

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 $<100 \mu\text{m}$.

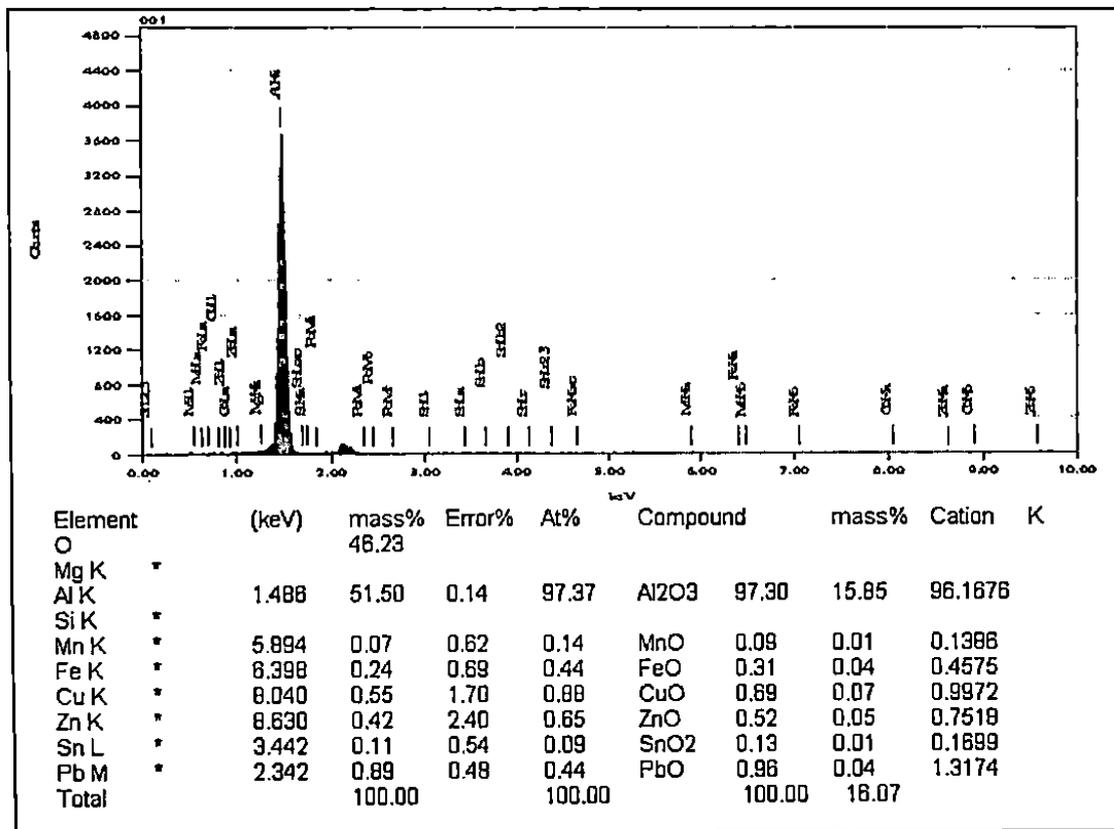


Gambar 0.1 Bentuk dan ukuran dari serbuk aluminium yang digunakan (a), dengan perbesaran yang lebih tinggi (b)

Selanjutnya dilakukan pengujian dengan *Energy Dispersive X-Ray Analysis* (EDX) untuk mengetahui gambaran komposisi serbuk aluminium dengan lebih

..... EDX energi

spektrum unsur-unsur yang terkandung dalam serbuk alumunium. 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 alumunium 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

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

..... 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

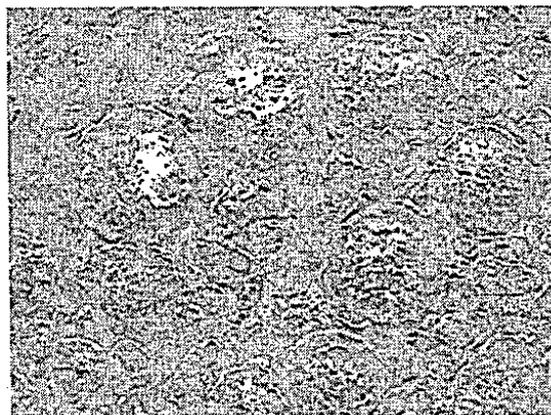
Pengaruh dari kandungan *space holder* urea pada serbuk aluminium terhadap sifat-sifat fisik dari green body juga diteliti dan hasilnya menunjukkan bahwa densitas dari green body menurun sebesar 30% (dari 90%-60%) dengan naiknya fraksi massa dari *space holder* urea menjadi 33% .

