang tidak sempurna (Oh et al., 2003, Güden et al., 2007) atau ruang kosong yang ditinggalkan oleh bahan pengisi/perancah (space holder) yang dapat berupa polymer (Jee et al., 2000) , amonium hidrogen bikarbonat (Wen et al., 2001, Wang et al., 2009), carbamide (Bram et al., 2000, Niu et al., 2009), kawat baja (Jorgensen and Dunand, 2010, Jorgensen and Dunand, 2011, Kwok et al., 2008),, atau foaming agent dipadatkan kemudian mengembang pada proses sintering (Hobfield et al, 2011, Nansaarng dan Sopha, 2008); atau gas mulia yang diinjeksikan pada proses pemadatan kemudian mengembang pada waktu proses sintering sintering (Murray and Dunand, 2006, Nugroho et al., 2010, Nugroho et al., 2011).

Ukuran dan bentuk dari pori-pori hasil dari dari proses sintering yang tidak sempurna ditentukan oleh ukuran dan bentuk dari serbuk logamnya. Kelemahan lain dari proses ini adalah porositas maksimum yang dicapai hanya 50%, dengan kekuatan tekan yang rendah (Oh et al, 2003, Guden et al, 2007). Bram et al., (2000) menggunakan serbuk carbamide (urea) sebagai space holder yang kemudian dihilangkan pada suhu kurang lebih 200oC dengan tingkat kontaminasi yang minimal terhadap serbuk titanium. Kemudian dilakukan sintering pada suhu 1400oC untuk mendapatkan titanium berpori dengan porositas 60-77% dan ukuran pori-pori 0,1 – 2,4 mm yang ditentukan oleh ukuran butiran dari serbuk carbamide. Wen et al (2001) menggunakan amonium hidrogen bikarbonat sebagai space holder, dengan suhu dekomposisi 200oC dan suhu sintering titanium 1200oC selama 2 jam. Titanium berpori yang dihasilkan dapat mencapai 35-80%.

Penelitian yang telah dilakukan oleh Kwok (2008) dan Jorgensen & Dunand (2010) menunjukkan bahwa logam titanium berpori-pori memanjang dan saling terhubung dapat dihasilkan dengan menggunakan anyaman kawat dari baja sebagai bahan space holdernya. Space holder tersebut dapat dibuang dengan cara dilarutkan dalam cairan elektrokimia setelah proses sintering. Metode ini membutuhkan waktu relatif lama (lebih dari 24 jam) pada proses pembuangan dengan larutan elektrokimia. Dengan memodifikasi metode ini, Nugroho (2012) telah berhasil mengembangkan aluminium berpori memanjang dan saling berhubungan dengan menggunakan paduan Pb-Sn sebagai space holdernya. Namun demikian masih terdapat kontaminasi yang berupa sisa paduan Pb-Sn yang tertinggal di dalam pori-pori pada waktu proses pembuangan (pemanasan suhu 200oC) dan proses sintering (suhu 600oC).

Pembuatan aluminium berpori dengan metode metalurgi metalurgi serbuk dengan foaming agent NaCl atau kombinasi TiH₂ dan CaCO₃ (Hobfield et al, 2011, Nansaarn dan Sopha, 2008) juga menunjukkan hasil yang memuaskan. Walaupun demikian, proses ini memerlukan tambahan satu proses, yaitu ekstrusi untuk menjebak foaming agent bertekanan tinggi. Proses ekstrusi dilakukan sebelum sintering dimana sintering tersebut merupakan proses pembentukan pori-pori akibat dari mengembangnya foaming agent bertekanan tinggi yang bersamaan dengan penurunan kekuatan creep dari aluminium.

Berdasar dari kajian pustaka tersebut maka untuk dapat menghasilkan aluminium foam dengan porositas tinggi, tingkat kontaminasi rendah, proses yang pendek dan murah dipilih metode solid state procesing melalui metalurgi serbuk dengan space holder urea. Dalam hal ini space holder akan di removed dengan cara dipanaskan pada suhu 200oC sebelum dilakukan sintering pada suhu di atas 600oC. Serbuk urea ini disamping banyak tersedia, juga mempunyai temperature uap yang rendah (135-150°C) sehingga dipilih sebagai bahan space holder.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian di latarbelakang, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimanakah fabrikasi aluminium berpori dengan metode metalurgi serbuk dengan space holder urea?
2. Bagaimanakah pengaruh parameter fraksi massa dari bahan space holder terhadap porositas bahan yang dihasilkan?
3. Bagaimanakah karakteristik tegangan tekan-regangan dari aluminium berpori yang dihasilkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut :

1. Menghasilkan aluminium berpori dengan metode metalurgi serbuk.
2. Mendapatkan pengaruh variabel fraksi massa space holder terhadap porositas aluminium berpori yang dihasilkan.
3. Mendapatkan karakteristik kuatan tekan dari aluminium berpori.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan teknologi manufaktur khususnya fabrikasi bahan aluminium berpori yang sangat dibutuhkan untuk banyak aplikasi dimana pada gilirannya dapat mereduksi biaya dan energi yang digunakan. Pada saat ini logam berpori tersedia secara komersial dengan proses import dari Canada, Eropa maupun Amerika. Dengan menguasai teknologi ini diharapkan ketergantungan terhadap import dapat dikurangi.

BAB 2

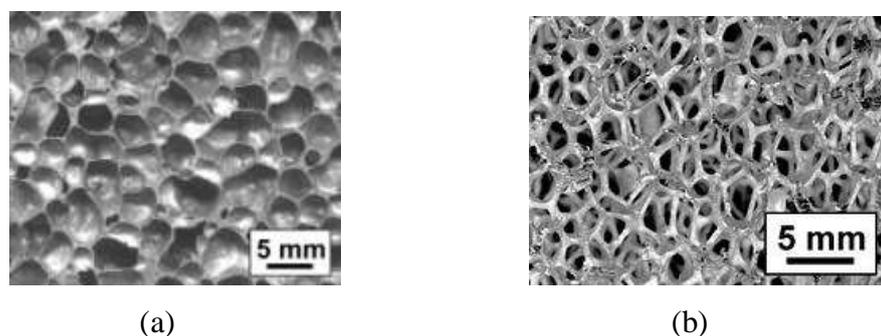
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pendahuluan

Pada bab ini akan dijelaskan teori yang berhubungan dengan topik riset dan aplikasinya. Hal ini mencakup tentang pengertian, sifat mekanis, sifat akustik, sifat permeabilitas, sifat termal dan proses pabrikan yang sudah dilakukan. Proses dengan metalurgi serbuk akan dibahas lebih spesifik dibanding proses lainnya.

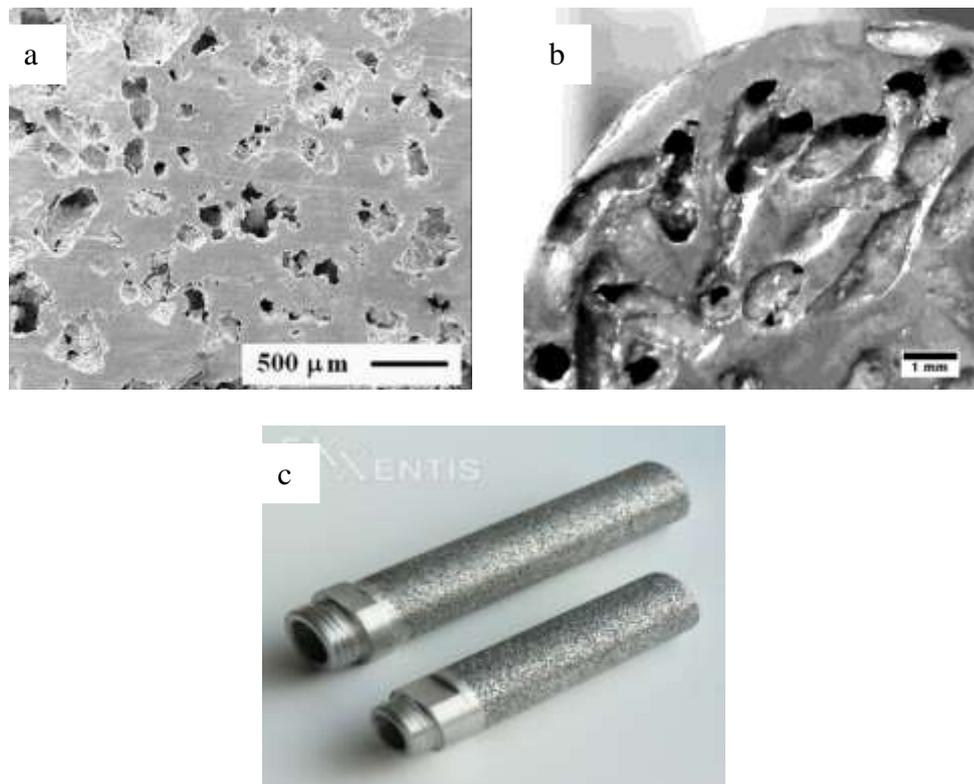
2.2 Logam Berpori

Porositas didefinisikan sebagai persentase ruang kosong dalam padatan (Ashby et al., 2000). Bahan berpori juga sering disebut sebagai padatan seluler (cellular solid), yang berarti gabungan sel/ kompartemen/rongga dengan tepi padat atau sisi permukaan tertutup atau terbuka. Bahan-bahan ini sangat umum di alam, contoh : kayu, gabus, spons dan karang. Bahan berpori dan logam berpori (porous metal atau metal foam) dengan struktur seluler terkenal kombinasi yang menarik yang sifat fisik dan mekanik, seperti konduktivitas panas yang tinggi, berat jenis yang rendah dan permeabilitas tinggi. Dilihat dari struktur porinya, logam busa ini memiliki dua jenis yaitu closed-cell foam dan open-cell foam. Open-cell foam adalah cellular material yang tiap cellnya tertutup. Sedangkan open-cell foam adalah cellular material yang tiap cell-nya terhubung (gambar 2.1).



