

---

## PENGEMBANGAN MATERIAL *POROUS ALUMINUM* MENGGUNAKAN TEKNIK METALURGI SERBUK DENGAN *SPACE HOLDER* PADUAN Pb-Sn

Aris Widyo Nugroho

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta  
Jl. Lingkar Selatan Tamantirto, Kasihan, Bantul Yogyakarta 55183

\*Email: ariswidyo.nugroho@umy.ac.id

### Abstrak

Penelitian untuk mengembangkan fabrikasi aluminium berpori dengan teknik metalurgi serbuk dengan *space holder* paduan Pb-Sn telah dilakukan. Serbuk aluminium berbentuk flake dicampur dengan tiga variasi fraksi massa paduan Pb-Sn sebagai *space holder*. Campuran tersebut kemudian dikompaksi dengan tekanan 300 kg/cm<sup>2</sup> sehingga membentuk *green body*. Spesimen diperoleh setelah sinterring dua tahap dilakukan atas *green body* yaitu sinterring suhu rendah (200°C), dan dilanjutkan dengan sinterring pada suhu (550°C). Spesimen diuji struktur mikro dengan mikroskop optik dan ditentukan porositasnya dengan penimbangan dan pengukuran dimensinya. Sedangkan kekuatan tarik dan modulus elastisitas diperoleh dari uji tekan menggunakan *universal testing machine*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aluminium berpori dapat diproduksi, dengan porositas mencapai 31,2% pada fraksi massa *space holder* sebesar 0.34. Kurva tegangan-regangan yang dihasilkan dari pengujian kuat tekan berbentuk *plateau* dan menunjukkan bahwa nilai kekuatan menurun seiring dengan peningkatan porositas material.

**Kata kunci:** *aluminum foam, material berpori, metalurgi serbuk, space holder*

### 1. PENDAHULUAN

Material berpori (*porous materials* atau *metals foam* atau *cellular materials*) telah dikenal sebagai salah satu jenis material teknik yang memiliki kerapatan jauh lebih rendah dari material padat (*solid materials*). Dengan struktur berpori ini material tersebut dapat menampilkan banyak fitur, seperti kapasitas menyerap energi, sifat termal, bobot dan sifat peredaman suara yang unik. Fitur-fitur ini sangat menarik dalam aplikasi di industri mobil (Ito and Kobayashi, 2006), biomedis (Lee et al., 2009) dan lain-lain. Aplikasi penting yang lain adalah sebagai penyekat panas ataupun sebagai alat penukar kalor (Ashby, 2000).

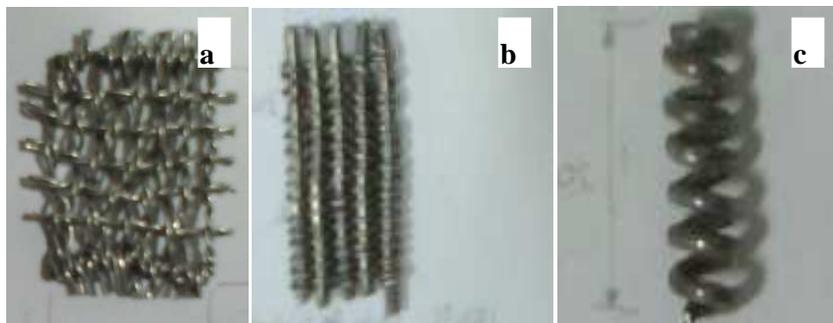
Secara garis besar proses pabrikan tersebut dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis metode, yaitu *liquid state processing* dan *solid state processing*. Dalam *liquid state processing* ini, logam dipanaskan sampai temperatur lelehnya sehingga mencair kemudian ditambahkan bahan pengembang atau gelembung gas diinjeksikan secara langsung. Selama proses pendinginan, gas terperangkap di dalamnya sehingga terbentuk pori-pori (rongga-rongga) di dalam material tersebut. Namun, metode *liquid state processing* membutuhkan bahan pengembang, contohnya Ti<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, yang relative mahal dan harus diimpor dari luar negeri. Sedangkan pembuatan logam berpori dengan bentuk pori yang lebih kompleks, proses fabrikasi dengan menggunakan metode *solid state processing* melalui metalurgi serbuk diakui lebih sesuai dan temperatur yang dibutuhkan selama proses fabrikasi lebih rendah dibanding dengan proses lelehan. Rongga atau pori-pori dari material diperoleh antara lain dari : sinterring antar butir serbuk logam yang tidak sempurna (Oh et al., 2003, Güden et al., 2007), atau ruang kosong yang ditinggalkan oleh bahan *space holder*, (Jee et al., 2000, Wang et al., 2009, Jorgensen and Dunand, 2011, Kwok et al., 2008), atau gas mulia yang diinjeksikan pada proses pemadatan kemudian mengembang pada waktu proses sinterring (Murray and Dunand, 2006, Nugroho et al., 2010). Fabrikasi aluminium berpori dengan bentuk pori yang kompleks yaitu pori-pori yang memanjang dengan ukuran yang sama dan saling berkoneksi sangat menarik dan dibutuhkan karena aluminium dengan bentuk pori seperti itu dapat digunakan sebagai alat penukar kalor atau dengan sifat permeabilitasnya dapat digunakan sebagai filter-separator. Penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh Kwok (2008) dan Jorgensen & Dunand (2010) menunjukkan bahwa logam titanium berpori-pori memanjang dapat dihasilkan dengan menggunakan anyaman kawat dari baja sebagai bahan *space holder*-nya. *Space holder* tersebut dapat dibuang dengan cara dilarutkan dalam cairan elektrokimia setelah proses sinterring. Namun demikian metode ini membutuhkan waktu yang lebih panjang untuk melarutkan *space holder*-nya.