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*

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

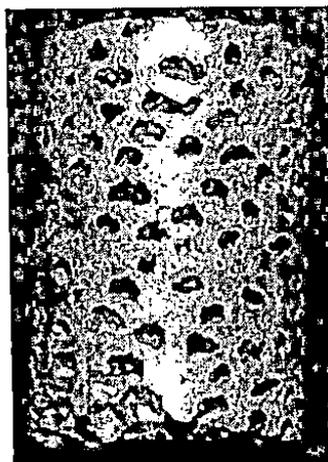
..... di dalam fasa padat

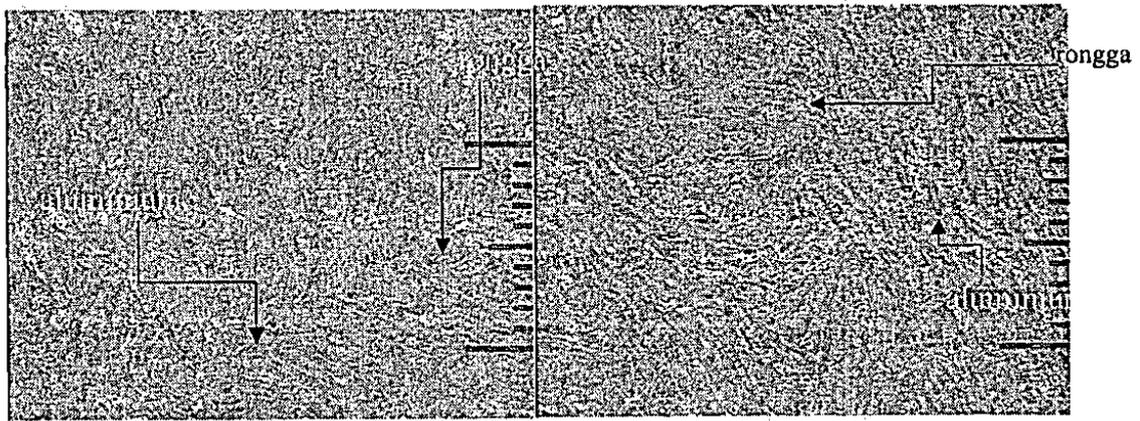
dan juga temperatur dan waktu tahan sinter yang tinggi. Akibat dari *swelling* ini akan membentuk pori di bagian dalam specimen sehingga densitas menurun. Cara untuk mencegah terjadinya *swelling* adalah dengan menggunakan ukuran serbuk yang homogen dan temperatur sinter lebih rendah yaitu pada *solid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

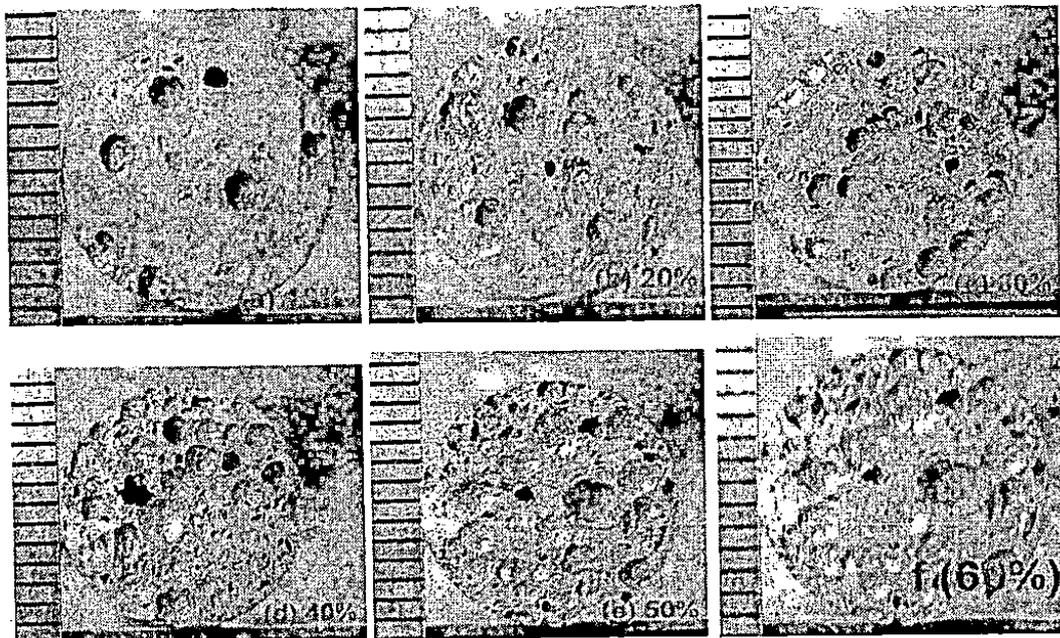
Setelah proses sintering maka spesimen kemudian didinginkan di dalam *furnace* sampai dengan temperatur kamar kemudian dibersihkan dan seperti ditunjukkan oleh gambar 4.5 dan diukur dimensinya. Spesimen tanpa *space holder* juga diukur sebagai kontrol. Makro pori dari spesimen terlihat jelas menunjukkan 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.