Gambar 0.1 : Jenis jenis logam berpori : (a) closed-cell foam; (b) open-cell foam (<http://www.metalfoam.net/intro.html>)

Manusia telah membuat bahan berpori atau bahan selular tujuan kayu artefak yang setidaknya 5000 tahun yang lalu di Mesir, gabus untuk tutup botol anggur juga telah dibuat sejak zaman Romawi (27 SM). Perkembangan terakhir di dunia ilmiah memberikan kesempatan kepada manusia untuk membuat bahan berpori sintetis yang berguna untuk aplikasi struktural dan fungsional ringan. Perkembangan teknologi bahan berpori sintetis yang pertama dibuat dengan menggunakan bahan polimer dimana sampai saat ini masih dipakai, sebagai contoh *styrefoam*, banyak digunakan sebagai cangkir kopi sekali pakai. Selanjutnya, dengan kemajuan teknologi dihasilkan cara untuk memproduksi material berpori dari bahan logam atau keramik dengan sifat dan aplikasi yang lebih menarik. Beberapa contoh logam berpori dapat dilihat gambar in **Error! Reference source not found..**



Gambar 0.2 : (a). Foto SEM dari titanium alloy berpori (porositas 50%) yang difabrikasi menggunakan amonium hidrogen carbonat($(\text{NH}_4)\text{HCO}_3$) sebagai space holder (Wang et al., 2009),, (b) Foto makro alumnium dengan lubang pori memanjang saling berhubungan yang difabrikasi menggunakan paduan Pb-Sn sebagai space holder (Nugroho, 2012), (c) Salah satu penggunaan metal foam dalam *heat exchanger* yang difabrikasi menggunakan metoda *liquid state processing* (<http://www.exxentis.co.uk/metal-foam.html>)

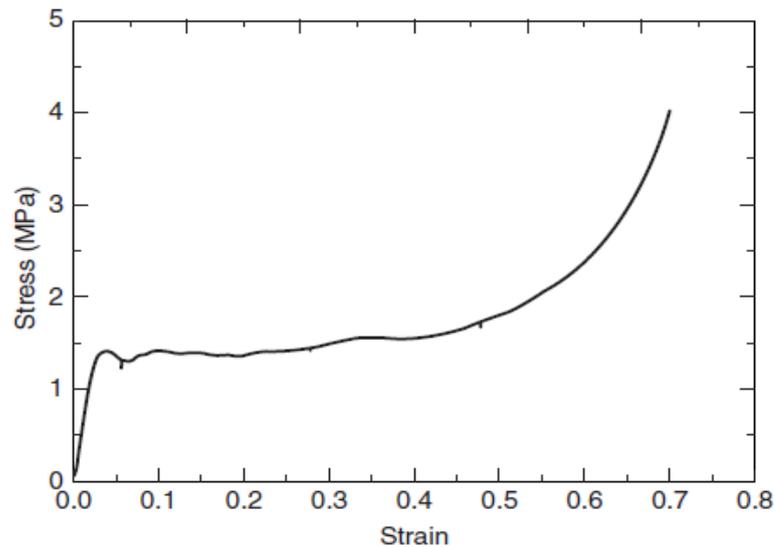
Logam-logam berpori dan *metal foam* memiliki sifat yang menarik seperti kekuatan mekanik yang relatif sedang, penyerapan energi tinggi dan kekakuan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan yang diperoleh dari bahan polimer. Logam berpori lebih stabil dalam lingkungan yang keras dari pada polimer berpori. Pliny the Elder (77AD) memperkenalkan proses yang disebut granulasi, yang digunakan oleh Etruscan Gold-Smith untuk menghasilkan perhiasan, sebagai referensi yang pertama dalam membuat logam berpori.

Evolusi logam berpori di bidang teknik dimulai pada awal abad ke-20. Pada tahun 1920, busa logam pertama dikembangkan dengan bantuan bubuk disinter. Sintering serbuk untuk membuat logam berpori telah menjadi metode fabrikasi yang berhasil untuk membuat filter, baterai dan bantalan pelumasan sendiri. Bahan-bahan ini masih dalam sangat dibutuhkan untuk berbagai aplikasi bahkan hari ini. Metode untuk membuat logam berpori dengan porositas tinggi telah diterbitkan dalam paten Prancis. Produksi massal logam berpori dimulai pada akhir 1950-an di Amerika Serikat, di mana penelitian dan pengembangan logam berpori dilakukan selama lebih dari 10 tahun. Sedangkan komersialisasi dari logam berpori dalam berbagai macam struktur dan aplikasinya telah dapat dilakukan dengan bantuan perkembangan teknologi di bidang logam berpori

2.3 Sifat-sifat Logam Berpori

2.3.1 Sifat-sifat Mekanik

Sebagian besar studi pada logam berpori bertujuan untuk mengenal sifat mekanik mereka, dimana terms ini senantiasa berhubungan dengan fungsinya sebagai peyangga beban. Bahan berpori pada umumnya dalam bidang struktur mekanik memiliki fungsi yang lebih sedikit dibandingkan dengan sifat fungsionalnya seperti sifat akustik dan luas permukaan. Namun, logam-logam berpori tetap membutuhkan sifat mekanik minimal untuk menghindari kegagalan atau kerusakan [24]. Perilaku mekanik terutama perilaku kuat tekan dari bahan berpori adalah khas seperti ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 0.3 Kurva tegangan-regangan dari uniaxial compression test pada specimen aluminium berpori (porositas 90%)(Ashby et al., 2000)

Daerah kurva tegangan-regangan ini dibagi menjadi tiga bagian, yaitu (1) daerah elastis, dimana beban diterima oleh dinding-dinding pori, (2) daerah plateau, dimana dinding-dinding pori kolaps tidak mampu menahan beban, deformasi mulai plastis terjadi, (3) daerah densifikasi, dimana dinding-dinding pori sudah menyatu dengan bagian bawah dan deformasi plastis semakin tinggi. Kekuatan tekan dari material berpori ditunjukkan pada titik dimana tegangan plateau mulai terjadi.

Kekuatan tekan dari material berpori dapat diprediksi dengan menggunakan persamaan (1)(Ashby et al., 2000) :

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_s} = C \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^n \quad (1)$$

Dimana σ^* dan σ_s masing-masing adalah kekuatan tekan dari material berpori dan material yang solid, dan ρ^*/ρ_s adalah densiti relatif dari material berpori terhadap kondisi solidnya, yang berharga 1 – fraksi volume dari pori-pori. C adalah konstanta bentuk yang berharga 0,1-1. Sedangkan n adalah scalling exponent yang memiliki nilai diantara 1,8-2,2 (Erk et al., 2008): Disamping kekuatan tekan, Young's modulus (kekakuan) dari material berpori juga merupakan salah satu sifat mekanis yang perlu diperhitungkan. Perhitungan dari modulus elastisitas diperoleh dari persamaan (1) sehingga menjadi persamaan (2) sebagai berikut (Erk et al., 2008):

$$\frac{E^*}{E_s} = C \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^n \quad (2)$$

Dimana E^* and E_s masing-masing adalah Young's modulus dari material berpori dan material yang solid.

2.3.2 Sifat Akustik

Logam berpori umumnya dianggap sebagai peredam suara yang bagus yang terutama digunakan dalam aplikasi akustik. Logam busa ini memiliki struktur yang unik yang cocok untuk peredam suara. Namun, sifat akustik dari logam berpori lebih kecil dari polimer berpori, sehingga logam berpori mempunyai potensi lebih di bidang rekayasa bersamaan dengan sifat mereka yang terkait mekanik dan termal. Tang et al.(2008) mengembangkan struktur berserat berpori dengan penyerapan akustik yang baik diperoleh bila daerah yang lebih tinggi porositas fokus terhadap gelombang suara. Pilon et al.(2004) mengembangkan penyerapan akustik pada aluminium berpori dengan unit sel berbentuk tetrakaidekahedron.

2.3.3 Sifat Termal

Sifat thermal dari logam berpori menjadi lebih menarik apalagi dikombinasikan dengan sifat konduktifitas, permeabilitas dan besarnya luas area untuk digunakan dalam berbagai aplikasi seperti alat penukar kalor, heat sink, heat pipes. Perpindahan panas dan konduksi dari logam berpori merupakan fenomena yang kompleks. Efisiensi dari perpindahan panas dipengaruhi oleh konduktifitas dari logam berpori, perpindahan panas antara logam berpori dan fluida yang digunakan, dan oleh penurunan tekanan di dalam saluran logam berpori tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar dari karakteristik tersebut dipengaruhi oleh parameter strukturnya (ukuran pori-pori dan distribusinya, porositas, konektifitas dari pori-pori dan kekasaran permukaan pori-pori), yang mana hal ini sulit untuk menentukannya secara menyeluruh. Oleh karena itu perkembangan dari riset di bidang ini masih sangat luas dan dapat menghasilkan alat bantu baru bagi perancang material.

2.3.4 Sifat Permeabilitas

Permeabilitas adalah salah satu sifat utama dari material berpori, dimana sifat itu memungkinkan air atau asam untuk mengalir ke dalam pori-pori yang dipakai pada sebagian besar aplikasi seperti untuk absorpsi thermal, filtrasi dan implant logam

yang berpori. Tahanan aliran adalah salah satu faktor yang penting dalam permeabilitas, dimana tahanan yang rendah mengakibatkan energi aliran yang lebih rendah juga, sedangkan tahanan aliran yang tinggi memungkinkan waktu transisi yang diinginkan di dalam moda aliran massa reaktan dalam fuel cells. Logam berpori lebih sesuai digunakan untuk aplikasi ini dibandingkan dengan polymer berpori disebabkan oleh lebih kecilnya logam berpori terjadi deformasi karena aliran fluida dalam pori-pori.

2.4 Aplikasi dari Logam Berpori

Aplikasi dari logam berpori secara garis besar dibedakan menjadi dua, yaitu (1) aplikasi struktur, dan (2). aplikasi fungsional. Aplikasi struktur meliputi di bidang struktur ringan (ligh weight) untuk aerospace dan otomotive seperti struktur honeycomb yang dibuat dari aluminium berpori atau logam berpori lain yang dapat menurunkan biaya dan menaikkan performance. Boeing (USA) menggunakan komponen dari titanium sandwich berpori sedangkan inti aluminium berpori digunakan untuk komponen tailboom helikopter (Schwartz D.S et al., 1998)

