

## KARAKTERIZASI FISIK BANTALAN LUNCUR DURALUMIN SERBUK PADA PROSES TEKAN ISOSTATIS PANAS<sup>1</sup>

Oleh;

Wahyono Suprapto<sup>2</sup>

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya

Jl. May.Jend. Haryono No. 167 Malang 65145

E-mail : [wahyos\\_metftub@yahoo.com](mailto:wahyos_metftub@yahoo.com)

Wahyos@ub.ac.id

### ABSTRAK

Kualitas produk manufaktur tidak hanya ditentukan dari masa pakai yang panjang karena kekuatan dan ketangguhannya tetapi faktor geometri (estetika) produk harus menjadi pertimbangan utamanya. Dan geometri produk merupakan aktualisasi proses penggerjaan logam yang harus dipertimbangkan. Fungsi geometri dalam pengembangan produk baru merupakan suatu kepekaan rancangan manufaktur untuk meningkatkan daya saing pasar. Sekarang metallurgy serbuk merupakan teknologi manufaktur yang kompetitif untuk optimalisasi bahan baku dan energi. Penelitian ini untuk kontrol kualitas dan pengembangan informasi karakteristik metallurgy serbuk.

Objek penelitian adalah bantalan luncur duralumin serbuk dengan proses satu dan dua kompeksi. Specimen dibuat dengan kombinasi tekan isostatik panas dari 1,4 k.bar sampai 2,1 k.bar. Parameter control adalah berat serbuk 50g, suhu 450°C, dan waktu stabilisasi 15 menit. Data pengamatan penelitian meliputi: bentuk, panjang, dan berat spesimen.

Hasil percobaan menyatakan bahwa bantalan luncur dengan satu dan dua kompaksi masing-masing menghasilkan karakteristik fisik sebagai berikut : faktor pengepakan 0,51 sampai 0,72 dan 0,52 sampai 0,73; berat jenis 2,15 sampai 2,45g/mm<sup>3</sup> dan 2,17 sampai 2,49g/mm<sup>3</sup>; pori-pori 11 sampai 23% dan 9 sampai 13%.

**Katakunci:**

Daur ulang, geometri, duralumin, isostatik, pengepakan, porositas

## PHYSICAL CHARACTERIZATION OF SLIDING BEARING OF POWDER DURALUMIN ON HOT ISOSTATIC PRESSING PROCESS

Manufacturing quality products are not only determined by the long life service because of strength and toughness properties but product geometry (aesthetics) factor should be the main consideration. And the geometry of the product is the actualization of metalworking processes that must be considered. The function of the geometry in the development of new products is a manufacturing design sensibility to increase market competitiveness. Now metallurgy powder is a competitive manufacturing technology for the optimization of raw materials and energy. This study to control product quality and develop information characteristics of powder metallurgy.

Research object is sliding bearings duralumin powder one and two compacting process. Preparation of specimens made by hot isostatic pressing and variations 1.4 k.bar up to 2.1 k.bar. Controlled process is powder 50g weight, temperature 450°C, and the stabilization time of 15 minutes. The research data obtained from observation of the specimen include: shape, length, and weight of the specimen.

The experimental results stating that sliding bearings with one and two respectively compaction produced the following physical characteristics: packing factor of 0.51 to 0.72 and 0.52 to

<sup>1</sup> Disajikan pada Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin ke-11 di FT-UGM

<sup>2</sup> Ketua Kelompok Dosen Konsentrasi Material Teknik, Jur. Teknik Mesin-FTUB

0.73; mass density of 2.15 to 2.49 g/mm<sup>3</sup> and 2.17 to 2.50 g/mm<sup>3</sup>; porosity of 11 to 23% and 9 to 13%.

**Keywords:**

Recycling, geometry, duralumin, isostatic, porosity, packing factor

## I. PENDAHULUAN

Dalam era industrialisasi, perbaikan kualitas produk termasuk produk-produk P/M terus dilakukan sebagai bentuk layanan yang optimal kepada konsumen. Selama ini riset (perguruan tinggi) yang terkait dengan kualitas produk hanya koncen pada sifat-sifat; fisik, mekanik, elektrik, dan lain-lain. Riset tersebut umumnya dilakukan secara parsial atau tidak terkait dengan geometri (bentuk dan ukuran) produk sehingga hasil-hasil riset sangat sulit diaplikasikan dalam industri. Hal tersebut dapat dipahami karena geometri produk umumnya mempunyai tingkat kesulitan dan biaya tinggi akan tetapi kalangan industri (UKM) sangat membutuhkannya. Oleh karena itu penelitian geometri produk bantalan luncur sebagai bentuk kepedulian peneliti terhadap UKM dalam menghadapi persaingan pasar. Pada kesempatan ini objek penelitian adalah pembuatan bantalan luncur dengan teknologi P/M yang mengaitkan sifat fisik terhadap geometri produk tersebut.

