

Pembuatan Aluminium Berpori dengan metode Metalurgi Serbuk Berbahan Amonium Hidrogen Karbonat ((NH₄)HCO₃) sebagai Space Holder beserta Karakterisasinya

(The Fabrication of porous aluminum using powder metallurgy technique with amonium hidrogen karbonat ((NH₄)HCO₃) as a space holder and its characterization)

ARIS WIDYO NUGROHO, ISWANTO

ABSTRACT

The research on fabrication of porous aluminum using powder metallurgy technique with amonium hidrogen karbonat as space holder has been carried out. The space holder powder with various space holder mass fraction of 20%, 30%, 40% and 50% in 5 gram of total mass and the aluminum powder were put into a can for mixing process. Afterward the mixed powder was compacted at 300 kg/cm² to obtain the green body. Density of the green body was then determined by measuring its dimension and the mass. Following this, the green body was put in a furnace and heated up to 200°C with holding time of 60 minutes for space holder removal. The second heating up was carried out up to 650°C with holding time of 60 minutes for sintering process and the furnace was then switched off for cooling. Porosity of the sintered porous aluminum was calculated and its microstructure was examined using an optical microscope. The compressive strength of the porous material was evaluated using universal testing machine. The result show that the porosity increases with an increase of the mass fraction in the range of 56-74% with the compressive strength in opposite way. The strength was found in the range of 1.2-15.7 MPa. All specimens show a typical brittle materials.

Keywords: porous aluminum, powder metallurgy space holder, ammonium hidrogen karbonat.

PENDAHULUAN

Aluminium berpori (aluminium foam) telah dikenal sebagai salah satu material yang banyak digunakan di dunia industri (Baumeister dkk., 1997; Ito and Kobayashi, 2006; Rausch dan Stöbener, 2005, Sertkaya, dkk, 2011, Pilon dkk, 2004) karena keunggulan fiturnya seperti kapasitas menyerap energi, sifat termal, bobot, morfologi dan sifat peredaman suara. Proses fabrikasi aluminium berpori secara garis besar digolongkan menjadi dua metode, yaitu metode metode liquid state processing dan metode solid state processing. Metode liquid state processing melibatkan proses peleburan/melting aluminium dengan penambahan bahan agen pengembang (TiH₂ atau ZrH₂) atau menginjeksikan gas (gas Argon) secara langsung. Metode ini 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 agen pengembang tersebut masih diimpor dengan harga yang mahal, demikian juga dengan penggunaan gas Argon. Metode solid state processing pada awalnya digunakan pada pembuatan titanium berpori. Porositas antara lain terbentuk dari : sintering tidak sempurna antar butir serbuk logam (Oh dkk., 2003, Guden dkk., 2007) atau ruang kosong bekas bahan pengisi/perancah (space holder) yang menguap, yang dapat berupa polimer (Jee dkk., 2000), carbamide (Bram dkk., 2000, Niu dkk., 2009), amonium hidrogen bikarbonat (Wen dkk., 2001, Wang dkk., 2009), kawat baja (Kwok dkk., 2008, Jorgensen and Dunand, 2010.), atau agen pengembang yang kompres dalam keadaan padat kemudian mengembang ketika dipanaskan (Hobfield dkk, 2011, Nansaarn dan Sopha, 2008); atau gas Ar yang dijebak pada saat proses pemadatan kemudian mengembang pada waktu proses pemanasan (*sintering*) (Murray and Dunand, 2006, Nugroho dkk., 2011). Pengembangan