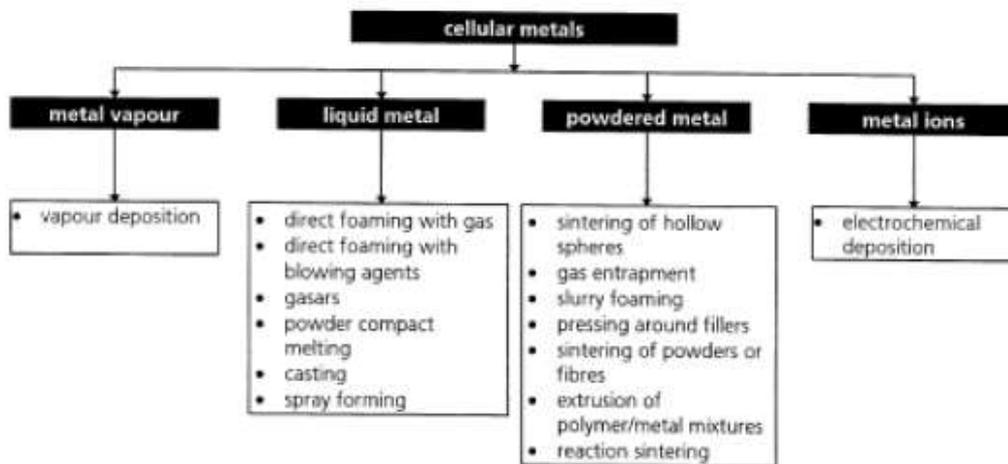
Aplikasi fungsional dari logam berpori meliputi : alat penukar kalor dan alat pendinginan, filtrasi dan separasi, dan silencer. Sebagai penukar kalor, logam berpori yang mempunyai nilai konduktifitas thermal yang besar seperti tembaga dan aluminium berpori sangat dibutuhkan. Sedangkan untuk aplikasi logam berpori untuk alat pendinginan seperti heat sink pada komputer dan power electronics juga banyak digunakan (Long and Rack, 1998, Lu et al., 1998). Untuk aplikasi fungsional filtrasi, logam berpori mempunyai media kedalaman filtrasi yang sesuai dengan ukuran pori-pori dan panjang dari alur pori-pori sehingga logam berpori ini mampu menyerap-menahan kotoran dan juga mempunyai kapasitas penyerapan temperatur dan tekanan tinggi. Dikarenakan sifat permeabilitasnya yang rendah, secara alamiah, logam berpori ini sangat sesuai untuk memfilter gas, asam dan cairan lainnya. Selain itu kekuatan mekanis dan ketahanan korosi yang tinggi dari aluminium atau titanium membuat titanium berpori sering digunakan dalam lingkungan yang reaktif (contoh : exhaust pipes, smoke stakes) namun mempunyai umur penggunaan dan cleanability yang tinggi (<http://www.pickpm.com/designcenter/porous.pdf>). Aplikasi penting lain dari logam berpori adalah untuk

peredaman suara pada beberapa tingkat frekuensi, perubahan pulsa tekanan yang sering terjadi pada pompa atau kompresor, bahkan getaran mekanis pada mesin-mesin (<http://www.seac.nl>)

2.5 Fabrikasi dari logam Berpori

Metode untuk fabrikasi logam berpori telah banyak dikembangkan. Beberapa metode melalui proses fase cair (*liquid state processing*), sedangkan yang lainnya melalui proses metalurgi serbuk (*solid state processing*) dengan sintering proses. Metode metalurgi serbuk dengan space holder dikembangkan pada tahun 2000-an, dimana metode ini pertama kali dikenalkan oleh Bram, et al (2000) dalam pembuatan titanium berpori. Penelitian mereka menggunakan serbuk carbamide sebagai space holder yang kemudian dihilangkan pada suhu kurang lebih 200°C dengan tingkat kontaminasi yang minimal terhadap serbuk titanium. Kemudian dilakukan sintering pada suhu 1400°C untuk mendapatkan titanium berpori dengan porositas 60-77% dan ukuran pori-pori 0,1 – 2,4 mm yang ditentukan oleh ukuran butiran dari serbuk carbamide. Wen et al (2001) menggunakan amonium hidrogen bikarbonat sebagai space holder, dengan suhu dekomposisi 200°C dan suhu sintering titanium 1200°C selama 2 jam. Titanium berpori yang dihasilkan dapat mencapai 80%.

Penggunaan metode metalurgi serbuk dalam memfabrikasi aluminium berpori dengan blowing agent kombinasi antara TiH_2 dan $CaCO_3$ (Hobfield et al, 2011) dan NaCl (Nansaarng dan Sopha, 2008) juga dikembangkan dengan menghasilkan porositas mencapai 60%. Namun demikian keduanya membutuhkan tahapan proses ekstrusi untuk menjebak blowing agent tersebut dalam kondisi bertekanan tinggi dimana akan mengembang menjadi pori-pori bersamaan dengan menurunnya kekuatan creep dari aluminium pada saat proses sintering pada suhu 700an °C. Beberapa metode fabrikasi logam berpori dapat dilihat di **Error! Reference source not found.**



Gambar 0.4 : Metode fabrikasi logam berpori (Banhart, 2001)

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Pendahuluan

Bab ini menjelaskan tentang metode penelitian yang dilakukan. Prosedur penelitian untuk mendapatkan tujuan penelitian digambarkan oleh Gambar 0.1 dan dijelaskan secara lebih detail pada tiap-tiap sub judul berikutnya. Pada prosedur ini, aluminium sebagai starting powder dicampur dengan urea sebagai space holdernya kemudian di kompaksi, disinter dan dilanjutkan dengan karakterisasi yang meliputi struktur makro, struktur mikro, porositas dan kekuatan mekanisnya.



Gambar 0.1 : Diagram alir penelitian

3.2 Alat dan bahan

Peralatan:

Dalam proses pembuatan logam busa, peralatan merupakan salah satu faktor penting untuk menghasilkan bakalan yang sempurna. Peralatan penting yang digunakan pada tahap persiapan serbuk adalah timbangan digital dengan ketelitian 0,01 gram. Setiap serbuk ditimbang berdasarkan fraksi berat masing-masing diatas cawan petri. Pengambilan serbuk dilakukan dengan menggunakan sendok kecil sedikit demi sedikit agar didapat ukuran yang sesuai. Setelah itu serbuk-serbuk dimasukkan kedalam kantong plasting kecil berdasarkan fraksi variabel masing-masing. Setelah semua variabel ditimbang, proses selanjutnya adalah pengadukan dimana serbuk dimasukkan kedalam wadah silinder yang diputar dengan manual. Hasil dari pencampuran dikompaksi dengan mesin Kompaksi Briket dengan penekanan satu arah. Cetakan (*dies*) yang digunakan berdiameter 12 mm dan tinggi maksimal 11 cm. Hasil dari kompaksi ditimbang lagi sehingga didapatkan berat *green compact*. Selanjutnya dipanaskan dengan *Nabertherm Furnace* hasil dan proses sinter. Produk hasil disolusi selanjutnya dilakukan beberapa pengujian seperti pengujian kuat tekan dengan mesin Schenck Trebel, serta pengamatan makro dan mikrostruktur dengan menggunakan mikroskop optik dan SEM (*Scanning Electron Microscope*)

Bahan :

1. Aluminium serbuk murni teknis
2. Urea H_2NCONH_2

3.3 Prosedure Penelitian

3.3.1 Persiapan Sampel

Langkah-langkah yang dilakukan dalam persiapan sampel adalah sebagai berikut:
Perhitungan serbuk. Dalam perhitungan yang dilakukan, sampel yang digunakan berjumlah 5 buah dengan 1 variabel terdiri dari 1 sampel. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan timbangan digital dengan ketelitian 0,01 gram.



Gambar 0.2 Timbangan Digital



Gambar 0.3 Aluminium Serbuk



Gambar 0.4 Urea (*Carbamide*)

Berikut ini adalah perhitungan masing-masing serbuk dalam setiap variabel:

- a. 10% H_2NCONH_2 (massa sampel: 5 gram)
Massa Al : $90\% \times 5 \text{ gram} = 4,5 \text{ gram}$
Massa H_2NCONH_2 : $10\% \times 5 \text{ gram} = 0,5 \text{ gram}$
- b. 20% H_2NCONH_2 (massa sampel : 5 gram)

Massa Al : $80 \% \times 5 \text{ gram} = 4 \text{ gram}$

Massa H_2NCONH_2 : $20 \% \times 5 \text{ gram} = 1 \text{ gram}$

c. 30 % H_2NCONH_2 (massa sampel: 5 gram)

Massa Al : $70 \% \times 5 \text{ gram} = 3,5 \text{ gram}$

Massa H_2NCONH_2 : $30 \% \times 5 \text{ gram} = 1,5 \text{ gram}$

d. 40% H_2NCONH_2 (massa sampel: 5 gram)

Massa Al : $60 \% \times 5 \text{ gram} = 3 \text{ gram}$

Massa H_2NCONH_2 : $30 \% \times 5 \text{ gram} = 2 \text{ gram}$

e. 50 % H_2NCONH_2 (massa sampel: 5 gram)

Massa Al : $50 \% \times 5 \text{ gram} = 2,5 \text{ gram}$

Massa H_2NCONH_2 : $50 \% \times 5 \text{ gram} = 2,5 \text{ gram}$

f. 60 % H_2NCONH_2 (massa sampel: 5 gram)

Massa Al : $40 \% \times 5 \text{ gram} = 2 \text{ gram}$

Massa H_2NCONH_2 : $60 \% \times 5 \text{ gram} = 3 \text{ gram}$

1. Setelah didapat massanya, serbuk-serbuk tersebut dicampur kedalam suatu wadah tabung kecil kemudian *dimixing* .



Gambar 0.5 tabung mixer



Gambar 0.6 Alat Kompaksi

Cetakan (*dies*) yang digunakan untuk membuat sampel yaitu berbentuk silinder dengan diameter sampel yang dihasilkan yaitu 12 mm dan tinggi maksimal 11 cm. Cetakan ini adalah baja tool steel yang sangat keras.



Gambar 0.7. Cetakan (*dies*) kompaksi serbuk

Parameter *range* penekanan yang diberikan pada sampel aluminium serbuk yaitu 300 kg / cm^2 . Pada saat pembuatan sampel percobaan (*trial and error*). Dasar pemilihan besar kompaksi ini dilihat dan bentuk sampel yang memiliki mampu tekan serbu yang baik sehingga distribusi ukuran serbuk menjadi lebih merata. Berikut ini adalah tahapan prosedur untuk kompaksi adalah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan cetakan silinder dan mengecek mesin kompres Krisbow dalam kondisi baik atau tidak (keran tekanan, tuas tekanan, penekan, dan sebagainya).
2. Membersihkan dinding cetakan dengan amplas untuk mengurangi gesekan dengan dinding cetakan.
3. Memasukan serbuk hasil *mixing* secara perlahan agar tidak ada yang tumpah.
4. Pasang bagian atas *dies* setelah serbuk dimasukkan kemudian meletakkannya tepat dibawah *punch* kompaksi Krisbow.
5. Setelah berada di posisi yang tepat, selanjutnya diberikan pembebanan secara perlahan sebesar 300 kg / cm^2 .
6. Memberi waktu tahan kompaksi pada tekanan yang ditentukan selama 3 menit.
7. Buka keran tekanan pada mesin untuk melepaskan tekanan pada cetakan, atur posisi cetakan agar bisa mengeluarkan hasil kompaksi serbuk tersebut (bakalan).
8. Mengeluarkan produk sampel hasil kompaksi (*green compact*) dari dalam cetakan.
9. Bersihkan cetakan dan sisa serbuk dengan amplas bila akan digunakan lagi pada seluruh bagian bila telah selesai.