---

Tulisan ini membahas tentang kemungkinan pengembangan fabrikasi material berpori dengan *space holder* yang murah dan mudah untuk dibuang tanpa menambah proses fabrikasi. Didasarkan kebutuhan tersebut, maka pada penelitian ini kawat paduan Pb-Sn akan digunakan sebagai material *space holder*. Paduan tersebut disamping banyak tersedia, juga mempunyai titik eutectic yang rendah (183°C) sehingga dapat dibuang sekaligus pada waktu proses sintering.

## 2. METODE PENELITIAN

Serbuk *aluminum* murni dari MERCK German digunakan sebagai bahan utama. Kawat paduan Pb-Sn berdiameter 0,8 mm dan 2 mm dipakai sebagai bahan *space holder*. Anyaman kawat paduan Pb-sn dengan beberapa variasi anyaman, diantaranya adalah anyaman double yg berdiameter 0,8 mm seluas 3 cm x4 cm, dan anyaman gabungan antara kawat paduan berdiameter 0,8 mm dan 2 mm, dan kawat berdiameter 2 mm yang disusun spiral dan gabungan antara spiral 2 mm dan lilitan 0,8 mm 3 pasang setinggi 7 cm seperti ditunjukkan oleh Gambar 1. Masing-masing anyaman dan serbuk *aluminum* ditimbang sebelum digabungkan ke dalam cetakan. Penimbangan serbuk dan anyaman paduan Pb-Sn dilakukan dengan menggunakan timbangan digital dengan ketelitian 0,01 gram.



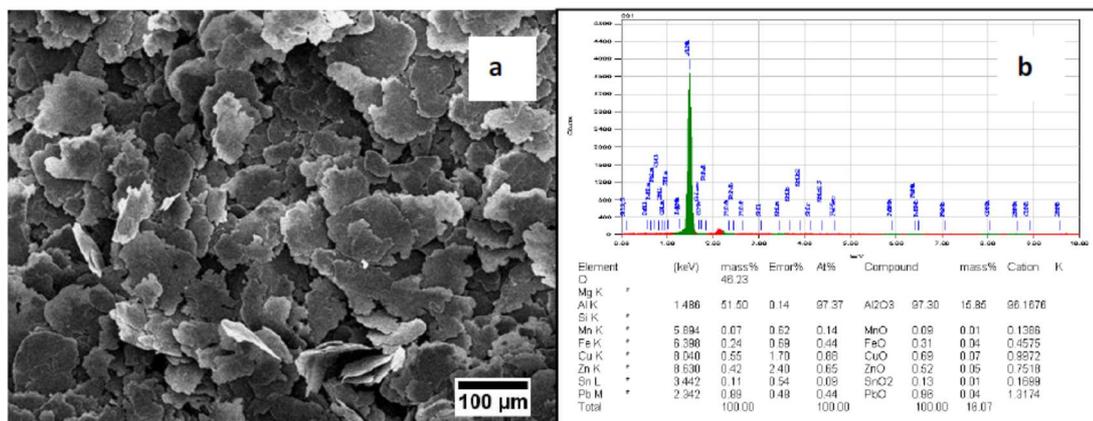
**Gambar 1. Anyaman *space holder* dengan berbagai bentuk dan diameter: (a) 8 mm, (b) 0,8 mm dan 2 mm, (c) 2 mm bentuk spiral (c)**