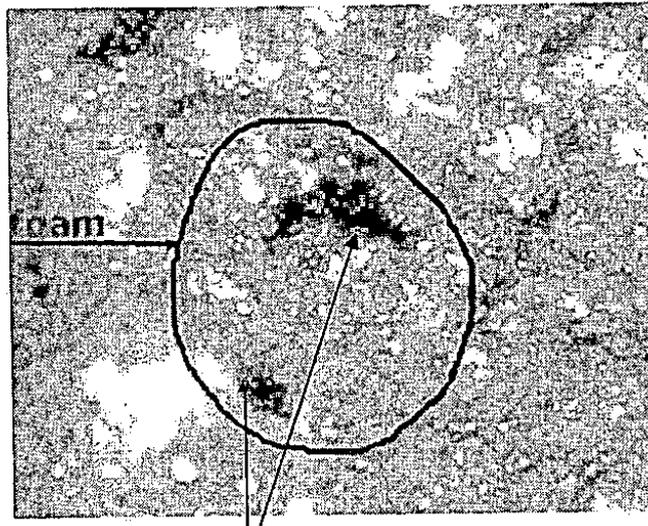
Gambar 0.7 Struktur mikro aluminium yang disinter di daerah tanpa *space holder*.

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

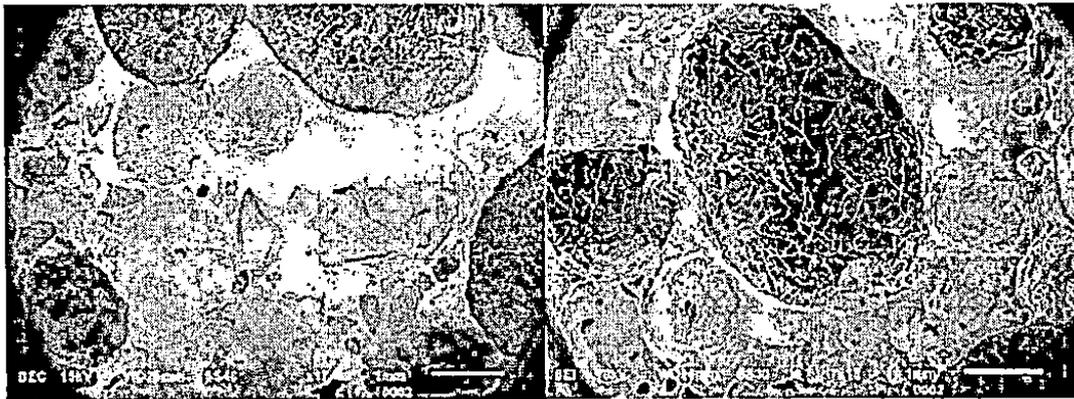
Lubang-lubang pori yang saling berhubungan juga terlihat pada poroistas yang tinggi dan menunjukkan kuantitas lebih banyak dan jelas (gambar 4.8(d-f)). Pori-pori makro yang menunjukkan bekas urea mengindikasikan aliran penyubliman urea selama pemanasan tahap pertama. Pada aluminium berpori yang berasal 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