Proses Sinter

Proses pemanasan ini dilakukan didalam *Tube Nabertherm Furnace*. parameter temperatur yang dipakai sebesar 550°C dengan waktu tahan 60 menit. Agar kondisi pada saat *sintering* . Tahapan dari proses sinter yang dilakukan ialah sebagai berikut:

1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan untuk proses sinter dan periksa kondisi *furnace* terutama temperturnya.
2. Menyiapkan wadah refraktori beserta sampelnya.
3. *Setting* dapur dengan parameter sebagai berikut:

time 1 = 60 menit

T = 200°C

time 2 = 60 menit

Setelah proses ini selesai dilanjutkan dengan proses pemanasan dengan parameter sebagai berikut :

time 1 = 100 menit

T = 550°C

time 2 = 60 menit

4. Setelah semua parameter dimasukkan, lalu tombol START ditekan dan prosesnya akan berjalan secara otomatis mengikuti alur parameter.
5. Mengeluarkan sampel dari dalam dapur setelah temperatur di dalam dapur mencapai temperatur kamar.
6. Sampel yang telah mengalami proses sinter (*burn compact*) siap untuk dilakukan pengujian.



Gambar 0.8. Nabertherm Furnace

3.3.2 Pengamatan Struktur

Pengamatan Struktur Mirkro

Pengamatan mikrostruktur bertujuan untuk mengetahui bentuk pori yang terbentuk serta ukuran dan pori, tebal dinding pori, serta distribusi pori yang terbentuk. Sampel yang dipilih untuk mikrostruktur ini adalah salah satu dan sampel yang ada dan tiap variabel persen volume urea yang diambil secara acak. Adapun tahapan-tahapan pengamatan mikrostruktur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan sampel hasil proses disolusi.
2. Memotong secara melintang pada bagian sampel yang berpori.
3. Mengamplas permukaan sampel dengan menggunakan amplas yang halus (grid #1500).
4. Sebelum mengamati permukaan sampel dengan mikrostrukturu, sampel dioleskan dengan autosol dan dibersihkan.



Gambar 0.9 Mesin Pengamplas



Gambar 0.10 Mikroskop Optik



Gambar 0.11 Mikroskop Stereo untuk Foto makro

Pengamatan Struktur Makro

Pengamatan struktur makro yang dilakukan bertujuan untuk melihat ukuran dan jumlah pori yang terbentuk pada sampel hasil disolusi. Standar pengamatan struktur makro ini dilakukan berdasarkan standar ASTM E 3-95. Adapun tahapan-tahapan pengamatan struktur makro yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan sampel hasil proses disolusi.
2. Pemotongan secara melintang atau *cross section* pada bagian sampel yang berpori.
3. Mengamplas permukaan sampel dengan menggunakan amplas dari nomor 800, 1000, dan 1500.
4. Membersihkan permukaan sampel dengan kain lap lalu mengeringkannya
5. Mengamati sisi sampel yang berpori dan memfotonya dengan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 9X.

Pengamatan dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Pengamatan SEM bertujuan untuk mengetahui bentuk pori yang terbentuk serta ukuran dan pori, tebal dinding pori, serta distribusi pori yang terbentuk. Sampel yang dipilih untuk SEM ini adalah salah satu dan sampel yang ada dan tiap variabel persen volume garam yang diambil secara acak. Adapun tahapantahapan pengamatan SEM yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan sampel hasil proses disolusi.
 2. Memotong secara melintang pada bagian sampel yang berpori.
 3. Mengamplas permukaan sampel dengan menggunakan amplas yang halus (grid #1500).
 4. Memoles permukaan sampel yang telah halus secara poles kering dengan menggunakan serbuk TiO₂ hingga permukaan sampel mengkilat seperti kaca dan bebas goresan.
 5. Membersihkan permukaan sampel dengan kain lap lalu mengeringkannya
- Sebelum mengamati permukaan sampel dengan SEM, untuk sampel nonkonduktif seperti Al, tidak perlu dilakukan *coating*

3.3.3 Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan untuk mengetahui kekuatan tekan dari sampel logam busa (persen urea 10%, 20% ,30% 40%,50%, 60%) hasil disolusi dan juga pada sampel dengan 0% urea. Penekanan sampel dilakukan sampai 10-20% deformasi dan dihentikan apabila hancur atau pembebanan yang diberikan sudah mencapai maksimum yaitu 200.kN. Pada saat pembebanan, dilakukan pencatatan beban yang diterima setiap deformasi 10-20% dari tinggi sampel.



Gambar 0.12 Universal Testing Mesin (UTM)

Pengujian kuat tekan ini dilakukan dengan menggunakan mesin Universal Testing Mesin (UTM) dengan standar pengujian berdasarkan Adapun tahapan - tahapan pengujian kuat tekan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan sampel yang akan dilakukan pengujian.
2. Menyalakan mesin uji tekan.
3. Mengukur diameter dan tinggi awal sampel dengan jangka sorong digital.
4. Memasang sampel pada mesin uji tekan.
5. Mengatur pembebanan dengan kecepatan konstan.
6. Mencatat beban yang diterima tiap 10-20% deformasi (peregangan).

7. Hentikan pengujian saat sampel telah hancur atau saat beban maksimum alat uji tercapai.
8. Diperoleh nilai beban pada petunjuk jarum skala mesin uji tekan.
9. Menghitung kekuatan tekan dengan menggunakan rumus :

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Dimana :

σ = Tegangan tekan (MPa)

P = Beban saat sampel terdeformasi 10 % dari tinggi awal (N)

A = Luas permukaan sampel (mm²)

BAB 4

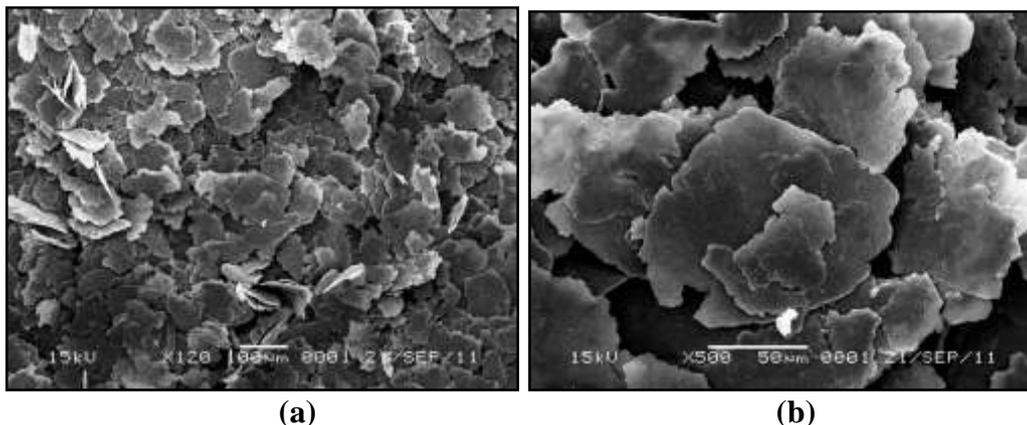
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pendahuluan

Aluminium berpori telah berhasil difabrikasi. Pada bab ini akan dijelaskan karakteristik dan sifat kuat tekannya telah diuji dengan mikroskop optik, mikroskop stereo dan SEM dan alat uji tekan.

4.2 Analisa Serbuk Aluminium yang Digunakan

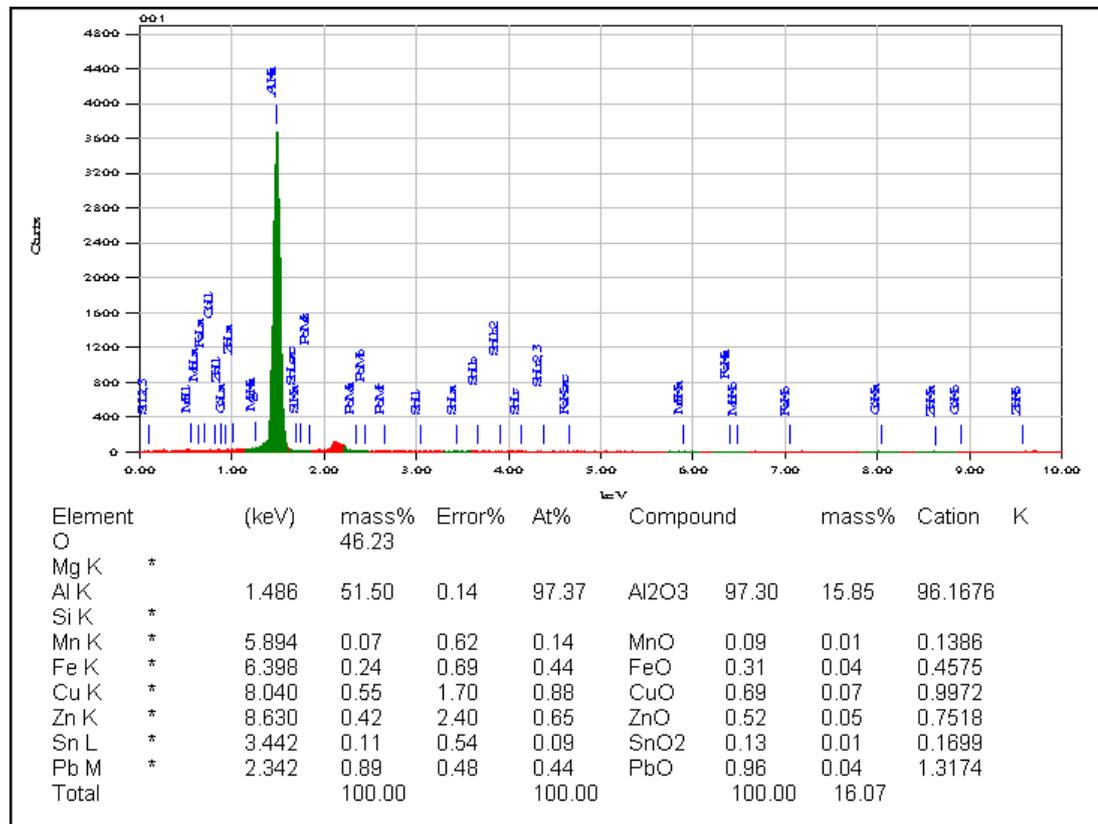
Serbuk aluminium yang diperoleh dari Merck, German, dipakai sebagai bahan utama. Untuk mendapatkan gambaran tentang bentuk dan ukuran serbuk aluminium, dilakukan pemotretan dengan SEM (Gambar 4.1). Dari Error! Reference source not found., diketahui bahwa bentuk serbuk aluminium yang digunakan dalam penelitian ini adalah bentuk flake. Sedangkan hasil pengolahan pencitraan SEM menggunakan software Adobe Photoshop 7 menunjukkan bahwa ukuran rata-rata serbuk aluminium adalah $<100 \mu\text{m}$.