Hasil dari penempatan kawat paduan dan serbuk dalam cetakan dikompaksi dengan mesin cetak briket hasil rakitan dengan penekanan satu arah (*single end compaction*) dan *punch* berada pada bagian atas dan bergerak dari atas ke bawah. Cetakan yang digunakan berbentuk silinder berdiameter dalam 12 mm dan tinggi 11 cm dari bahan baja dengan *pin ejector stainless steel*. Spesimen dikompaksi dengan tekanan sebesar 300 kg/cm<sup>2</sup> dan ditahan selama 3 menit. Hasil kompaksi (*green body*) ditimbang dan diukur dimensinya. Selanjutnya disinter di *Naberthem furnace*. Temperatur sinter pertama sebesar 200°C dan ditahan selama 60 menit kemudian temperatur dinaikkan menjadi 550°C dengan waktu tahan 60 menit. Pendinginan dilakukan dengan menonaktifkan pemanas dan membiarkan temperatur turun sampai dengan temperature kamar dimana spesimen tetap di dalam furnace. Hasil dari proses sinter dilakukan pengamatan makro dan mikro struktur dengan menggunakan mikroskop optik. Pengamatan dengan SEM dilakukan untuk menentukan morfologi dan ukuran serbuk beserta komposisi kimianya. Pengukuran densitas relatif dilakukan dengan pengukuran dimensi dan penimbangan spesimen. Dari densitas maka diperoleh densitas relatif, dimana hasil tersebut digunakan untuk menghitung porositas. Selanjutnya dilakukan pengujian kuat tekan menggunakan *universal testing machine* (UTM) untuk mengetahui sifat mekanis dari *aluminum* berpori memanjang yang dihasilkan dengan kecepatan pembebanan sebesar 1 mm/menit.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Serbuk *aluminum* yang diperoleh dari Merck, German, dipakai sebagai bahan utama. Untuk mendapatkan gambaran tentang bentuk dan ukuran serbuk alumunium, dilakukan pemotretan dengan SEM (Gambar 2). Dari Gambar 2(a) diketahui bahwa bentuk serbuk alumunium 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  $<100\ \mu\text{m}$ .



**Gambar 2 (a) Bentuk dan ukuran dari serbuk *aluminum* yang digunakan, (b) hasil uji komposisi kimia serbuk aluminium dengan EDX**

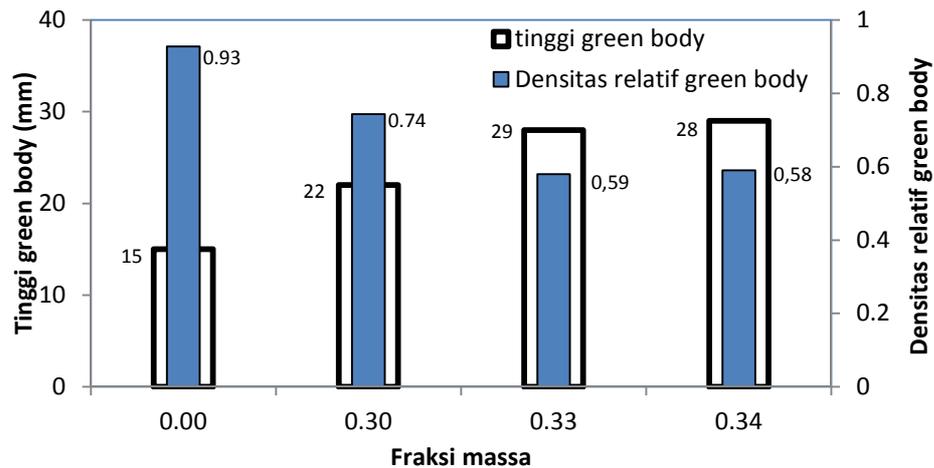
Selanjutnya dilakukan pengujian dengan *Energy Dispersive X-Ray Analysis* (EDX) untuk mengetahui gambaran komposisi serbuk aluminium dengan lebih mendetail, Gambar 2 (b) menunjukkan hasil pengujian EDX yang menunjukkan energi spektrum unsur-unsur yang terkandung dalam serbuk aluminium. Apabila ditinjau 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).