Banyaknya geram, terak, sirip, dan skrap merupakan bahan sisa (*waste*) dalam proses penggerjaan logam akan menurunkan efisisensi transformasi bahan. Teknologi metallurgi serbuk atau *powder metallurgy* (P/M) merupakan salah satu proses penggerjaan logam yang dapat meminimalis *waste* dan/atau menggunakan sebagai bahan baku. Akhir-akhir ini dikembangkan P/M sebagai material logam berpori untuk aplikasi memperbesar momen kelembaman atau sebagai filter penyaring partikel padat dari cairan, seperti ; minyak, bensin, pendingin, polimer cair dan udara atau gas lainnya. Bentuk filter yang khas tersebut dapat diproduksi dari serbuk ini termasuk cakram, mangkuk, ring, lembaran, dan tabung. Keuntungan utama dari filter berpori meliputi ketahanan pada suhu tinggi, kekuatan mekanik yang baik, tahan korosi, dan umur pakai (*service life*) yang panjang. P/M juga dapat digunakan untuk perangkat kontrol aliran, aplikasi distribusi dan lain-lain. Dengan kata lain proses P/M mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan proses penggerjaan logam yang lain (*cutting, casting, forging, dan welding*) dalam mengoptimalkan bahan baku dan mempersingkat waktu produksi.

Bantalan luncur (*bushing*) merupakan batang silindris berongga yang banyak digunakan untuk menutupi poros (*shaft*) dalam kecepatan putar rendah atau tinggi dengan beban besar. Dibandingkan bantalan gelinding (*ball bearing*) bantalan luncur lebih unik karena dapat digunakan untuk *shaft* berliku (*cam shaft*) dengan diameter lubang yang bervariasi. Bantalan luncur umumnya dibuat dari logam tuang (abbit, brass, brons dll) yang dibubut sesuai dengan ukuran yang dibutuhkan. Kontak permukaan antara poros dan bantalan luncur berupa bidang, sehingga bidang kontak tersebut sering menimbulkan pengelasan. Untuk mengurangi koefisien gesek, panas, dan suara-suara berisik pada bantalan luncur tersebut diberi pelumasan (tetes, benam, *grease*). Berbeda dengan bantalan luncur P/M yang mampu melumasi sendiri (*self lubricating*) melalui proses impregnasi karena P/M dapat membentuk material berpori dalam skala mikro (*micro-porous*). Akhir-akhir ini mulai dikembangkan teknologi pembuatan material berpori untuk meningkatkan momen inersia kelembaman (I) batang untuk meningkatkan nilai kekakuan material dalam bidang konstruksi. Umumnya material berpori mempunyai kekuatan yang rendah tetapi masalah ini dapat diatasi (kompromi) antara fasa yang terbentuk dan faktor pengepakan P/M tersebut.

Secara konvensional pembuatan P/M dilakukan dengan urutan proses penggerjaan sebagai berikut; mempersiapkan bahan-bahan serbuk logam, mencampur (*blinding and mixing*) serbuk sehingga diperoleh campuran yang homogen (fisik atau dimensi dan kimia),

mengepres (*compacting*) serbuk dalam cetakan sesuai bentuk yang diinginkan, memanggang (*sintering*) dari P/M mentah (*green compact*) menjadi produk P/M (*red*), dan memberikan perlakuan khusus (jika diperlukan). Lintasan proses yang panjang, waktu pengerajan yang lama, dan kemungkinan terjadi perubahan bentuk (distorsi) pada proses sinter merupakan kelemahan atau kekurangan dalam pembuatan produk P/M. Terjadinya reaksi metalurgi (perubahan fasa dan senyawa) dalam proses *sintering* sering menyebabkan distorsi pada produk P/M sehingga geometri produk berubah (*uncontrollable*). Pada penelitian ini proses *compacting* dan *sintering* dilakukan secara serempak didalam cetakan untuk mempersingkat waktu produksi dan mengontrol proses aglomerasi sehingga distorsinya dapat dikurangi. Dari latar belakang di atas, teridentifikasi bahwa kontrol proses *compacting* dan *sintering* parameter yang potensial untuk memperbaiki kualitas produk P/M.

## II. METODE PENELITIAN

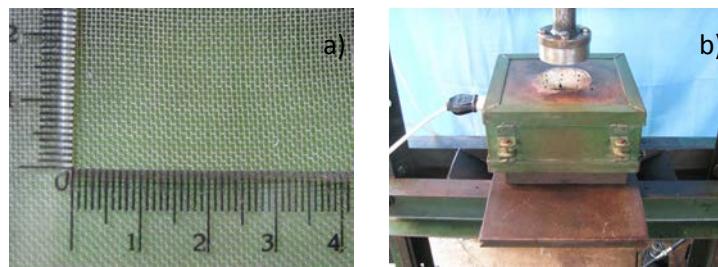
### 2.1. Prosedur Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan menguji komposisi kimia ingot duralumin (*as-cast*) dengan *optical emission spectrometer* (OES) dan hasil uji komposisi tersebut seperti dalam Tabel 1. Menghitung berat jenis *as-cast* duralumin dengan metode kesetimbangan unsur seperti pers. 1. Hasil perhitungan berat jenis *as-cast* duralumin ( $\gamma_{dural}$ ) merupakan berat jenis duralumin (bahan spesimen) dengan porositas nol.  $\gamma_{dural}$  digunakan untuk menghitung porositas specimen P/M seperti dalam pers. 2. Mempersiapkan serbuk duralumin dengan cara mekanik (dibubut dan geramnya ditumbuk), dan hasil tumbukan serbuk duralumin diayak (*seizing*) dengan mesh ayakan 45 (Gb. 1a). Selanjutnya menimbang serbuk duralumin [50g] dan memasukan kedalam cetakan (*die-punch*) bantalan luncur yang di *preheating* [ $300^{\circ}\text{C}$ ], memanasi (*heating*) cetakan sampai suhu yang direncanakan [ $450^{\circ}\text{C}$ ], dan turunkan *punch* sehingga serbuk dalam cetakan tertekan dan jarum manometer menunjukkan angka nol. Unit cetakan dan *electric turnace* seperti terlihat dalam Gb. 1b, mengukur tinggi serbuk dalam cetakan (Tabel 2).