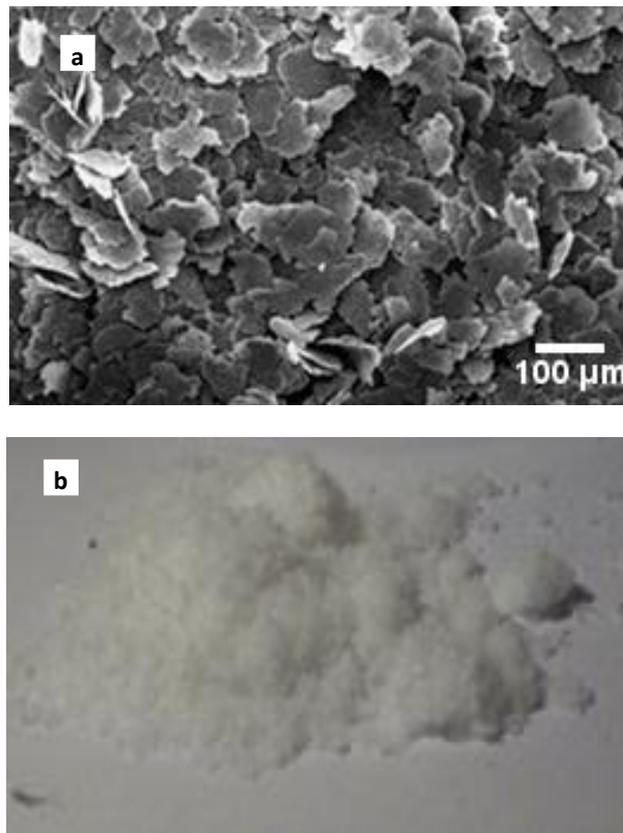
aluminium berpori dengan menggunakan berbagai space holder sudah dilakukan yaitu, kawat Pb-Sn (Nugroho, 2012) dan urea (Nugroho, 2015). Namun teramati adanya kontaminasi sisa Pb-Sn pada waktu proses sintering, sedangkan pada space holder urea porositas maksimum mencapai 88% pada fraksi massa space holder 80% dengan tegangan plateau sebesar 1.2 MPa.

Penelitian ini dilakukan untuk untuk mengembangkan aluminium berpori dengan bahan amonium hidrogen karbonat $((\text{NH}_4)\text{HCO}_3)$ yang banyak tersedia secara komersial, sebagai bahan alternative space holder dengan metode solid state processing, melalui teknik metalurgi serbuk. Bahan space holder kemudian di-remove dengan cara diuapkan sebelum proses sintering. Diharapkan dihasilkan aluminium foam dengan porositas tinggi proses yang sederhana dan biaya yang murah.

METODE PENELITIAN

Aluminium berbentuk serbuk sebagai bahan utama diproduksi MERCK German (Gambar 1.(a)) sedangkan ammonium hidrogen karbonat $((\text{NH}_4)\text{HCO}_3)$ dari Pudak Scientific sebagai bahan space holder diperoleh di toko kimia setempat (Gambar 1 (b)).

Pembuatan campuran Al- $((\text{NH}_4)\text{HCO}_3)$ untuk fraksi masa 50% (50:50), dengan mencampur serbuk ammonium hidrogen karbonat sebanyak 2,5 gram dan serbuk aluminium sebanyak 2,5 gram untuk memenuhi massa sampel penelitian sebesar 5 gram yang disesuaikan dengan cetakan. Cara yang sama dilakukan untuk membuat campuran fraksi massa 40% (40:60), 30% (30:70) dan 20% (20:80) dengan perbandingan berat yang sudah ditentukan. Proses pencampuran kedua serbuk dilakukan di dalam sebuah tabung, kemudian tabung terus digerakkan sehingga campuran dapat homogen.



GAMBAR 1. Serbuk yang digunakan:(a) foto SEM dari serbuk aluminium, (b) serbuk amonium hidrogen karbonat

Proses pembentukan specimen kompaksi (green body) dilakukan dengan melakukan kompaksi pada campuran tersebut menggunakan mesin cetak briket dengan penekanan satu arah (*single end compaction*). Punch terbuat dari baja yang telah diharden, berada pada bagian atas dan bergerak dari atas ke bawah. Spesimen dikompaksi pada tekanan sebesar 300 kg/cm² dengan waktu penahanan selama 3 menit. Spesimen dibuat berjumlah 3 buah untuk masing-masing variasi massa. Selanjutnya *green body* disinter di *Naberthem furnace* dalam dua tahap. Tahap pertama temperatur dinaikan sampai sekitar 200°C dengan waktu penahanan 60 menit lalu temperatur dinaikkan lagi sampai dengan 650°C dan ditahan selama 60 menit. Pendinginan dilakukan mendinginkan spesimen tetap di dalam dapur pemanas dalam kondisi mesin dimatikan sehingga suhu perlahan turun sampai temperature kamar dengan perlahan. Spesimen hasil sintering diamati struktur makro dan mikro dengan menggunakan mikroskop optik. Densitas relatif diukur dengan mengukur dimensi dan menimbang masing-masing specimen dengan persamaan (1) Kemudian di bandingkan dengan hasil perhitungan densitas solid teoritis. Perhitungan porositas menggunakan persamaan (2).