### 3.1 *Green Body* (Serbuk setelah Dikompaksi)

Tekanan kompaksi merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap kekuatan ikatan diantara partikel *aluminum* pada *green body*. Keberadaan dari lapisan oksida dari partikel aluminium akan mengurangi kekuatan ikatan antar partikel aluminium. Oleh karena itu lapisan film harus dipecah dengan memberikan tekanan kompaksi yang cukup. Hal ini akan memberikan kemungkinan untuk kontak antar partikel logam secara langsung yang sangat bermanfaat untuk langkah selanjutnya yaitu sintering. Pada penelitian ini diperoleh tekanan kompaksi sebesar  $300\ \text{kg/cm}^2$  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 biner seperti parafin atau PMMA ditambahkan pada campuran serbuk *aluminum*, namun hal itu akan menimbulkan naiknya biaya dari proses tersebut, menghasilkan gas yang dapat mengkontaminasi serbuk dan menambah waktu pada waktu proses pencampuran.

Bentuk kawat teranyam dari *space holder* Pb-Sn terlihat dapat memberikan pergerakan yang mudah dan pengaturan dari partikel-partikel *aluminum* 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 awal nyaman kawat Pb-Sn. 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.

Pengaruh dari kandungan *space holder* paduan Pb-Sn pada serbuk *aluminum* terhadap sifat-sifat fisik dari *green body* juga diteliti dan hasilnya menunjukkan bahwa densitas dari *green body* menurun sebesar 30% (dari 93%-58%) dengan naiknya fraksi massa dari *space holder* Pb-Sn menjadi 34% seperti ditunjukkan oleh gambar 3.

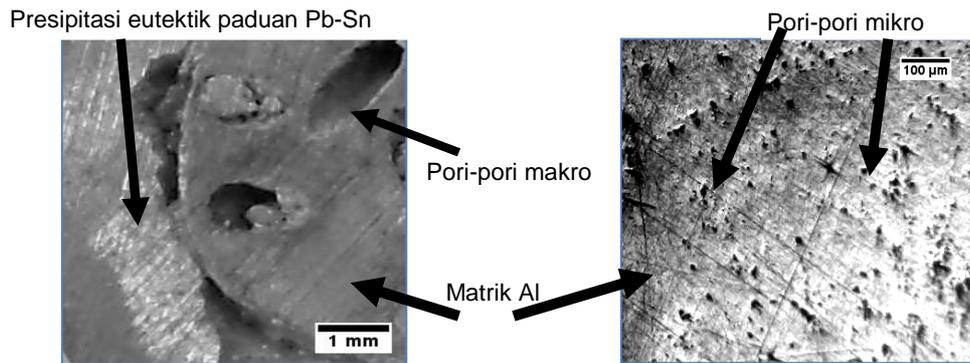


**Gambar 3. Variasi densitas dari green body dan foamabilitas vs fraksi massa *space holder***

Seperti telah dijelaskan di dalam metode penelitian bahwa pada setiap fraksi massa 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 body*-nya maka nantinya akan menghasilkan porositas yang lebih tinggi, atau dengan kata lain foamabilitasnya meningkat (Gambar 3). Dari Gambar 3 dapat ditunjukkan bahwa densitas dari *green body* tanpa campuran *space holder* dengan kompaksi sebesar 300 kg/cm<sup>2</sup> mencapai kurang lebih 90% dengan dimensi tinggi kurang lebih setengah dari tinggi *green body* dengan *space holder*. Nilai densitas tersebut merupakan nilai yang 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).