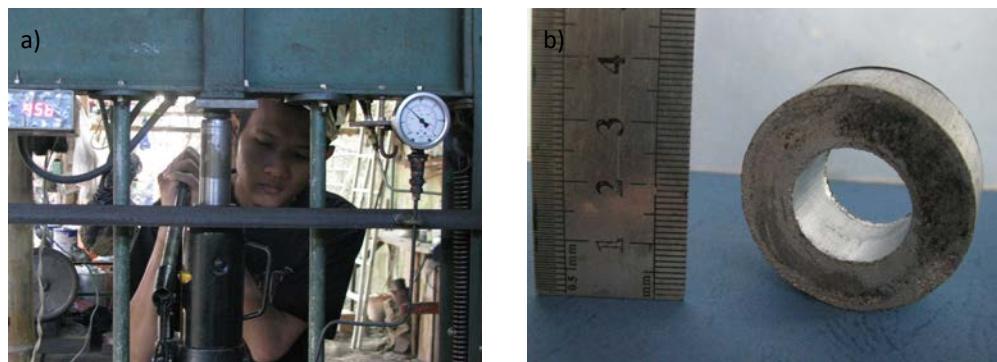
Pada proses kompaksi satu arah dilakukan dengan melakukan pengepresan pada tekanan konstan (*hot isostatic pressing process* biasa disebut HIP<sub>process</sub>) sesuai dengan parameter proses yang direncanakan [1,4 k.bar sampai 2,1 k.bar], temperatur *compacting*  $450^{\circ}\text{C}$ , dan waktu *heating* 15 menit (stabilisasi). Gb. 2a, menunjukkan indikator parameter proses (tekanan dan temperatur) dalam pembuatan P/M dalam percobaan. Mengeluarkan *red compact* (bantalan luncur atau spesimen) dari cetakan, mengukur tinggi (jangka sorong) spesimen seperti dalam Tabel 2, menimbang berat spesimen (*mass balance*) di udara dan dalam air (dalam Tabel 1). Geometri bantalan luncur seperti dalam Gb. 2b.

Pada proses kompaksi dua arah dilakukan dengan skenario sebagai berikut; setelah kompaksi pertama selesai dan *punch* diangkat, selanjutnya cetakan beserta isinya (*bushing*) di balik arahnya (bagian atas menjadi bagian bawah) dan kompaksi kedua dilakukan dengan besar tekanan HIP yang sama. Langkah selanjutnya sama dengan satu arah kompaksi yaitu mengeluarkan *red compact* (bantalan luncur atau spesimen) dari cetakan, mengukur tinggi (jangka sorong) spesimen, menimbang berat spesimen (*mass balance*) di udara dan dalam air seperti dalam Tabel 2.

Penelitian ini dilanjutkan dengan mengoperasikan pers. 2, pers. 3, dan pers. 4 dengan input data Tabel 2. Dari operasi persamaan tersebut masing-masing menghasilkan nilai faktor pengepakan (FP), berat jenis (*mass density =  $\gamma$* ), porositas (P). Selanjutnya nilai FP,  $\gamma$ , P dimasukan dalam Tabel 3 sesuai dengan kolom dan barisnya. Hasil akhir pengolahan data dari penelitian ini dapat dilihat dalam Gb. 4.



**Gambar 1.** Alat utama dalam proses pembuatan P/M  
a). Saringan mesh 45. b). Kombinasi tekan-panas (*hot pressing*)



**Gambar 2.** Kontrol proses dan produk P/M  
a). Temperatur dan tekanan proses dalam percobaan. b). bantalan luncur P/M

## 2.2. Rancangan Penelitian

Dalam penelitian ini diambil suatu data hubungan logis akibat penyebab yang sama (*common-cause factor relationship*) dari dua variabel yang saling mempengaruhi yaitu penekanan (*compacting*) terhadap tinggi atau berat specimen (Tabel 2). Data variabel terikat pada Tabel 2 diperoleh dari pengukuran langsung dan pada Table 3 diperoleh dari hasil perhitungan (data diskrit). Pengambilan data dalam penelitian seperti dalam Tabel 2.