$$\rho = \frac{m}{v} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Porositas} = (1 - (\frac{\rho}{\rho_{AL}})) \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

Dimana : densitas spesimen, v : volume , m: massa dan ρ_{AL} : densitas aluminium teoritis. Selanjutnya densitas relative kemudian digunakan untuk menghitung porositas. Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan

universal testing machine (UTM) dengan kecepatan pembebanan sebesar 1 mm/menit.

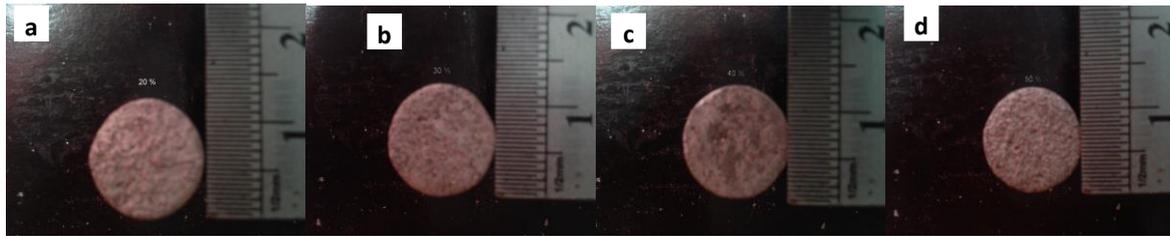
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahapan kompaksi, tekanan (*pressure*) merupakan parameter yang sangat penting dalam menentukan hasil fraksi massa (*green body*). Pada temperatur kamar, 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. Pada tahap selanjutnya tekanan akan mengakibatkan terjadinya peristiwa saling mengunci (*mechanical interlocking*) antar butir sehingga sulit terjadi pergeseran antar butir/serbuk sampai dihasilkan *green body* yang padat. Semakin besar tekanan maka densitas *green body* semakin tinggi dan persentase porositas semakin menurun. *Green body* yang dihasilkan diukur dimensinya menggunakan jangka sorong diperoleh diameter specimen rata-rata 12.27±0.08 mm, sedangkan hasil pengukuran tinggi dan massa ditampilkan oleh Tabel 1.

Dari pengukuran dimensi, ketinggian specimen tidak teramati adanya peningkatan ukuran yang besar seiring dengan kenaikan fraksi massa bahan *space holder*. Demikian juga nilai massa campuran terukur mendekati konstan. Hal ini menunjukkan ukuran butir dan sifat serbuk terhadap tekanan hampir sama yaitu dapat saling mengisi dan terkompresi dengan jarak langkah yang sama. *Green body* untuk keempat fraksi massa *spaceholder* ditunjukkan pada Gambar 2.

TABEL 1. Hasil pengukuran dimensi dan massa greenbody untuk masing masing fraksi massa

No	Fraksi massa ((NH ₄)HCO ₃ (%))	Tinggi (mm)	Massa (gr)
1	20	24.17±0.58	4.86±0.05
2	30	25.17±0.29	4.89±0.06
3	40	25.67±0.29	4.92±0.04
4	50	27.83±1.89	5.06±0.42