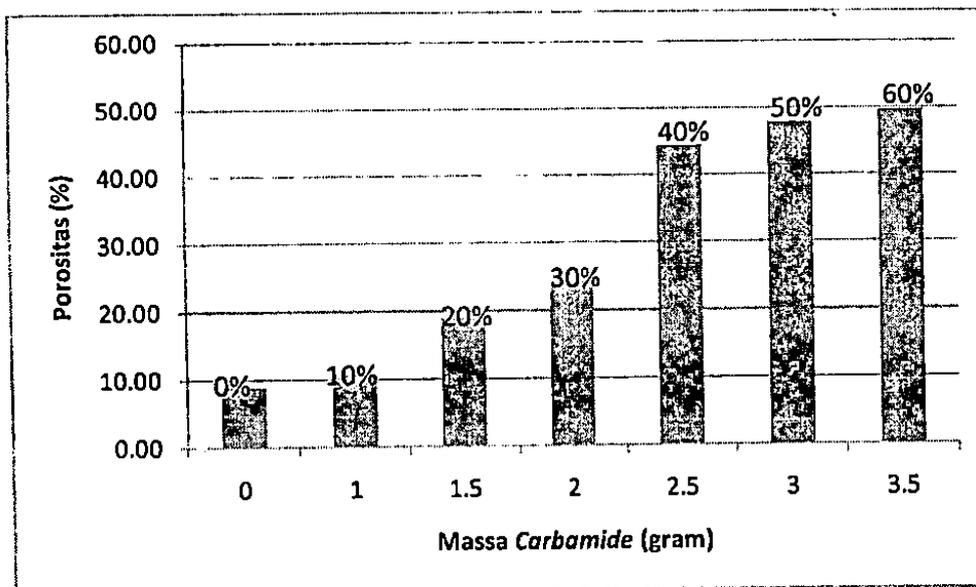


(a)

(b)

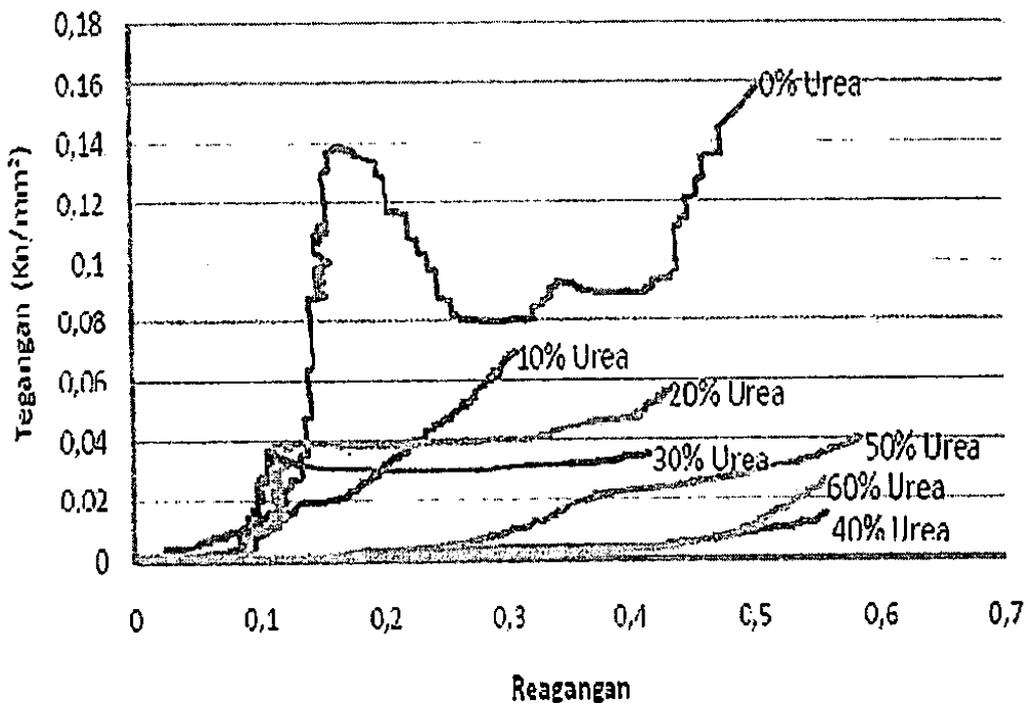
Gambar 0.10 Struktumakro dari aluminum foam dengan fraksi massa 60% urea H_2NCONH_2 diambil menggunakan SEM, (a) Gambar BSE-SEM , (b) Gambar SE-SEM

Porositas dari alumuniun 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 spesimen 40%, 50% dan 60% memiliki porositas yang meningkat lebih tinggi dari pada spesimen lainnya, hal ini dikarenakan bertambahnya massa urea di dalamnya, dan juga diakibatkan karena penumpukan urea pada spesimen.