**Tabel 2.** Data pengukuran langsung dari spesimen.

Penekanan [k.bar]	Tinggi Spesimen [mm]		Berat Spesimen [g]	
	Awal	Akhir	di Udara	dalam Air
1,400	$h_{O11}, h_{O12}, h_{O13}$	$h_{f11}, h_{f12}, h_{f13}$	$W_{a11}, W_{a12}, W_{a13}$	$W_{w11}, W_{w12}, W_{w13}$
1,575	$h_{O21}, h_{O22}, h_{O23}$	$h_{f21}, h_{f22}, h_{f23}$	$W_{a21}, W_{a22}, W_{a23}$	$W_{w21}, W_{w22}, W_{w23}$
1,750	$h_{O31}, h_{O32}, h_{O33}$	$h_{f31}, h_{f32}, h_{f33}$	$W_{a31}, W_{a32}, W_{a33}$	$W_{w31}, W_{w32}, W_{w33}$
1,925	$h_{O41}, h_{O42}, h_{O43}$	$h_{f41}, h_{f42}, h_{f43}$	$W_{a41}, W_{a42}, W_{a43}$	$W_{w41}, W_{w42}, W_{w43}$
2,100	$h_{O51}, h_{O52}, h_{O53}$	$h_{f51}, h_{f52}, h_{f53}$	$W_{a51}, W_{a52}, W_{a53}$	$W_{w51}, W_{w52}, W_{w53}$

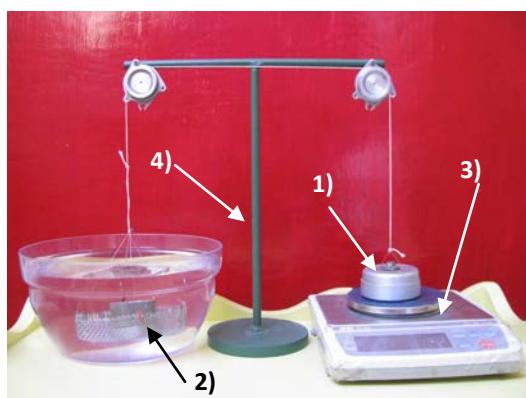
**Tabel 3.** Data penelitian hasil perhitungan

Parameter Proses	Spesifikasi P/M		
	Faktor Pengepakan	Berat jenis [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	Porositas [%]
1,400	$FP_{11}, FP_{12}, FP_{13}$	$\gamma_{11}, \gamma_{12}, \gamma_{13}$	$P_{11}, P_{12}, P_{13}$

1,575	$FP_{21}, FP_{22}, FP_{23}$	$\gamma_{21}, \gamma_{22}, \gamma_{23}$	$P_{21}, P_{22}, P_{23}$
1,750	$FP_{31}, FP_{32}, FP_{33}$	$\gamma_{31}, \gamma_{32}, \gamma_{33}$	$P_{31}, P_{32}, P_{33}$
1,925	$FP_{41}, FP_{42}, FP_{43}$	$\gamma_{41}, \gamma_{42}, \gamma_{43}$	$P_{41}, P_{42}, P_{43}$
2,100	$FP_{51}, FP_{52}, FP_{53}$	$\gamma_{51}, \gamma_{52}, \gamma_{53}$	$P_{51}, P_{52}, P_{53}$

### 2.3. Alat Penelitian

- Timbangan berat digital (*mass balance*) skala centi-gram (0,00 g) untuk menimbang berat; serbuk duralumin dan produk P/M.
- Mesin press hidraulik kapasitas 10 metrik Ton untuk proses penekanan (*compacting*) serbuk duralumin dalam cetakan bantalan luncur.
- Mistar/jangka sorong digunakan untuk mengukur batang fluiditas duralumin.
- Tungku elektrik daya 3 kWatt untuk memanaskan cetakan selama proses *compacting*.
- Unit Picnometer terdiri dari; 1). master berat [230 g], 2). keranjang (*bucket*) yang dihubungkan dengan senar (*wire rope*) ke master berat sehingga dengan analisa kesetimbangan berat specimen dalam air dapat dihitung (diketahui), 3). timbangan digital, 4). batang kesetimbangan, Wahyono dkk (2011)<sup>[1]</sup>. Unit Picnometer tersebut dapat dilihat dalam Gb. 3.



Gambar 3. Unit Picnometer

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Image Produk *Bushing P/M*

Noktah hitam pada permukaan datar (Gb. 2b) merupakan grafit yang tertinggal (secara fisik) dipermukaan. Noktah grafit tersebut tidak mempengaruhi sifat P/M baik *physical (luminous, strength)* dan *metallurgical* karena dapat dihilangkan dengan bensin, minyak, dan/atau alkohol. Grafit tersebut dioleskan dalam rongga cetakan (permukaan) untuk mengurangi gesekan dan ikatan adhesi P/M. Tampak permukaan datar dan sirkumferensial bantalan luncur berwarna keperakan hal ini menunjukkan terjadi ikatan metalik. Produksi P/M dengan parameter proses yang direncanakan (Tabel 2) memenuhi geometris bantalan luncur (permukaan halus, warna metalik, dan dimensi seperti; diameter, tebal, panjang).