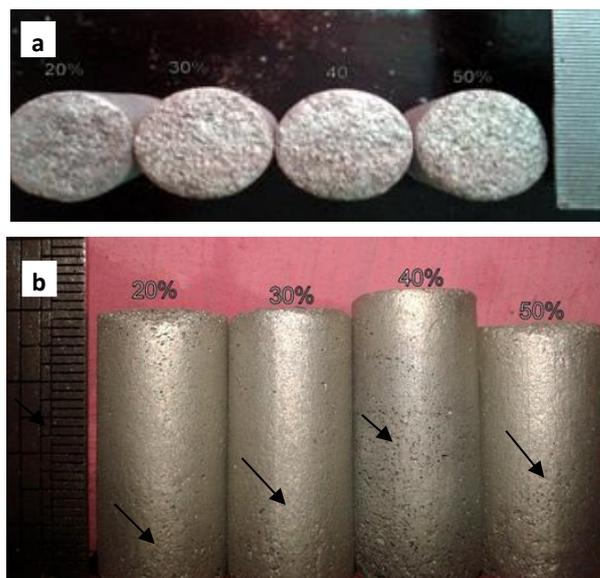


GAMBAR 2 Foto green compact fraksi massa pandangan atas dengan variasi fraksi massa 20, 30, 40, 50%

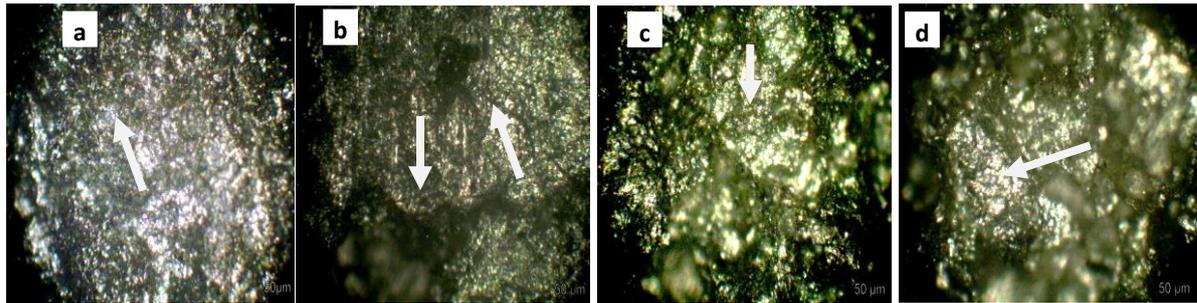
Green body tersebut kemudian dimasukkan ke dalam furnace untuk dipanaskan pada temperatur 200°C dengan waktu penahanan 60 menit agar terjadi penguapan *space holder* sehingga meninggalkan ruangan kosong atau pori-pori di dalam spesimen. Pemanasan kemudian dilanjutkan dengan menaikkan ke temperatur 650°C dan di tahan selama satu jam untuk sintering. Pada proses *sintering* ini terjadi ikatan antar partikel pada kondisi temperatur di bawah temperatur titik lebur. Pada peristiwa tersebut terjadi difusi atom antar permukaan butir serbuk sehingga butiran serbuk berikatan. Selanjutnya butiran mengalami *necking* dan diharapkan pada akhirnya batas dinding antar partikel akan hilang dan terjadi homogenisasi antar partikel sehingga ikatan antar butiran serbuk bertambah kuat. Setelah 60 menit temperatur diturunkan ke temperatur kamar secara perlahan-lahan. Spesimen hasil proses *sintering* dapat dilihat pada Gambar 3. Gambar 3.(a) menampilkan pandangan tampak atas dimana tidak teramati perbedaan yang nyata

dengan green body namun cenderung lebih kasar. Pada gambar 3.(b) terlihat adanya porositas di dinding spesimen akibat adanya ruang kosong yang diakibatkan oleh *space holder ammonium hydrogen carbonat* yang menguap (tanda panah). Dari ke empat spesimen menunjukkan kecenderungan peningkatan jumlah pori-pori seiring dengan kenaikan fraksi massa *space holder*. Pori-pori di bagian bawah spesimen teramati lebih banyak di semua spesimen. Pada spesimen 20% dan 30% fraksi massa pori-pori terlihat jelas lebih banyak di bagian bawah, sedangkan pada fraksi massa lebih tinggi terlihat lebih terdistribusi merata.