(a) **(b)**
Gambar 0.1 Bentuk dan ukuran dari serbuk aluminium yang digunakan
(a), dengan perbesaran yang lebih tinggi (b)

Selanjutnya dilakukan pengujian dengan *Energy Dispersive X-Ray Analysis* (EDX) untuk mengetahui gambaran komposisi serbuk aluminium dengan lebih mendetail, Gambar 4.2 menunjukkan hasil pengujian EDX yang menunjukan energi

spektrum unsur-unsur yang terkandung dalam serbuk aluminium. Apabila ditinjau dari % mol atomnya akan terlihat didominasi oleh Al (97,37%), Cu (0,88%) dan Zn (0,65%). Sedangkan unsur-unsur lain seperti Pb, Fe, Sn, dan Mn terdapat dalam jumlah kecil (<0,5% mol).



Gambar 0.2 Hasil Uji komposisi serbuk aluminium dengan EDX

4.3 Green Body (Serbuk setelah Dikompaksi)

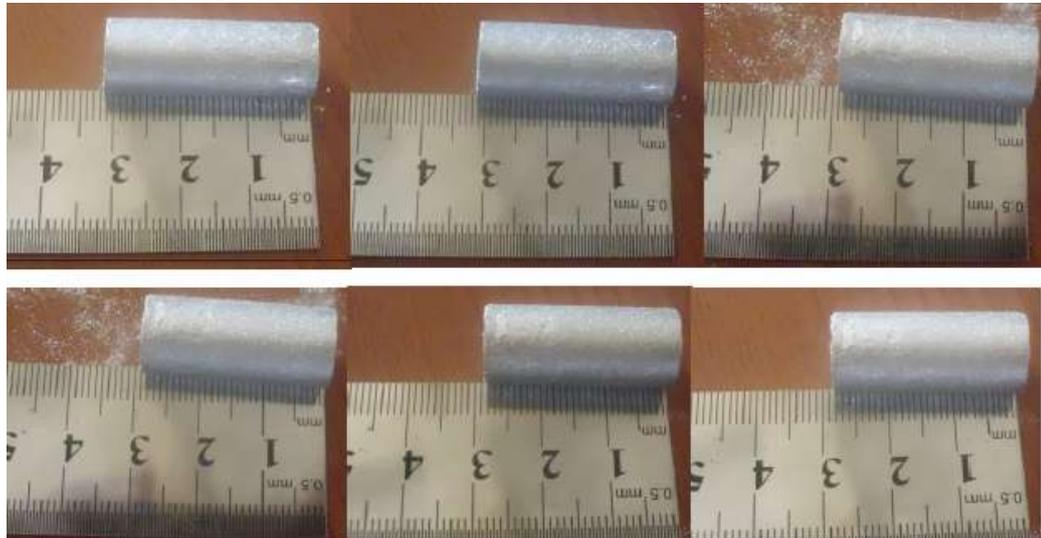
Sebelum serbuk dikompaksi, dilakukan penimbangan masing-masing fraksi dari serbuk aluminium dan urea. Fraksi massa urea terhadap aluminium adalah 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% dan 60%. Pada proses pencampuran serbuk, ukuran partikel aluminium lebih kecil dibandingkan dengan ureanya. Hal ini akan memudahkan terjadinya segregasi antar partikel. Partikel dengan dengan densitas yang besar akan berada dibagian luar sisi bakalan sedangkan partikel dengan densitas kecil berada di bagian dalam atau pusat spesimen. Akibat lain dan perbedaan ukuran partikel adalah kontak antar partikel aluminium dan urea menjadi tidak sempurna sehingga aliran material tidak berjalan baik. Pada saat proses disolusi atau proses

pelepasan, urea akan menguap dahulu akibat temperatur leburnya lebih rendah dibandingkan temperatur logam busa.

Tekanan kompaksi merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap kekuatan ikatan diantara partikel aluminium pada *green body*. Semakin besar tekanan yang diberikan maka densitas spesimen akan semakin meningkat dan persentase porositas semakin menurun. Selain itu, keberadaan dari lapisan oksida/film dari partikel aluminium yang dapat mengurangi kekuatan ikatan antar partikel aluminium akan dapat dipecah dengan memberikan tekanan kompaksi yang cukup. Hasil dari tekanan kompaksi yaitu terjadi peristiwa saling mengunci (*mechanical interlocking*) antar butir sehingga pergeseran antara serbuk sangat sulit dan spesimen menjadi lebih kuat. Peristiwa ini terjadi pada temperatur kamar dimana butir-butir tersebut saling berikatan. Tekanan kompaksi diberikan secara bertahap hingga mencapai tekanan yang diinginkan. Proses ini akan memberikan kesempatan kepada partikel-partikel untuk mengisi rongga kosong atau pori yang masih tersisa sehingga dihasilkan bakalan yang memiliki komposisi yang padat dan homogen. Lebih lanjut, hal ini akan memberikan kemungkinan kontak antar partikel logam secara langsung yang sangat bermanfaat untuk langkah selanjutnya yaitu sintering (Zhao, 2000). Pada penelitian ini diperoleh tekanan kompaksi sebesar 300 kg/cm² menghasilkan kekuatan *green body* yang cukup untuk proses dan perlakuan berikutnya dan bentuk dari *space holder*nya tetap terjaga. Untuk tekanan yang lebih rendah akan menyebabkan rendahnya kekuatan *green body*, sedangkan untuk tekanan yang terlalu tinggi akan mengakibatkan rusaknya *space holder*. Tekanan kompaksi tersebut masih dimungkinkan untuk diturunkan bila *binder* seperti parafin atau PMMA ditambahkan pada campuran serbuk aluminium, namun hal itu akan menimbulkan naiknya biaya dari proses tersebut, menghasilkan gas yang dapat mengkontaminasi serbuk dan menambah waktu pada waktu proses pencampuran.

Bentuk spherical dari *space holder* urea terlihat dapat memberikan pergerakan yang mudah dan pengaturan dari partikel-partikel aluminium selama proses kompaksi. Hal ini akan memberikan distribusi dari pori-pori makro yang homogen pada seluruh *green body* dan memberikan kesaling hubungan yang baik dari *space holder*. Bentuk dari pori-pori tersebut juga menunjukkan replikasi dari bentuk spherical dari urea. Hal ini menggambarkan bahwa ukuran dan bentuk dari pori-pori makro yang dihasilkan tersebut dapat dikontrol dengan mudah. Dengan mengatur porositas total dan distribusi dari ukuran pori-pori pada material berpori

ini adalah merupakan kunci utama untuk memproduksi material yang memiliki sifat-sifat yang diinginkan sesuai dengan aplikasinya. Hasil dari proses kompaksi untuk semua variabel memiliki dimensi tinggi bervariasi. Bentuk dan dimensi spesimen hasil kompaksi yang telah disinter ditunjukkan oleh gambar 4.3



Gambar 0.3 Bentuk dan dimensi dari green body dengan beberapa variasi fraksi massa urea

Pengaruh dari kandungan *space holder* urea pada serbuk aluminium terhadap sifat-sifat fisik dari green body juga diteliti dan hasilnya menunjukkan bahwa densitas dari green body menurun sebesar 30% (dari 90%-60%) dengan naiknya fraksi massa dari *space holder* urea menjadi 33% .

Seperti telah dijelaskan di dalam metodologi penelitian bahwa pada setiap fraksi volume dari *space holder* diberikan serbuk aluminium dengan berat yang sama, namun dihasilkan *green body* yang berdimensi tinggi yang berbeda untuk tiap fraksi volume. Ini mengindikasikan kemampuan untuk menghasilkan porositas yang berbeda pula. Semakin tinggi green bodynya maka nantinya akan menghasilkan porositas yang lebih tinggi, atau dengan kata lain foamibilitasnya meningkat secara linier terhadap fraksi volume. Densitas dari green body tanpa campuran *space holder* dengan kompaksi sebesar 300 kg/cm² mencapai 90% dengan dimensi tinggi kurang lebih setengah dari tinggi *green body* dengan *space holder*. Nilai densitas tersebut merupakan nilai dapat diterima dan biasa diperoleh pada proses metalurgi serbuk dengan sintering tanpa dibantu dengan penekanan atau tanpa *liquid phase sintering* (Bakan, 2006, Gulsoy & German 2008).

4.4 Sintering

Mekanisme dari proses sinter adalah terjadi ikatan antarpartikel pada kondisi temperatur dibawah temperatur titik lebur. Pada peristiwa tersebut terjadi difusi antar permukaan atom sehingga atom-atom yang berikatan mengalami *necking* dan pada akhirnya batas dinding antar partikel akan hilang dan terjadi homogenisasi antar partikel.

Sintering dilakukan dalam dua tahap. Pertama, sintering pada suhu rendah (200°C) dan ditahan selama 1 jam. Hal ini dimaksudkan untuk memberi kesempatan kepada *space holder* menguap meninggalkan ruang-ruang kosong/ pori-pori makro (gambar 4.4), karena suhu penyubliman dari urea ini adalah di bawah 200°C. Kemudian dilanjutkan dengan sintering pada suhu 550°C selama 1 jam untuk memberikan kesempatan partikel-partikel aluminium saling berdifusi dan menyatu menjadi struktur yang kuat. Seperti telah diketahui bahwa temperatur lebur aluminium adalah 660°C, hal ini menunjukkan bahwa temperatur yang dipakai dalam penelitian berada pada batasan "*solid state sintering*".



Gambar 0.4. Bentuk ruang-ruang kosong yang ditinggalkan oleh space holder urea (dengan mikroskope stereo perbesaran 19 x)

Satu hal yang menarik terjadi pada specimen dengan fraksi massa 0% H_2NCONH_2 dimana terdapat bagian yang berlubang pada bagian potongan melintang (*cross section*) spesimen. Fenomena ini disebut dengan *swelling*. Peristiwa ini terjadi akibat adanya transfer difusi fasa cair ke dalam fasa padat. *Swelling* umumnya terjadi pada logam paduan yang fasa cairnya memiliki kelarutan yang tinggi di dalam fasa padat

dan juga temperatur dan waktu tahan sinter yang tinggi. Akibat dari *swelling* ini akan membentuk pori di bagian dalam specimen sehingga densitas menurun. Cara untuk mencegah terjadinya *swelling* adalah dengan menggunakan ukuran serbuk yang homogen dan temperatur sinter lebih rendah yaitu pada *solid state sintering*.