Analisa kimia dalam %berat unsur dalam *as-cast* diukur dengan OES dan unsur dengan berat <0.01 tidak ditampilkan dalam Tabel 1. Hasil percobaan hubungan parameter proses (temperatur dan waktu *holding* konstan, dan tekanan yang bervariasi) pada pembuatan bantalan luncur dengan HIP process seperti ditunjukkan dalam Gb. 4.

Tabel 1. Kandungan unsur duralumin

Duralumin	Persentase berat unsur [%]	Theoretical
-----------	----------------------------	-------------

[wt%Cu]	Cu*	Mn	Si*	Mg*	Zn	Fe*	Sn	Al*	mass density [g.cm <sup>-3</sup> ]
	<b>2.55</b>	<b>8.38</b>	<b>7.20</b>	<b>2.52</b>	<b>1.59</b>	<b>7.14</b>	<b>7.26</b>	<b>7.17</b>	
94.5Al5.5Cu	5.27	0.05	0.33	0.13	0.09	0.45	0.03	Res	2.88

Sumber: 1). Technical Toolkit, ALLOYING ELEMENT characteristics, www.metallurg.com

2). John Campbell from Wray (bold numbers \*)

### 3.2. Berat Jenis P/M

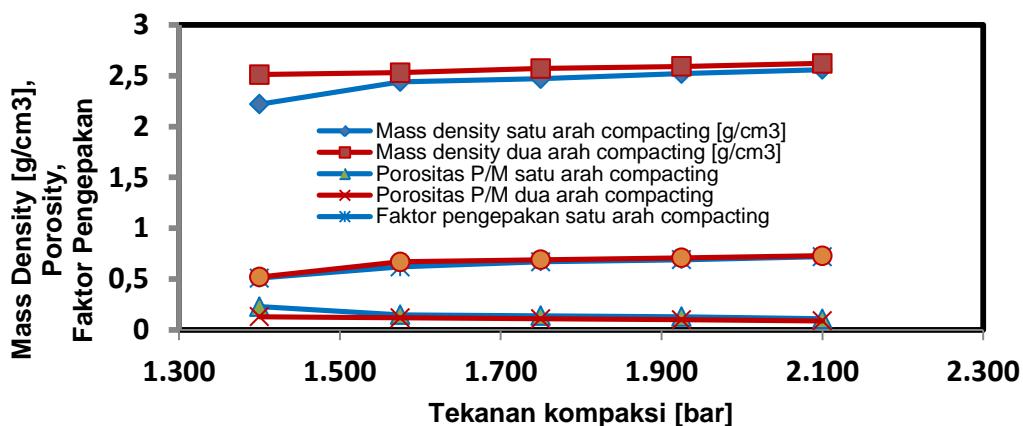
Pada prinsipnya berat jenis massa padat ( $\gamma$ ) diukur dengan cara membandingkan massa terhadap volume. Pengukuran  $\gamma$  dengan prinsip tersebut mempunyai keterbatasan (bentuk), pada penelitian ini pengukuran  $\gamma$  dikembangkan dengan; *rule of mixture* dan daya apung massa berpori dalam fluida cair. Oleh karena itu  $\gamma$  diperoleh dari jumlah perkalian fraksi dan berat unsur dan  $\gamma$  yang dihitung menunjukkan berat jenis tanpa pori (teoritis) secara

$$\text{matematis berat jenis tersebut dirumuskan; } \gamma_T = \frac{\sum \%u \times \gamma_u}{100} \quad (1)$$

Dan pori-pori material *subsurface* dapat diketahui/dihitung dengan prinsip gaya apung. Material berpori (tinggi) mengakibatkan gaya apungnya (tinggi) dibandingkan material tidak berpori dan sebaliknya, akibatnya berat jenis material tersebut menjadi rendah. Robert (1998)<sup>[2]</sup> dalam penelitiannya, secara praktis berat jenis material (produk P/M) dapat diketahui dari kehilangan berat massa akibat gaya apung dengan Picnometer dan berat jenis

$$\text{P/M } (\gamma_{\text{aktual}}) \text{ mengikuti pers; } \gamma_{\text{aktual}} = \frac{W_a}{W_a - (W_{sb} - W_b)} \times \gamma_w \quad (2)$$

yang mana  $\%u$ ,  $u$ ,  $W_a$ ,  $W_{sb}$ ,  $W_b$ ,  $\gamma_w$  masing-masing menunjukkan % unsur, berat jenis unsur, berat material di udara, berat *bucket* dalam air, berat material dalam air, dan berat jenis air.



Gambar 4. Grafik karakterisasi HIP<sub>Process</sub> P/M bantalan luncur duralumin

Gb. 4 merupakan fakta yang menunjukkan bertambahnya tekanan kompaksi meningkatkan  $\gamma_{\text{aktual}}$  dan berat jenis kompaksi dua arah lebih tinggi (2,17-2,5 g/cm<sup>3</sup>) dari kompaksi satu arah (2,15-2,49 g/cm<sup>3</sup>). Artinya dalam analisa statistik perubahan berat jenis pada kompaksi dua arah memberikan pengaruh yang lebih signifikan ( $R^2=0,989$ ) dari kompaksi satu arah (0,824). Dan kompaksi satu arah pada rentang 1,400 sampai 1,575 k.bar memberikan nilai kenaikan berat jenis lebih tinggi dibandingkan dengan tekanan yang lebih tinggi. Hal ini terkait dengan resistensi (gaya gesek) partikel serbuk, pada kompaksi tekanan rendah tidak semua gaya tekan dapat melawan gaya resistensi partikel serbuk tersebut karena gaya tekan sebanding dengan ketebalan (kedalaman) cetakan sehingga kompaksi tekanan rendah menghasilkan P/M dengan berat jenis rendah.