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 .



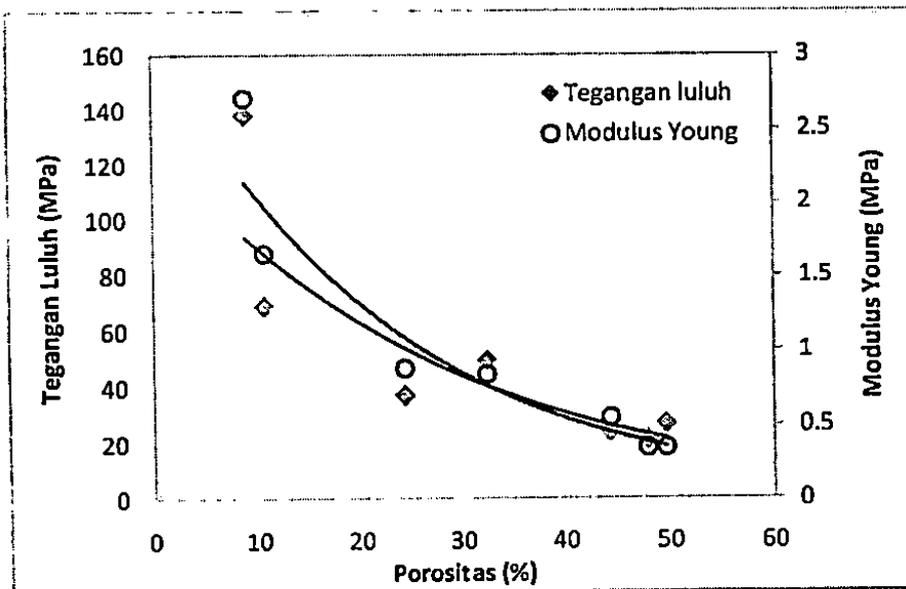
Gambar 0.12 Kurva tegangan-regangan dari alumnum dengan variasi porositas

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

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



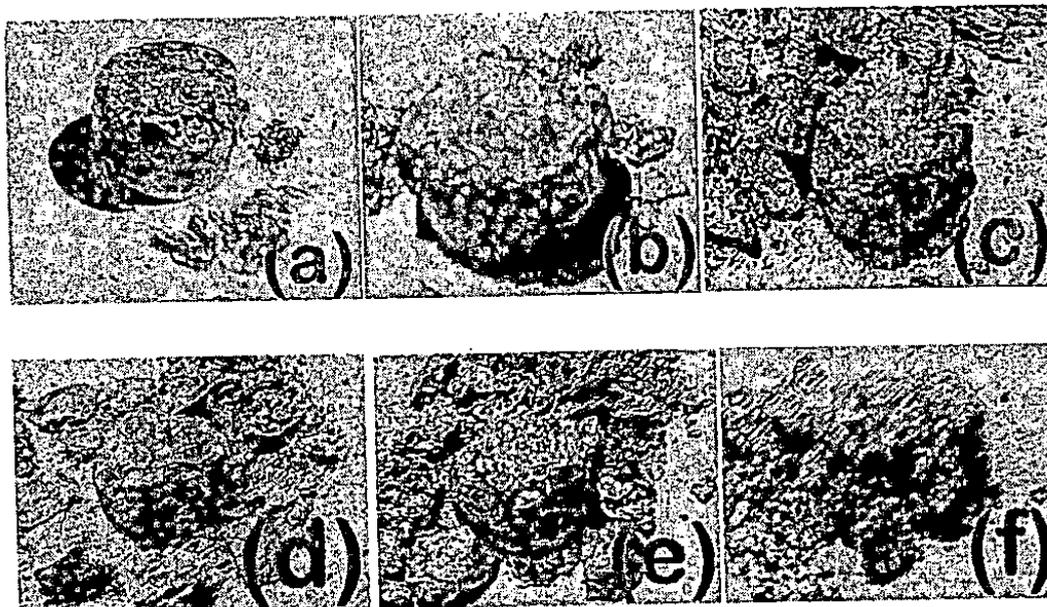
Gambar 4.13. Modulus Young terhadap porositas untuk

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 paramater 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.



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