Hal lain yang juga diperhatikan dari proses sinter adalah terlihat adanya lapisan oksida dipermukaan specimen karena logam aluminium merupakan salah satu logam yang paling reaktif terhadap lingkungan. Ketebalan lapisan oksida secara fisik pada tergantung dari kemampuan permukaan untuk menyerap udara secara berkelanjutan hingga temperatur furnace mencapai temperatur kamar. Lapisan oksida perlu dihindari, lapisan tersebut dapat dihilangkan dengan cara diampelas.

4.5 Porositas dan morfologi dari lubang pori

Setelah proses sintering maka spesimen kemudian didinginkan di dalam *furnace* sampai dengan temperatur kamar kemudian dibersihkan dan seperti ditunjukkan oleh gambar 4.5 dan diukur dimensinya. Spesimen tanpa *space holder* juga diukur sebagai kontrol. Makro pori dari spesimen terlihat jelas menunjukkan terbuangnya *space holder* pada waktu proses sintering terjadi di tempat secara random. Di daerah dimana *space holder* dekat dengan permukaan maka akan menjadi jalan untuk menguapnya *space holder* urea yang kemudian menarik *space holder* di sebelah dalam untuk keluar.



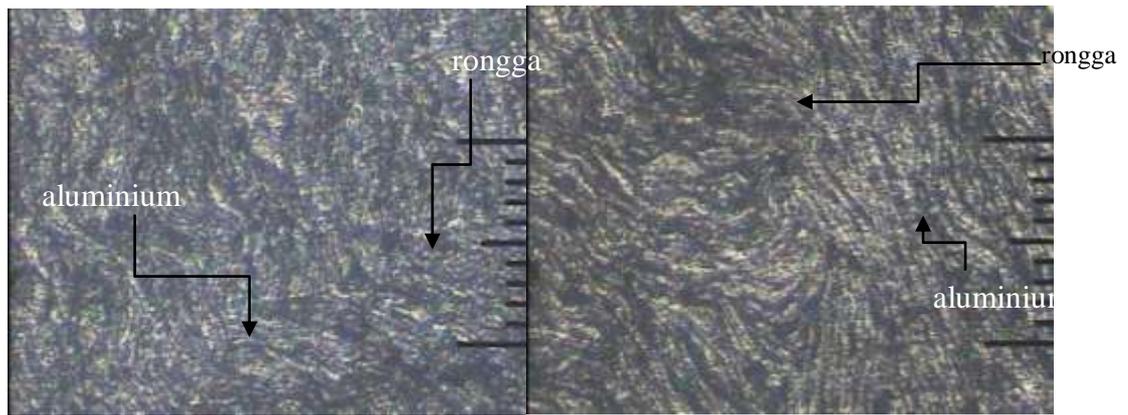
Gambar 0.5 Spesimen setelah proses sintering langsung diambil dari furnace dilihat dari samping dengan fraksi massa urea 70%.

Spesimen kemudian dipotong menggunakan gergaji tangan dengan ukuran tinggi 12 mm untuk diukur porositasnya dengan penimbangan dan pengukuran dimensi dan diampelas untuk pengamatan struktur mikro dan pengujian tekan.(gambar 4.6)



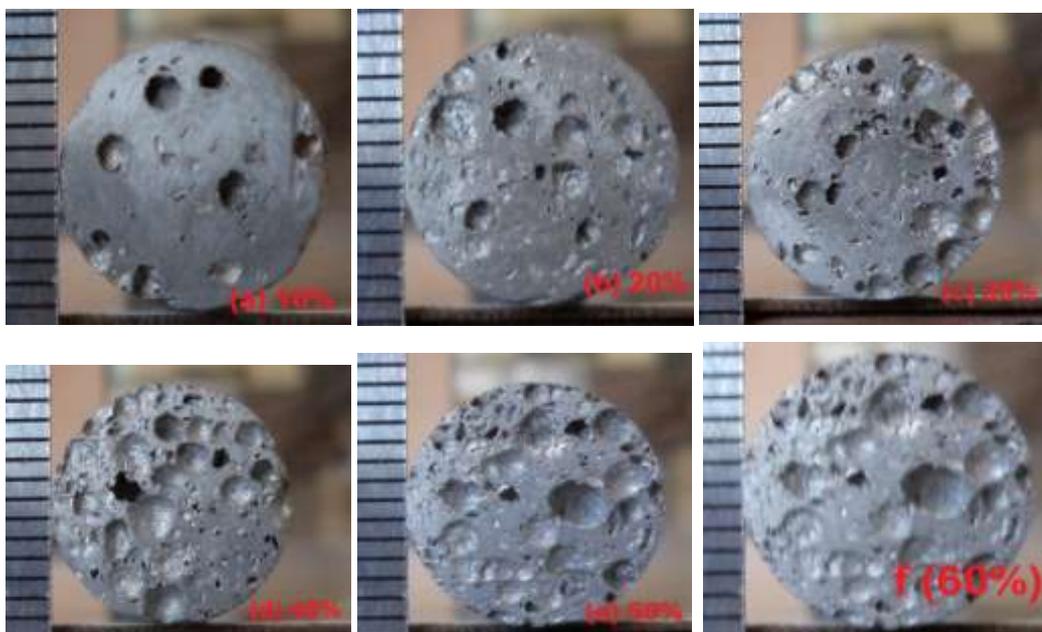
Gambar 0.6 Spesimen setelah dipotong dan dibersihkan dilihat dari samping

Untuk material *tanpa space holder*, setelah sintering diperoleh porositas sebesar 8,9 % (Gambar 4.7). Porositas ini turun sedikit dibanding pada kondisi *green body* (sebelum sintering). Hal ini disebabkan oleh telah berdifusinya partikel-partikel aluminium selama proses sintering. Namun demikian masih terlihat pori-pori mikro yang terbentuk dari celah antar partikel dari bagian antar partikel yang tidak kontak secara langsung sehingga tidak terjadi difusi di bagian tersebut. Pori-pori mikro ini dapat berlaku sebagai retak awal di dalam matrik aluminium, oleh karena itu harus diusahakan sekecil mungkin apabila diinginkan material berpori berkekuatan tinggi. Kekuatan dari material berpori ini ditentukan oleh *neck* yang terbentuk antar partikel serbuk. Bentuk dan ukuran serbuk juga menentukan porositas yang dihasilkan. Pada penelitian ini serbuk berbentuk flake dan ukuran di bawah $100\mu\text{m}$ menghasilkan *aluminium solid* dengan porositas rendah (8,9%) dengan ukuran pori-pori 10-30 μm .



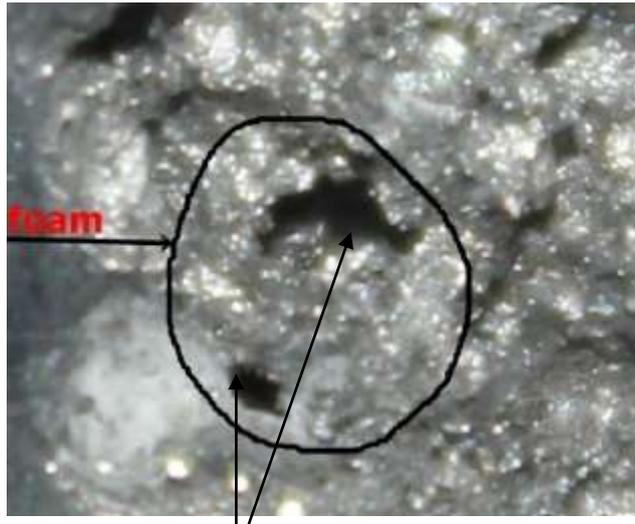
Gambar 0.7 Struktur mikro aluminium yang disinter di daerah tanpa *space holder*.

Gambar 4.8 secara umum dapat dikatakan bahwa porositas akan meningkat seiring dengan kenaikan fraksi volume dari *space holder*. Kenaikan porositas ini identik dengan kenaikan foamabilitas dari green body. Pada aluminium dengan *space holder* yang bervariasi dapat dilihat bahwa distribusi dari pori-pori makro hampir merata diseluruh spesimen. Bentuk dari lubang pori juga menyerupai dari bentuk awal *space holder*. Aluminium berpori dengan butiran urea yang berdiameter sampai dengan 1,8 mm menunjukkan porositas yang lebih merata di seluruh bagian dengan porositas total mencapai 49.66 %.



Gambar 0.8 Foto makro dari aluminium berpori dengan variasi bentuk lubang pori yang berasal dari *space holder* berbentuk (a) 10% (b) 20% (c) 30%, (d) 40%, (e) 50% dan (f) 60%

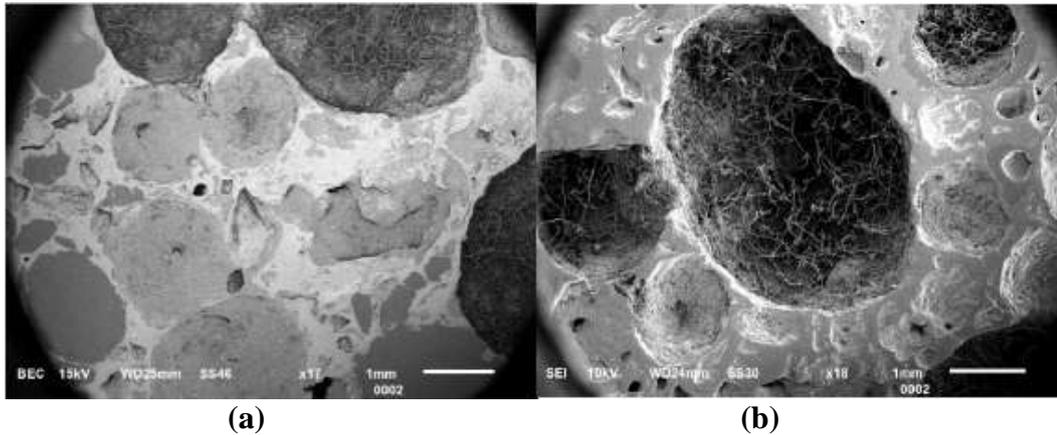
Lubang-lubang pori yang saling berhubungan juga terlihat pada poroistas yang tinggi dan menunjukkan kuantitas lebih banyak dan jelas (gambar 4.8(d-f)). Pori-pori makro yang menunjukkan bekas urea mengindikasikan aliran penyubliman urea selama pemanasan tahap pertama. Pada aluminium berpori yang berasal dari urea dengan porositas 32,39-49,66% kesaling hubungan antar lubang-lubang makro diameter 2 mm ditunjukkan oleh lubang kecil berwarna gelap (Gambar 4.9)