Nilai berat jenis duralumin ( $\gamma$ ) teoritis (tanpa porositas) hasil penelitian Tabel 1. sebanding dengan nilai berat jenis duralumin yang digunakan oleh peneliti lain. Contoh, Suzuki dkk (2009)<sup>[3]</sup> dalam penelitiannya menentukan berat jenis Al-4.5Cu adalah  $2.8\text{g/cm}^3$ . Apabila berat jenis Al-4.5Cu hasil eksperimental dibandingkan dengan berat jenis aktual, berat jenis eksperimental  $0.01\text{g/cm}^3$  lebih kecil dari berat jenis aktual.

### 3.3. Faktor Kompaksi P/M

Faktor kompaksi (FK) merupakan perbandingan selisih tinggi (sebelum kompaksi ( $H_0$ ) dikurangi sesudah kompaksi ( $H_f$ )) dan sesudah kompaksi. Secara matematis FK dirumuskan seperti dalam pers. berikut;

$$FP = \frac{L_o - L_f}{L_f} \quad (3)$$

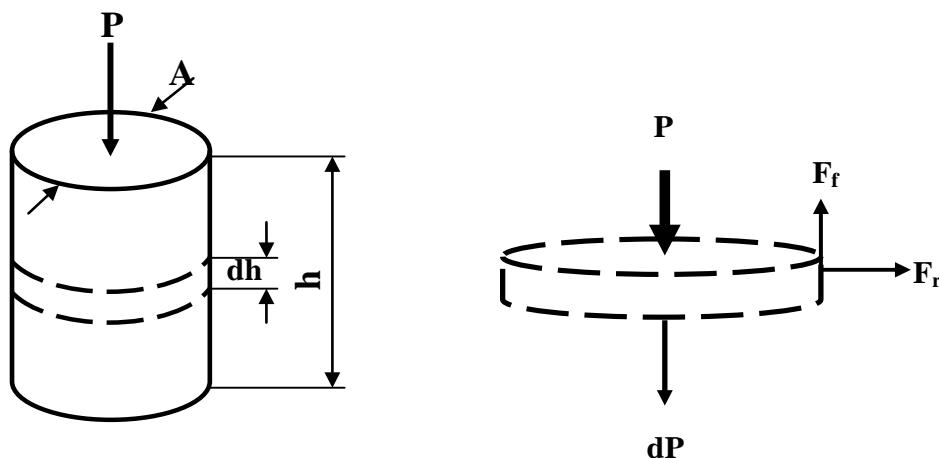
yang mana,  $L_o$  dan  $L_f$  masing-masing menunjukkan panjang awal dan  $L_f$  panjang akhir P/M. Untuk mengevaluasi peningkatan kepadatan kemasan serbuk dengan metode pematatan, dapat dilakukan percobaan dengan kotak berongga dan kemasan kepadatan ( $\rho_c$ ) dari serbuk *unsintered* yang mana rongga dalam P/M dihitung dengan pers;

$$\rho_c = \frac{m_f - m_t}{V_c \rho_t} \quad (4)$$

yang mana,  $m_f$ ,  $m_t$ ,  $V_c$  dan  $\rho_t$  masing-masing adalah massa kotak serbuk, massa kotak kosong, volume rongga dihitung dari pengukuran dimensi dalam dan berat jenis bahan bubuk. Faktor kompaksi menunjukkan berapa banyak serbuk yang dipadatkan, dan menjadi nol ketika pasokan kedalaman dan ketebalan lapisan menjadi sama. Toshiki (2009)<sup>[4]</sup> memperoleh faktor kepadatan dengan melakukan proses penggerolan serbuk sehingga terjadi perbedaan ketebalan sebelum dan sesudah proses, yang dirumuskan;

$$Fc = \frac{D_s}{D_l} - 1 \quad (5)$$

yang mana,  $D_s$  dan  $D_l$  masing-masing menunjukkan tebal awal dan tebal akhir.



**Gambar 5.** Distribusi gaya kompaksi arah aksial

Nilai FK dalam Gb. 4 menunjukkan tingkat kepadatan (densitas) yang mana semakin besar nilai FK maka densitas P/M semakin meningkat dan sebaliknya berkurangnya nilai FK maka densitas semakin menurun. Dalam proses kompaksi tekanan pada permukaan atas akan direaksi oleh permukaan bawah sama besarnya dengan permukaan bagian atas. Selanjutnya masing-masing gaya penekanan didistribusikan ke bagian dalam (arah aksial) secara berangsar (*gradual*) tekanannya turun dan pada kedalaman tertentu nilai tekanan menjadi nol karena adanya hambatan (gesekan) antar partikel serbuk dalam arah aksial dan radial (lateral), serbuk dengan dinding. Gaya-gaya pembentukan tersebut seperti diuraikan dalam Gb.5.