Hal tersebut mengindikasikan bahwa pada waktu penguapan campuran serbuk *space holder* pada fraksi rendah lebih terdistribusi di bagian bawah kompaktor terutama. Selain itu juga proses kompaksi dengan satu arah (*one directional single end*) memudahkan pergeseran untuk konsolidasi butiran di bagian penekan



GAMBAR 3. Spesimen hasil sintering dengan variasi fraksi massa 20, 30, 40, 50%
(a) tampak atas, (b) tampak samping



GAMBAR 4. Pori-pori yang terbentuk pada spesimen dengan fraksi masa space holder (a) 20%, (b). 30%, (c) 40% dan (d) 50% (ukuran perbesaran 50x)

Pengamatan struktur mikro dilakukan pada bagian melintang untuk melihat morfologi pori-pori yang terbentuk. Hasil dari foto mikro setiap fraksi massa dapat dilihat pada Gambar 4.

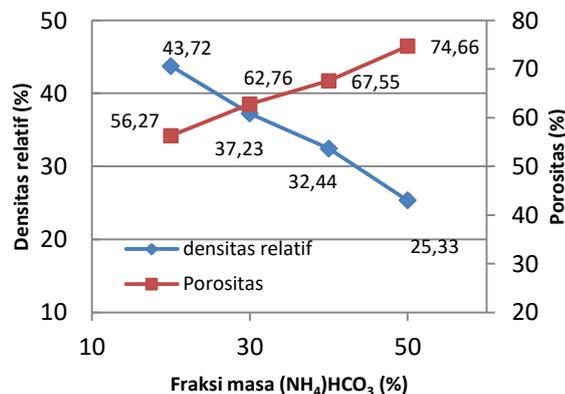
Pada gambar fraksi massa 20% (Gambar 4.a) teramati adanya pori-pori yang terpisah satu sama lain dan tidak terlihat jelas adanya hubungan antar pori-pori. Pada fraksi massa *space holder* yang semakin meningkat pori-pori teramati semakin besar dan lebih terkoneksi satu sama lain (Gambar 4.b-d). Semua fraksi massa menunjukkan bahwa permukaan pori-pori terlihat kasar dan tidak teratur diduga karena pori-pori terbentuk dari *space holder aggregate* dengan permukaan yang tidak teratur. Selain itu

juga adanya disolusi yang tidak sempurna antar butir serbuk aluminium pada waktu sintering akan meninggalkan profil permukaan yang kasar. Sedangkan jalur interkoneksi pori-pori dapat dimungkinkan karena *space holder aggregate* yang saling tersambung atau merupakan jalur pelepasan gas/penguapan dari *space holder* pada waktu pemanasan dimana matrik aluminium sedang mengalami pelemahan *creep* pada suhu tinggi.

Untuk mengukur densitas, densitas relatif dan porositas dari specimen dilakukan pengukuran dimensi dan massa. Hasil pengukuran dipergunakan dalam kalkulasi dengan persamaan (1) dan (2), dan hasilnya ditampilkan oleh Tabel 2 dan Gambar 5.

TABEL 2. Tabel densitas dan porositas *aluminium foam*

Fraksi massa ((NH ₄)HCO ₃) (%)	Densitas (kg/m ³)	Relative density (%)	Porosity (%)
20	1,19	43,72	56,27
30	1,01	37,23	62,76
40	0,88	32,44	67,55
50	0,69	25,33	74,66



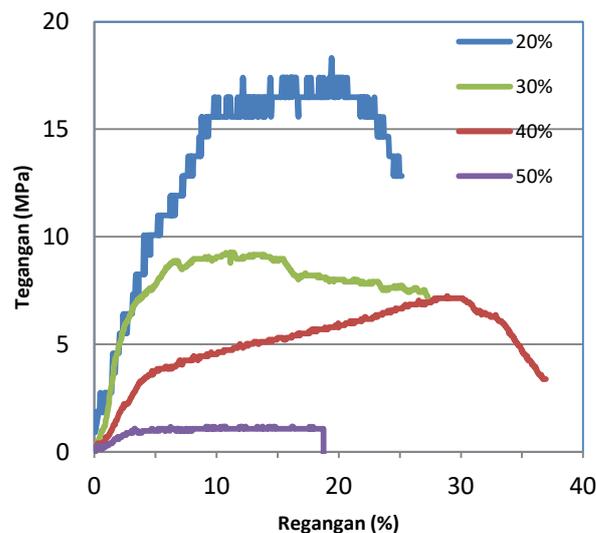
GAMBAR 5. Hubungan fraksi massa ammonium hidrogen karbonat dengan densitas relatif dan porositas