### 3.2 Sintering

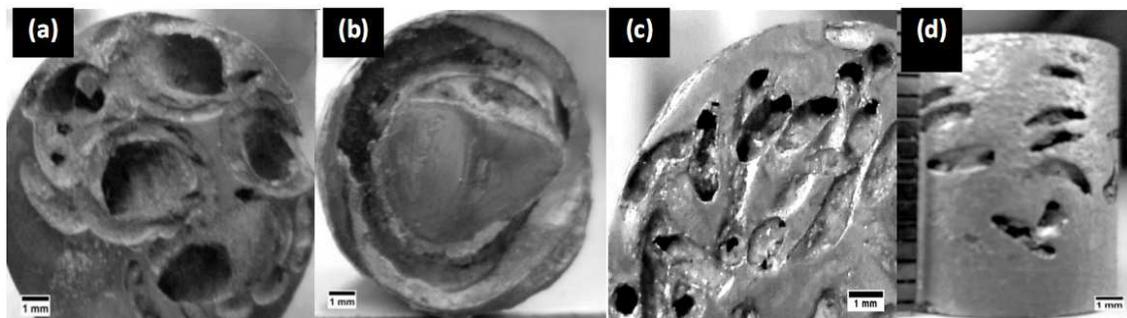
Sintering dilakukan dalam dua tahap. Pertama, sintering pada suhu rendah (200°C) dan ditahan selama 1 jam. Hal ini dimaksudkan untuk mencairkan dan mengalirkan *space holder* keluar meninggalkan ruang-ruang kosong/ pori-pori makro, karena suhu eutektik dari paduan Pb-Sn ini adalah 183°C. Kemudian dilanjutkan dengan sintering pada suhu 550°C untuk memberikan kesempatan partikel-partikel aluminium saling berdifusi dan menyatu menjadi struktur yang kuat. Ketidak sempurnaan dalam pembuangan *space holder* dari specimen akan menghasilkan mikrostruktur yang lebih padat dan lebih keras karena menginisiasi timbulnya liquid phase sintering disekitar *space holder* yang tersisa dan merupakan phase hasil presipitasi paduan dari reaksi eutektik Pb-Sn. Gambar 4(a) menampilkan daerah presipitasi paduan tersebut ditunjukkan dengan daerah yang lebih cerah. Daerah tersebut juga memperlihatkan bahwa lubang pori-pori sebagian masih diisi oleh *space holder* yang tidak terbuang. Dengan masih terisinya pori-pori tersebut maka selain porositas dari aluminium berpori ini berkurang, berat atau densitas dari material ini juga menjadi lebih besar. 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 (Gambar 4(b)).



**Gambar 4. (a) Ketidak sempurnaan pembuangan *space holder* mengakibatkan porositas berkurang, (b) pori-pori mikro pada spesimen**

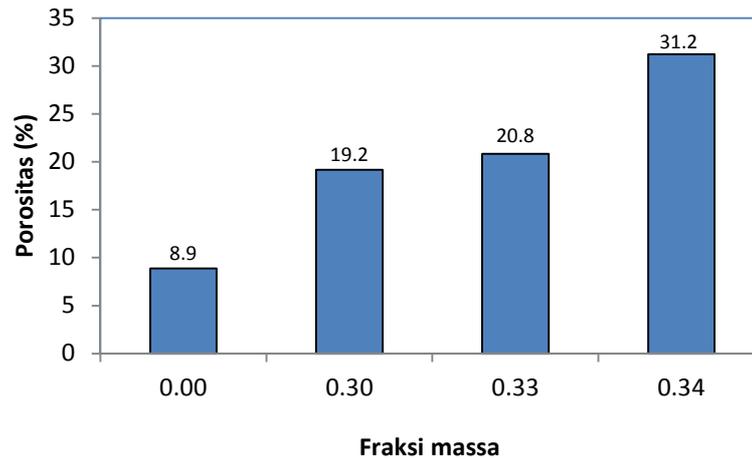
### 3.3 Porositas dan morfologi dari lubang pori

Setelah proses sintering maka spesimen kemudian didinginkan di dalam furnace sampai dengan temperatur kamar kemudian dibersihkan dan seperti ditunjukkan oleh gambar 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 pintu untuk meleleh *space holder* Pb-Sn yang kemudian menarik *space holder* di sebelah dalam untuk keluar. Spesimen diletakkan di atas pipa pendek untuk memberi kesempatan kepada *space holder* di bagian bawah dan disebelah atasnya untuk mengalir ke bawah tanpa mendapatkan hambatan.