Kompaksi temperatur tinggi P/M adalah kombinasi proses pematatan dan sinter serbuk logam dalam sebuah rongga cetakan melalui penerapan tekanan dan suhu tinggi sehingga dihasilkan produk kompaksi matang (*red compacting*). Biasanya alat-alat penekan

dipegang dalam orientasi vertikal dalam *electric furnace*, setelah serbuk terbentuk kemudian produk dikeluarkan dari rongga cetakan. Berat jenis serbuk variatif tergantung pada tekanan kompaksi dan suhu sinter. umumnya tekanan kompaksi yang digunakan 1000 psi sampai 1.000.000 psi untuk material non logam dan 10 ton / in<sup>2</sup> sampai 50 ton/ in<sup>2</sup> digunakan untuk pemanatan serbuk logam. Identifikasi hambatan nano-lapisan perak meningkat secara signifikan untuk waktu annealing yang lebih lama. identifikasi kekerasan nano-perak meningkat 525-570 MPa dan tersebarnya data sedikit menurun dalam hal waktu anil yang lebih lama, yaitu kekompakan dari lapisan perak yang tercapai lebih baik, Buffat dan Borel (1976)<sup>[5]</sup>.

### 3.4. Porositas P/M

Terminologi adalah ruang kosong (rongga) diantara partikel-partikel serbuk dan porositas dapat dikontrol melalui; mesh partikel, tekanan *compacting*, temperatur sinter. Porositas atau kekosongan karena kombinasi kompaksi dan sinter dalam P/M (Al-Cu) yang terbentuk diantara partikel-partikel butir dalam penggumpalan terjadi *mushy* dititik kontak akan memperkecil rongga (porositas) secara kuantitas. Secara teoritis porositas merupakan interpretasi dari ke tiga faktor; kekuatan, densitas, dan pengepakan. Nilai porositas semakin rendah maka nilai ketiga faktor tersebut semakin tinggi dan sebaliknya seperti dalam Gb. 4. Serbuk didefinisikan sebagai padatan partikulat halus yang terpisah dan dalam teknologi P/M ukuran serbuk dinyatakan dengan mesh yang artinya luasan. Contoh serbuk mesh 200 adalah sama di kedua arah, dan jumlah total bukaan per inci persegi  $200^2 = 40.000$ . Porositas sering memicu keretakan yang menyebabkan terjadi konsentrasi tegangan dan kebocoran, akhirnya kualitas cor turun atau produk cor harus di daur ulang (*remelt*). Menurut Haizhi (2003)<sup>[6]</sup>, porositas dalam material solid tidak dapat menerima beban luar secara terus menerus dan yang lebih berbahaya apabila pori tersebut menyebabkan tegangan terpusat sehingga memicu retak mikro, selanjutnya retak mikro terus berkembang menjadi patah. Dan penyusutan yang terjadi diantara dua permukaan secara terpisah karena efek penyusutan saat solidifikasi disebut makro *shrinkage*. Potensi terjadi porositas pada material duralumin relatif tinggi dibanding paduan aluminium lain karena penyerapan hidrogen yang tinggi, pembentukkan seragasi dari pengotor, dan penyusutan yang tinggi (3,3 – 8,8%). Keterbatasan utama dalam pengecoran paduan aluminium adalah porositas yang terjadi waktu solidifikasi dan kontraksi. Menurut Metal (2010)<sup>[7]</sup> satu penyelesaian untuk menghilangkan porositas internal adalah *hot isostatic pressing*. Penambahan tembaga berakibat meningkatkan jumlah porositas dapat dipahami karena kelarutan hidrogen dalam tembaga lebih tinggi dibanding aluminium disamping itu penambahan tembaga meningkatkan temperatur duralumin *melt* sehingga hidrogen terlarut mengingkat.

Hasil tersebut sesuai dengan aturan kesetimbangan massa (KS) yang menyatakan berat jenis duralumin merupakan jumlah dari perkalian fraksi unsur dan berat unsur yang terkandung didalamnya. KS sering digunakan untuk memprediksi berbagai fenomena yang terjadi dalam ilmu material dan metalurgi, seperti memprediksi kekuatan berdasarkan struktur-struktur atau jenis bahan dalam material. Ukuran dan jumlah porositas dapat dikurangi oleh pengaruh laju penuangan yaitu laju penuangan yang tinggi menyebabkan porositas meningkat dan sebaliknya laju penuangan yang rendah mengurangi terjadinya porositas. Tetapi dalam percobaan pengecoran *hypo-eutectic* (0 sampai 4,5%Cu) ini porositas bertambah dari sekitar 10% sampai 16% basis MB dan sekitar 17% sampai 28% basis HIP. Tingginya nilai porositas basis HIP dikarenakan proses HIP tidak mampu menghilangkan porositas terbuka dipermukaan tuang. Porositas diindikasikan dengan berat jenis yang mana berat jenis casting product duralumin lebih rendah dari berat jenis teoritis seperti yang dinyatakan oleh Y.M. Li dan Li (2001)<sup>[8]</sup>, Taylor dan McClain (1998)<sup>[9]</sup>. Pada penelitian menghasilkan nilai porositas (Gb. 4) yang berbeda antara satu dan dua arah kompaksi, hal ini

disebabkan oleh beda berat jenis yang dihasilkan oleh satu kompaksi lebih rendah dan dua arah kompaksi lebih tinggi.