Gambar 5 memperlihatkan hubungan antara fraksi massa NH_4HCO_3 dengan *densitas relative* dan *porositas*. Pada grafik tersebut menunjukkan penambahan NH_4HCO_3 paduan yang terkandung dalam *green compact* akan menurunkan nilai *relative density* fraksi massa uji. Nilai *relative density* tertinggi sebesar 43,72% yang diperoleh pada fraksi massa 20%, sedangkan *relative density* terendah sebesar 25,33% yang diperoleh pada fraksi massa 50%. Pori-pori terdiri dari dua macam yaitu pori-pori makro yang terbentuk dari ruang kosong yang ditinggalkan oleh *space holder* dan pori-pori mikro akibat adanya dissolusi tidak sempurna antar butir. Pori-pori mikro ini sangat sulit dihilangkan dengan sintering tanpa penekanan, sehingga porositas awal sudah terbentuk tanpa adanya *space holder*. Besar penambahan % fraksi sebanding dengan penambahan porositas namun nilai perubahan porositas lebih rendah dibanding nilai penambahan fraksi massa *space holder*. Hal ini diduga disebabkan adanya penyusutan dimensi dari *space holder* akibat proses penekanan sebelum sintering. Porositas yang diperoleh masih sedikit lebih rendah dari nilai yang dicapai dari penelitian sejenis namun dengan *space holder* yang berbeda (Nugroho, 2015). Namun dibutuhkan fraksi massa (NH_4HCO_3) yang lebih besar untuk mendapatkan porositas yang sama.

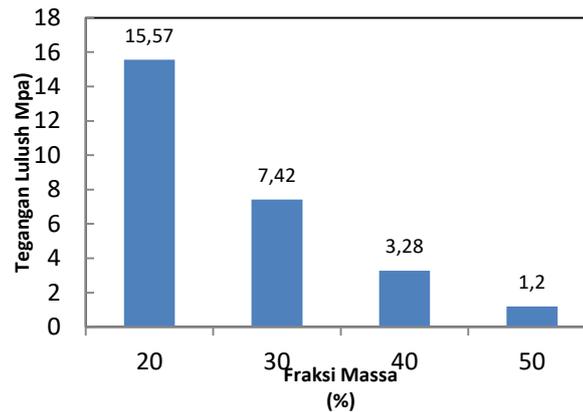
Pengujian tekan dilakukan untuk melihat sifat tekan dari aluminium porous ini. Hasil pengujian diagram tegangan-regangan ditunjukkan oleh Gambar 6.

Umumnya, material logam berpori mempunyai tiga daerah utama yaitu elastis, plateau dan daerah pemadatan (solidifikasi). Daerah pemadatan ditunjukkan dengan semakin kecilnya regangan yang terjadi dengan adanya peningkatan tegangan. Dari Gambar 6 terlihat bahwa diagram tegangan regangan dari aluminium berpori ini tidak menunjukkan perilaku material berpori, walaupun masih terlihat adanya daerah plateau pada hampir semua fraksi massa *space holder*. Daerah pemadatan tidak terlihat pada specimen di semua fraksi massa, namun terjadi keruntuhan material. Sedangkan daerah plateau terlihat membesar seiring dengan peningkatan fraksi massa sampai 40% dan mengecil pada fraksi massa 50% karena ikatan antar butir pada fraksi tersebut terlalu lemah. Daerah plateau menunjukkan adanya deformasi dinding pori-pori sehingga menyatu searah dengan arah penekanan. Semakin tinggi porositas daerah plateau akan semakin panjang apabila ikatan butir serbuk akibat sintering terjadi dengan sempurna.

Pada fraksi massa rendah (20%) kekuatan terlihat paling tinggi karena pada fraksi massa tersebut mempunyai porositas paling kecil sehingga beban ditopang oleh lebih besar matrik aluminium dan sebaliknya. Dengan bertambahnya fraksi massa kekuatan semakin menurun seperti ditunjukkan pada gambar 7 dan penurunan tajam terjadi pada porositas 30%



GAMBAR 6. Diagram tegangan regangan dari aluminium berpori pada berbagai fraksi massa *space holder*.