Lubang-lubang

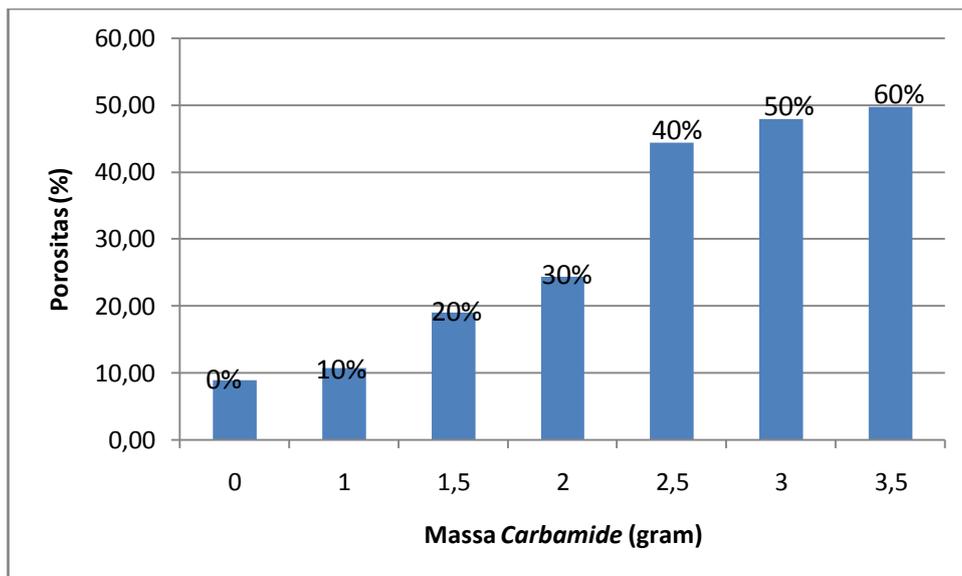
Gambar 0.9 Foto makro dari aluminium berpori dengan variasi bentuk lubang pori yang berasal dari space holder berbentuk (a) anyaman 0,8 mm, (b) gabungan 2 mm dan 0,8 mm, (c) spiral 2 mm

Pengamatan struktur makro dari aluminium berongga yang dihasilkan dengan menggunakan berkas Secondary Electron dari SEM (SE-SEM) seperti ditunjukkan pada gambar 4.10(b) menggambarkan rongga pori-pori yang terbentuk hampir terdistribusi merata tetapi terdapat pemusatan pori dengan ukuran yang lebih besar. Jika dibandingkan dengan ukuran urea secara keseluruhan maka pori tersebut masih tergolong ke dalam ukuran butir urea walaupun rata-rata pori yang dihasilkan lebih besar. Adanya ukuran pori-pori yang terlalu besar dikarenakan beberapa partikel urea saling berhimpitan satu sama lain atau disebut dengan *interconnecting cells channels* sehingga pada saat disolusi diperoleh pori yang besar. Sedangkan dari pengamatan dengan berkas Back Scattered Electron (BSE-SEM) pada Gambar 4.10(a) memperlihatkan adanya fase baru yang terbentuk pada daerah yang telah ditinggalkan oleh urea. Hal ini eramati dengan adanya daerah yang teramati lebih gelap dibanding daerah lain.



Gambar 0.10 Struktumakro dari aluminum foam dengan fraksi massa 60% urea H_2NCONH_2 diambil menggunakan SEM, (a) Gambar BSE-SEM , (b) Gambar SE-SEM

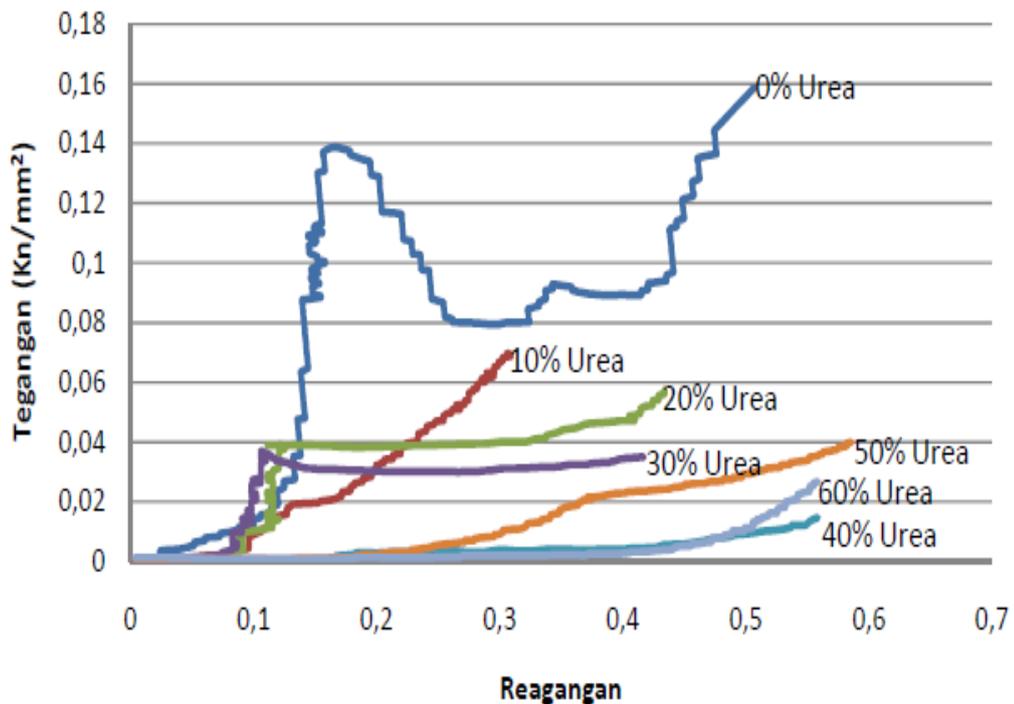
Porositas dari alumunium berpori semakin meningkat seiring dengan bertambahnya massa/volume urea (carbamide) dalam *green compact* dan semakin meningkatnya porositas dari masing-masing specimen (Gambar 4.11). Pada specimen 40%, 50% dan 60% memiliki porositas yang meningkat lebih tinggi dari pada specimen lainnya, hal ini dikarenakan bertambahnya massa urea di dalamnya, dan juga diakibatkan karena penumpukan urea pada specimen.



Gambar 0.11 Grafik perubahan porositas terhadap massa urea

4.6 Sifat mekanik

Sifat mekanik dari aluminium berpori ini diuji menggunakan pengujian kompresi test (Gambar 4.12). Kurve kompresi tegangan–regangan dari spesimen-spesimen menunjukkan tipikal dari kurva logam berpori yang terdiri dari tiga daerah yang berbeda yaitu (i) daerah deformasi elastis, (ii) daerah plateau dan (iii) daerah densifikasi dimana antar dinding lubang pori sudah bertemu mengakibatkan terjadinya melonjaknya aliran tegangan tekan. Untuk aluminium dengan fraksi volume *space holder* = 0, daerah plateauau berada dalam range yang lebih sempit dibanding dengan spesimen yang lain, namun mempunyai tegangan plateau dan Modulus Young's yang lebih tinggi .



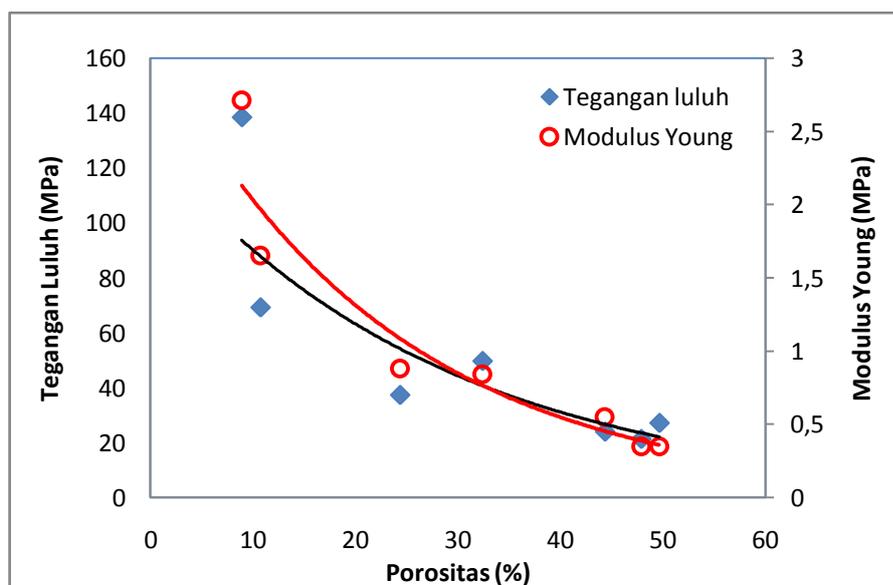
Gambar 0.12 Kurva tegangan-regangan dari aluminium dengan variasi porositasi

Pada gambar 4.12 dapat dilihat bahwa kurva akan semakin landai seiring dengan bertambahnya massa/volume urea (*carbamide*) dalam *green compact* dan semakin meningkat porositasi spesimen. Hal ini menunjukkan semakin tinggi porositasi hasil *disolusi* maka kekuatan tekan semakin rendah

Dari gambar 4.13 dapat dilihat bahwa tegangan luluh dari alumnum berpori semakin rendah seiring dengan bertambahnya porositas atau fraksi volume dari space holder (138 MPa untuk porositas 8,91%, 69, 28 MPa untuk porositas 10,72%, dan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.1). Sejenis dengan hal tersebut, nilai dari Modulus Young's juga menunjukkan penurunan seiring dengan kenaikan porositas.

Tabel 4. 1.Tegangan luluh dengan porositas untuk setiap spesimen

Spesimen	Tegangan Luluh (MPa)	Modulus Young (MPa)	Porositas (%)
0%	138,44	2,71	8,90
10%	49,28	1,65	10,72
20%	49,77	0,84	32,39
30%	37,42	0,88	24,34
40%	24,07	0,55	44,35
50%	21,42	0,35	47,89
60%	27,25	0,35	49,66



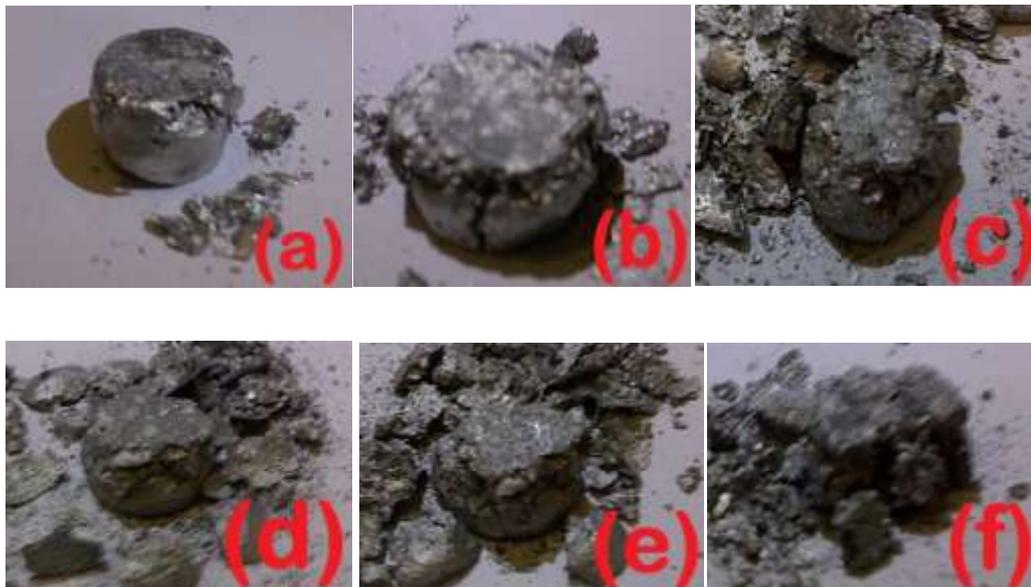
Gambar 0.13.Grafik tegangan luluh dan Modulus Young terhadap porositas untuk masing-masing spesimen.