Sintering sangat penting dalam P/M karena berpengaruh pada komponen mikro, kepadatan, dan sifat mekanik. Pada tahap kompaksi dihasilkan struktur mikro dan sifat mekanik yang diperlukan. Beberapa kemajuan signifikan dalam proses P/M dengan tungku pemanas berkontribusi meningkatkan kualitas dan daya saing produk. Tungku pembakaran dengan berbagai zona pemanasan membutuhkan atmosfer khusus. Sintering dengan tungku *continuous furnace*, dimana *green product* dimasukan di satu ujung tungku dan terus berjalan dengan kecepatan tertentu sesuai profil temperatur dan berakhir di ujung yang lain. Tungku konvensional sabuk berjalan, kondisi distribusi idealnya terdiri dari N<sub>2</sub> 20% dalam zona pemanas mula, 60% N<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> suhu tinggi, dan N<sub>2</sub> 20% pendinginan. Namun, ada juga proses sinter yang dilakukan dalam *batch* seperti sintering *Hardmetal* (karbida) untuk alat potong (*cutting tool*) yang diproduksi dengan *powder injection molding* (PIM).

*Bulk viskositas* merupakan resistensi terhadap densifikasi sintering dan fungsi bahan, porositas, ukuran butir, dan suhu. Porositas terjadi karena ada perbedaan yang mendasar antara kompaksi dan *sintering* dan Garman (1996)<sup>[10]</sup> menyatakan tegangan sintering adalah kekuatan pendorong dari energi antarmuka pori-pori dan batas butir, dan tegangan sintering tergantung pada energi permukaan bahan, kepadatan, dan geometrisnya.

#### IV. KESIMPULAN

- Secara visual bantalan luncur (spesimen) yang diproduksi dengan teknologi P/M telah memenuhi kriteria geometri.
- Tekan isostatik panas P/M pada satu dan dua arah kompaksi menghasilkan perbedaan; berat jenis, faktor kompaksi dan porositas yang signifikan. Dan porositas P/M serbuk duralumin berkurang seiring dengan bertambahnya berat jenis dan faktor pengepakan.
- Variasi kompaksi pada tekan isostatik panas P/M dari 1.4 kbar – 2.1 kbar untuk satu arah dan dua arah masing-masing menghasilkan; faktor pengepakan bertambah 0,51 – 0,72 dan 0,52 – 0,73, berat jenis bertambah 2,15 – 2,45g/mm<sup>3</sup> dan 2,17 – 2,49g/mm<sup>3</sup>, pori-pori berkurang 23 – 11% dan 13 – 9%.

#### KEPUSTAKAAN

1. Wahyono S, B. Suharno, Johny WS, Dedi P, 2011, Analytical and Experimental Modeliasis of Porosity Formation of Duralumin Cast in Vacuum Casting System, Advanced Materials Research QIR 12, Trans Tech Publications, Vol. 277, pp. 76 – 83.
2. Robert P. Taylor, Stephen T. McClain, 1998, Uncertainty Analysis of Metal-Casting Porosity Measurements Using Archimedes Principle. Materials and Mechanics Laboratory. Department of Mechanical Engineering, Mississippi State University.
3. S.Suzuki, T-B Kim, H Nakajima, 2009, Fabrication of Al-Cu alloy with elongated pores by continuous casting technique, Journal of Physics: Conference Series 165, 012068 doi:10.1088/1742-6596/165/1/012068.
4. Toshiki NIINO and Kazuki SATO, 2009, Effect of Powder Compaction in Plastic Laser Sintering Fabrication, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Japan.
5. Buffat P. h. and Borel J.P, 1976, Size effect on the melting temperature of gold particles, Physics Review, Vol. A, 13, pp. 2287–2298.
6. Haizhi Ye, 2003, An Overview of the Development of Al-Si-Alloy Based Material for Engine Applications. JMEPEG 12:288-297, ©ASM International.
7. Metal Casting Design, Using HIP to Improve Aluminum Castings, Proceeding at the AFS International Conference on High Integrity Light Metal Castings, Oct. 31-Nov.1, 2005, Indianapolis, 2010.

8. Y.M. Li, R.D. Li, 2001, Effect of the Casting Process Variables on Microporosity and Mechanical Properties in an Invesment Cast Aluminum Alloy. Sciences and Technology of Advanced Materials 2, Elsevier.
9. Robert P. Taylor, Stephen T. McClain, 1998, Uncertainty Analysis of Metal-Casting Porosity Measurements Using Archimedes Principle. Materials and Mechanics Laboratory. Department of Mechanical Engineering, Mississippi State University.
10. R.M. German, Sintering Theory Practice, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1996.