GAMBAR 7. Kuat tekan aluminium berpori pada berbagai fraksi massa

Kuat tekan dari aluminium berpori ini tidak berbeda jauh dari hasil penelitian aluminium berpori dengan *space holder* lainnya (Nugroho, 2015). Hal ini mengindikasikan bahwa bahan *space holder* diduga berpengaruh pada proses difusi antar butir serbuk aluminium. *Space holder* ini diduga membuat proses difusi pada waktu sintering berjalan tidak sempurna. Hal ini diperkuat oleh grafik tegangan-regangan yang tidak menunjukkan adanya daerah pematatan.

Gambar 8 menunjukkan bentuk kerusakan dari specimen setelah mengalami pengujian kuat

tekan. Hasil pengamatan kerusakan akibat pengujian tekan menunjukkan adanya kerusakan runtuhnya pori-pori pada daerah plateau yang ditunjukkan adanya bagian pemendekan specimen yang dilanjutkan terjadinya kerusakan berupa bagian bawah yang hancur akibat ketidak sempurnaan difusi (Gambar 8.a). Pada fraksi massa yang lebih tinggi specimen mengalami kerusakan rapuh sehingga hasil kerusakan berbentuk debris (Gambar 8.b). Hal ini mendukung pernyataan bahwa difusi pada waktu sintering tidak sempurna.



GAMBAR 8 Bentuk kerusakan hasil pengujian tekan pada spesimen dengan fraksi massa *space holder* (a) 40% dan (b) 50%.

KESIMPULAN

Aluminium berpori telah berhasil dibuat dengan metode metalurgi serbuk dengan space holder ((NH₄)HCO₃) dengan fraksi massa 20%, 30%, 40% dan 50%. Porositas meningkat seiring dengan bertambahnya fraksi massa space holder. Porositas 74% dapat dicapai pada fraksi massa 50%. Aluminium berpori mempunyai kekuatan rendah berkisar 1.2-15.7 MPa dan sangat rapuh pada porositas tinggi. Pada tahap ini fabrikasi aluminium berpori dengan space holder ini masih memerlukan penelitian lebih lanjut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis dapat menuliskan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penelitian yang dipublikasikan dalam jurnal ini.

DAFTAR PUSTAKA

- 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., 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.
- Hoblfeld, 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.
- Kwok, P. J., Oppenheimer, S. M. & Dunand, D. C. (2008). Porous Titanium by electrochemical Dissolution of Steel Spaceholders. *Advanced engineering materials*, 10, 820-825.
- Lu, T., Stone, H. & Ashby, M. (1998). Heat transfer in open-cell metal foams. *Acta materialia*, 46, 3619-3635.
- Nansaarng, S. & Sopha, S. (2008). 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., 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.
- Nugroho, A. W. (2012). Fabrikasi Aluminium 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. (2015). Morfologi dan Kuat Tekan Aluminium Berpori yang Diproduksi dengan Teknik Metalurgi Serbuk Menggunakan Urea sebagai Space Holder, Prosiding Simposium Nasional Teknologi Terapan (SNTT) 3, Makasar
- 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.
- Rausch, G., Stöbener, K. and Bassan, D. , (2005), Improving Structural Crashworthiness Using Metallic Foams. In Nakajima, H. and Kanetake, N., eds. *Porous Metals and Metal Foaming Technology*, pp. 1-4 (The Japan Institute of Metals, Tokyo).
- Sertkaya, A., Altımsık, 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*.
- 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.
-
- PENULIS:
- Aris Widyo Nugroho
 Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik,
 Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, D.I.
 Yogyakarta
 Email: ariswidyo.nugroho@umy.ac.id
- Iswanto
 Alumni Program Studi Teknik Mesin, Fakultas
 Teknik, Universitas Muhammadiyah,
 Yogyakarta, D.I. Yogyakarta
 Rekayasa Material, Laboratorium Ilmu Bahan.