Pada spesimen 0% urea memiliki nilai tegangan luluh yang paling tinggi diantara spesimen lainnya, hal ini dikarenakan sedikitnya porositas yang terkandung di dalamnya dengan tegangan luluh sebesar 138,44 MPa, sedangkan untuk spesimen 50% urea menerima tegangan luluh yang paling rendah berada di poin 21,42 MPa, hal ini disebabkan besarnya persentase porositas di dalamnya. Penelitian yang dilakukan oleh Habibolahzadeh (2010) dengan parameter yang ditunjukkan pada Tabel 4.2 mempunyai hasil yang mirip dengan penelitian ini.

Tabel 4. 2. Perbandingan parameter dam hasil penelitian.

Parameter	Habibolahzadeh (2010)	Penelitian ini
Waktu <i>sinter</i> (menit)	120	60
Suhu <i>sinter</i> (°C)	640	550
Tekanan kompaksi (MPa)	330	300
Tegangan luluh (MPa)	10	24,07 – 138,44
Porositas (%)	40 – 85	8,90 – 49,66

Deformasi yang diakibatkan oleh pengujian menunjukkan adanya kerusakan yang terjadi pada bagian yang terdapat banyak rongga-porositas lebih tinggi seperti pada Gambar 4.14.



Gambar 0.14. Spesimenfraksi (a) 10% (b) 20% (c) 30% (d) 40% (e) 50% (f) 60%

Semakin banyak rongga yang dihasilkan akan semakin meningkat pula porositas dari masing-masing spesimen tersebut, dan mengakibatkan perubahan deformasi semakin cepat sehingga kekuatan tekannya menjadi lebih rendah. Adanya lapisan oksida pada serbuk aluminium dan suhu sinter yang diduga masih terlalu rendah ini yang diduga menyebabkan difusitas dari butir-butir aluminium tidak sempurna sehingga kekuatan dari aluminium berpori ini masih rendah.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Aluminium berpori dengan porositas sampai dengan 49,66.2% dari fraksi massa urea 60% telah dapat difabrikasi menggunakan urea sebagai bahan *space holder* .
2. Fraksi massa dari *space holder* sangat menentukan porositas aluminium berpori, dimana semakin besar fraksi volume dari *space holder* menghasilkan porositas yang semakin besar.
3. Kekuatan dan modulus elastis dari aluminium berpori dipengaruhi porositas dari material, dimana fraksi massa dari *space holder* sangat menentukan porositas.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, masih memberikan banyak pertanyaan dan peluang untuk dilakukan penelitian lanjutan dan langkah-langkah untuk menyempurnakan produk aluminium berpori, yaitu :

1. Perlu dilakukan studi lebih dalam tentang morfologi dan kajian fase yang terbentuk dari urea yang tertinggal dari lubang pori.
2. Perlu dilakukan penelitian tentang pengaruh variasi tekanan kompaksi terhadap kekuatan dan elastik modulus dari aluminium berpori.
3. Perlu dilakukan penelitian lanjutan tentang pengaruh suhu sintering terhadap kekuatan dan elastik modulus dari aluminium berpori.

4. Perlu dilakukan penelitian tentang pengaruh penambahan binder dan suhu sintering terhadap kekuatan dan elastik modulus dari aluminium berpori.

Daftar Pustaka

- ASHBY, M. F., EVANS, A., FLECK, N. A., GIBSON, L. J., HUTCHINSON, J. W. & WADLEY, H. N. G. 2000. *Metal foams : A design guide*, Butterworth-Heinemann: Burlington.
- BAFTI, H. & HABIBOLAHZADEH, 2010, Production of aluminium foam by spherical carbamide space holder technique-processing parameters, *Materials and Design*, 31, 4122-4129
- BANHART, J. 2001. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46, 559-632.
- BAUMEISTER, J., BANHART, J. & WEBER, M. 1997. Aluminium foams for transport industry. *Materials & Design*, 18, 217-220.
- BRAM, M., STILLER, C., BUCHKREMER, H. P., STOVER, D. & BAUR, H. 2000. High-porosity Titanium, stainless steel, and superalloy parts. *Advanced engineering materials*, 2, 196-199.
- ERK, K. A., DUNAND, D. C. & SHULL, K. R. 2008. Titanium with controllable pore fractions by thermoreversible gelcasting of TiH₂. *Acta materialia*, 56, 5147-5157.
- GÜDEN, M., ÇELİK, E. & INODOT, A. 2007. Effects of compaction pressure and particle shape on the porosity and compression mechanical properties of sintered Ti6Al4V powder compacts for hard tissue implantation. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 85, 547-555.
- HOHLFELD, J., HANNEMANN, C., VOGEL, R., HIPKE, T. & NEUGEBAUER, R. 2011. Alternative starting materials for the production of aluminum foam by the powder metallurgical process. *Production Engineering*, 5, 25-30.
- ITO, K. & KOBAYASHI, H. 2006. Production and fabrication technology development of aluminum useful for automobile lightweighting. *Advanced engineering materials*, 8, 828-835.
- JEE, C. S. Y., OZGUVEN, N., GUO, Z. X. & EVANS, J. R. G. 2000. Preparation of high porosity metal foam. *Metallurgical Materials Transaction*, 31B, 1345-1352.
- JORGENSEN, D. J. & DUNAND, D. C. 2010. Ti-6Al-4V with micro- and macropores produced by powder sintering and electrochemical dissolution of steel wires. *Materials Science and Engineering: A*, 527, 849-853.
- JORGENSEN, D. J. & DUNAND, D. C. 2011. Structure and mechanical properties of Ti-6Al-4V with a replicated network of elongated pores. *Acta materialia*, 59, 640-650.
- KWOK, P. J., OPPENHEIMER, S. M. & DUNAND, D. C. 2008. Porous Titanium by electro-chemical Dissolution of Steel Space-holders. *Advanced engineering materials*, 10, 820-825.

- LONG, M. & RACK, H. J. 1998. Titanium alloy in total joint replacement-a materials science perspectives. *Biomaterials*, 19, 1621-1639.
- LU, T., STONE, H. & ASHBY, M. 1998. Heat transfer in open-cell metal foams. *Acta materialia*, 46, 3619-3635.
- MURRAY, N. & DUNAND, D. 2006. Effect of initial preform porosity on solid-state foaming of titanium. *Journal of Materials Research*, 21, 1175-1188.
- NANSAARNG, S. & SOPHA, S. Year. A synthesis of aluminium foam from ingot by compressing method. In: Proceedings of the 1st WSEAS international conference on Materials science, 2008. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 130-133.
- NIU, W., BAI, C., QIU, G. B. & WANG, Q. 2009. Processing and properties of porous titanium using space holder technique. *Materials Science and Engineering: A*, 506, 148-151.
- NUGROHO, A. W. 2012. Fabrikasi Alumunium Berpori Memanjang (Elongated Pores) Menggunakan Metode Metalurgi Serbuk dengan Space Holder Pb-Sn. Laporan Hasil Penelitian, Mechanical Engineering Department, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- NUGROHO, A. W., LEADBEATER, G. & DAVIES, I. 2010. Processing of a porous titanium alloy from elemental powders using a solid state isothermal foaming technique. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 21, 3103-3107.
- NUGROHO, A. W., LEADBEATER, G. & DAVIES, I. J. 2011. Processing and properties of porous Ti-Nb-Ta-Zr alloy for biomedical applications using the powder metallurgy route. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 8, 169.
- OH, I. H., NOMURA, N., MASAHASHI, N. & HANADA, S. 2003. Mechanical properties of porous titanium compacts prepared by powder sintering. *Scripta Materialia*, 49, 1197-1202.
- PILON, D., PANNETON, R., SGARD, F. & LEFEBVRE, L. P. 2004. Influence of micro-structural properties on the acoustic performances of novel metallic foams. *Canadian Acoustics*, 32, 24-25.
- SCHWARTZ D.S, SHAH D.S, LEDRICH R.J, MARTIN R.L & D.A., D. Year. Porous and cellular materials for structural applications. In: SCHWARTZ D.S, SHIH D.S, EVANS AG & HNG, W., eds. MRS Symposium 1998. 225.
- SERTKAYA, A., ALTiNiSiK, K. & DINCER, K. 2011. Experimental investigation of thermal performance of aluminum finned heat exchangers and open-cell aluminum foam heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*.
- SMITH, B., SZYNISZEWSKI, S., HAJJAR, J., SCHAFER, B. & ARWADE, S. 2011. Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties. *Journal of Constructional Steel Research*.

TANG, H. P., ZHU, J. L., WANG, J. Y., GE, Y. & LI, C. Year. Sound Absorption Characters of Metal Fibrous Porous Material. *In: LEFEBVRE, L. P., BANHART, J. & DUNAND, D. C., eds. Proceedings of the Fifth International Conference on Porous Metals and Metallic Foams, 2008 Montreal Canada. DEStech Publication, Inc, p.181.*

WANG, X., LI, Y., XIONG, J., HODGSON, P. D. & WEN, C. E. 2009. Porous TiNbZr alloy scaffolds for biomedical applications. *Acta Biomaterialia*, 5, 3616-3624.

WEN, C. E., YAMADA, Y., SHIMOJIMA, K., CHINO, Y., ASAHINA, T. & MABUCHI, M. 2001. Processing of biocompatible porous Ti and Mg. *Scripta Materialia*, 45, 1147-1153.

<http://www.exxentis.co.uk/metal-foam.html>

<http://www.pickpm.com/designcenter/porous.pdf>

<http://www.seac.nl>