**Gambar 5. Foto makro dari *aluminum* berpori dengan variasi bentuk lubang pori yang berasal dari *space holder* berbentuk (a) gabungan 2 mm dan 0,8 mm, (b) spiral 2 mm, (c) anyaman 0,8 mm (d) pandangan samping dari spesimen (c)**

Pada *aluminum* 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 anyaman *space holder*. Pada *aluminum* berpori yang berasal dari anyaman gabungan (dengan Pb-Sn 2 mm dan 0,8 mm) kesaling hubungan antar lubang-lubang makro diameter 2 mm ditunjukkan oleh lubang kecil yang berasal dari anyaman Pb-Sn diameter 0,8 mm (Gambar 5 (a)). *Aluminum* berpori memanjang yang berasal dari anyaman *space holder* spiral berbentuk spiral menunjukkan lubang panjang kontinyu dengan dinding yang relatif kasar. Dan tidak terlihat adanya lelehan Pb-Sn yang tertinggal (Gambar 5(b)). Sedangkan *aluminum* berpori yang berasal dari anyaman dari paduan Pb-Sn yang berdiameter 0,8 mm menunjukkan porositas yang lebih merata di seluruh bagian dengan porositas total mencapai 32 %. Lubang-lubang pori yang saling berhubungan juga terlihat lebih banyak dan jelas (gambar 5(c) dan (d)). Jalur-jalur yang menunjukkan bekas anyaman mengindikasikan aliran lelehan paduan Pb-Sn selama sintering.

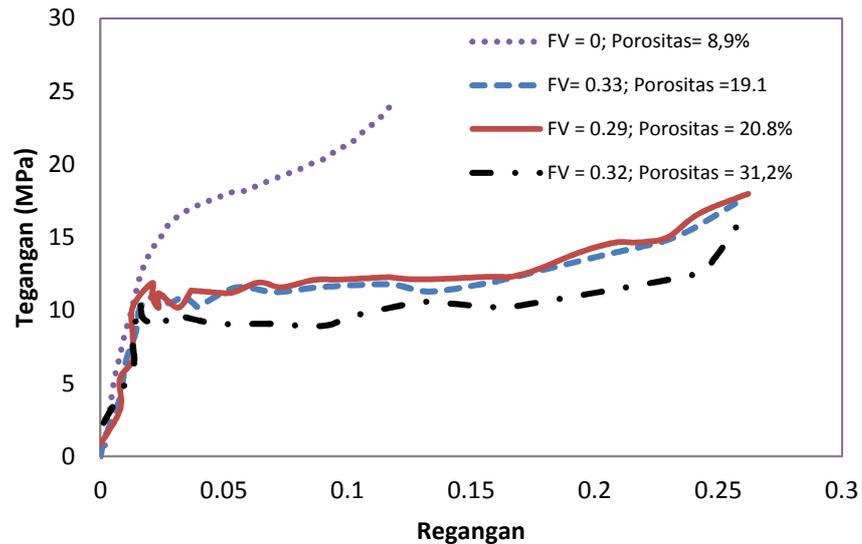


**Gambar 6. Porositas vs fraksi massa dari *space holder***

Spesimen dengan ukuran tinggi 12 mm untuk dihitung porositasnya dengan penimbangan dan pengukuran dimensi. Dari hasil pengukuran, diperoleh porositas spesimen yang mewakili dari jenis bentuk anyaman *space holder* dan 1 spesimen tanpa *space holder* sebagai kontrol seperti ditampilkan oleh Gambar 6. 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. Untuk material tanpa *space holder*, setelah sintering diperoleh porositas sebesar 8,9 %. Porositas ini turun sedikit dibanding pada kondisi green body (sebelum sintering). Hal ini disebabkan oleh telah berdifusinya partikel-partikel *aluminum* selama proses sintering. Namun demikian masih terdapat celah antar partikel yang berdifusi yang kemudian membentuk pori-pori mikro. Pori-pori mikro ini dapat berlaku sebagai retak awal di dalam matrik *aluminum*, 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 *aluminum* solid dengan porositas rendah (8,9%) dengan ukuran pori-pori 10-30  $\mu\text{m}$ .

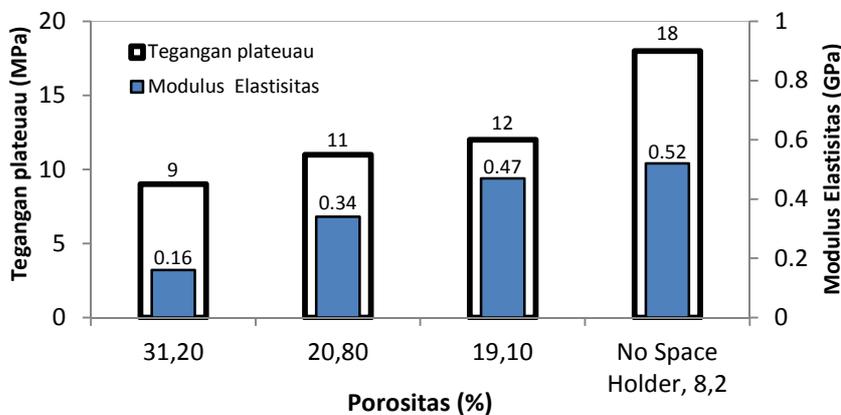
### 3.4 Sifat mekanik

Sifat mekanik dari *aluminum* berpori ini diuji menggunakan pengujian kompresi dengan menggunakan UTM. Kurve kompresi tegangan-regangan dari 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 (Gambar 7). Untuk *aluminum* dengan fraksi volume *space holder* = 0, daerah *plateau* berada dalam *range* yang lebih sempit dibanding dengan spesimen yang lain, namun mempunyai tegangan *plateau* dan Modulus Young's yang lebih tinggi (masing-masing 18 MPa dan 0.52 GPa). Nilai modulus elastisitas ini masih jauh di bawah dari nilai modulus elastisitas dari *aluminum* solid (69 GPa). Hal ini menunjukkan sintering di suhu 550°C belum menghasilkan proses difusi antar partikel yang sempurna sehingga ikatan antar partikel masih belum cukup kuat.



**Gambar 7. Kurva tegangan-regangan dari aluminium dengan variasi porositas**

Dari Gambar 8 dapat dilihat bahwa kekuatan dari aluminium berpori semakin rendah seiring dengan bertambahnya porositas atau fraksi volume dari *space holder* (12 MPa untuk 19,1%, 11 MPa untuk 20.8% dan 9 MPa untuk 31.2%). Nilai dari Modulus Young's juga menunjukkan penurunan seiring dengan kenaikan porositas (masing-masing (0.47 , 0.34 dan 0.16 GPa). Hal ini disebabkan karena keberadaan dinding-dinding pori-pori makro yang akan kolaps mengakibatkan laju tegangan menjadi turun drastis sedangkan laju regangan meningkat cepat. Penelitian ini mempunyai hasil yang mirip dengan yang dilakukan oleh Bafti & Habibolahzadeh (2010).



**Gambar 8. Tegangan plateau dan modulus elastisitas vs Porositas aluminium berpori**

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Aluminium berpori memanjang dan saling berhubungan dengan porositas sampai dengan 31.2% telah dapat difabrikasi menggunakan paduan P-Sn sebagai bahan *space holder*.
2. Fraksi massa dari *space holder* dan jenis anyaman menentukan hasil dari porositas *aluminum* berpori, dimana semakin besar fraksi massa *dari space holder* menghasilkan porositas yang semakin besar.
3. Kekuatan dan modulus elastis dari *aluminum* berpori dipengaruhi porositas dari material dan ditemui masih terlalu rendah.

---

## Ucapan Terima kasih

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Universitys Muhammadiyah Yogyakarta (UMY) melalui LP3M UMY yang telah membiayai penelitian ini. Terima kasih juga disampaikan kepada saudara Riki Pramono yang telah membantu penelitian ini dan saudara Muhammad Budi Nur Rahman atas bantuannya dalam foto SEM dan editing tulisan ini.

## 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. gb nhbv.
- Bafti, H. and Habibolahzadeh A. , 2010, Production of aluminum foam by spherical carbamide space holder technique-processing parameters, *Materials and Design*, 31 , 4122–4129
- Bakan, H.I., 2006, A novel water leaching and sintering process for manufacturing highly porous stainless steel. *Scripta Materialia*;55:203–6.
- Erk, K. A., Dunand, D. C. & Shull, K. R. 2008. Titanium with controllable pore fractions by thermoreversible gelcasting of TiH<sub>2</sub>. *Acta materialia*, 56, 5147-5157.
- Güden, M., Çelik, 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.
- Gulsoy, H.Ö, German R.M., 2008, Sintered foams from precipitation hardened stainless steel powder. *Powder Metall* 2008;51(4):350–3.
- 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. 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.
- Lee, J., Kim, H. & Koh, Y. 2009. Highly porous titanium (Ti) scaffolds with bioactive microporous hydroxyapatite/TiO<sub>2</sub> hybrid coating layer. *Materials Letters*, 63, 1995-1998.
- 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.
- Nugroho, A., 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.
- 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.
- 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.