

Pengaruh Pemadatan Dua-arah Penekanan Terhadap Densitas dan Kekerasan AMC diperkuat Serbuk Silikon Dioksida

Ricky Irwansyah¹, Rodika², Agus Wanto³, Mego Wahyudi⁴, Sukanto^{5*}

^{1,5} Program Studi Teknik Mesin dan Manufaktur, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

² Program Studi Teknik Perawatan dan Perbaikan Mesin, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

^{3,4} Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

^{1,2,3,4,5} Kawasan Industri Airkantong Sungailiat - Bangka-33211- Indonesia

E-mail : irwansyahri970@gmail.com¹, r_rodika@ymail.com², aguswanto1981@gmail.com³, megowahyudi80@gmail.com⁴, sukanto@polman-babel.ac.id^{5*}.

Info Naskah:

Naskah masuk: 15 Mei 2023

Direvisi: 13 Juni 2023

Diterima: 29 Juni 2023

Abstrak

Metode kompaksi pada teknologi metalurgi serbuk merupakan proses penting dalam mempengaruhi sifat densitas dan kekerasan produk yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh metode kompaksi satu-arah penekanan dibandingkan dengan metode kompaksi dua-arah penekanan terhadap densitas dan kekerasan produk komposit yang dihasilkan. Metode eksperimen pembuatan komposit matrik aluminium dengan penguat pasir silika ini menerapkan tekanan kompaksi 4500 Psi. Pencampuran dengan cara pemaduan mekanik digunakan mesin horizontal *ball mill*. Uji densitas mengacu prinsip *Archimedes* dengan standar ASTM B962-17, sedangkan uji kekerasan *Rockwell Brinell* digunakan standar ASTM E110-14. Hasil uji densitas sampel metode kompaksi dua-arah penekanan menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan densitas sampel hasil kompaksi satu-arah penekanan yaitu berturut-turut; bernilai 2,132 g/cm³ dan 2,119 g/cm³. Nilai kekerasan sampel hasil kompaksi dua-arah penekanan juga memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan kekerasan sampel hasil kompaksi satu-arah penekanan yaitu berturut-turut; bernilai 43,67 HRB dan 36,78 HRB. Selanjutnya, berdasarkan hasil analisa struktur mikro, ikatan *interlocking* yang terjadi pada sampel komposit dengan dua-arah penekanan juga lebih baik dibandingkan dengan ikatan mekanik *interlocking* pada sampel komposit hasil yang ditekan satu-arah penekanan.

Abstract

The compaction method of powder metallurgy technology is an important process in influencing the density and hardness of the resulting product. This study aims to determine the effect of a one-way compaction method compared to a two-way compaction method on the density and hardness of the resulting composite product. The experimental method for making aluminum matrix composites with silica sand reinforcement applies a compaction pressure of 4500 Psi. Mixing utilizing mechanical alloying used a horizontal ball mill machine. The density test refers to the Archimedes principle with the ASTM B962-17 standard, while the Rockwell Brinell hardness test uses the ASTM E110-14 standard. The results of the sample density test of the two-way compaction method of compaction showed a higher value compared to the sample density of the one-way compaction results, respectively; values of 2.132 g/cm³ and 2.119 g/cm³. The hardness value of the sample resulting from two-way compression compaction also has a higher value than the sample hardness resulting from one-way compression compaction, respectively; worth 43.67 HRB and 36.78 HRB. Furthermore, based on the results of microstructural analysis, the interlocking bonding occurs in composite samples with two-way compaction. It is also better than the interlocking mechanical bonding in composite samples resulting from one-way compaction.

Keywords:

powder metallurgy;
two-way compaction;
one-way compaction;
aluminum matrix composite.

*Penulis korespondensi:

Sukanto

E-mail: sukanto@polman-babel.ac.id

1. Pendahuluan

Terdapat berbagai metode dalam pembuatan komposit, seperti *stir casting*, *powder metallurgy*, *compo casting*, *friction stir casting*, *roll bonding* dan lain-lain [1]. Namun demikian metode *powder metallurgy* atau metalurgi serbuk memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan proses lainnya, sehingga pembuatan komposit dengan teknologi metalurgi serbuk ini semakin dikembangkan pada akhir-akhir ini [2]. Beberapa keuntungan pembuatan komposit dengan metode metalurgi serbuk adalah energi proses yang rendah [3], lebih ekonomis karena lebih sedikit bahan yang hilang atau sebagian besar bahan baku menjadi produk jadi [4]. Kecepatan produksi tinggi karena dapat memproduksi produk secara massal, dapat memproduksi produk dengan bentuk yang rumit dengan ukuran kecil, serta mudah dalam mengontrol parameter proses produk serta mampu memproduksi produk dengan dimensi yang lebih akurat [1]. Proses utama pada teknologi metalurgi serbuk ada tiga tahapan yaitu tahapan proses pencampuran serbuk matrik dengan serbuk penguat, tahapan proses penekanan atau kompaksi dan tahapan proses *sintering* [5].

Tahapan proses kompaksi pada teknologi metalurgi serbuk memiliki peranan penting dalam meningkatkan nilai kerapatan atau densitas produk komposit. Terdapat dua metode kompaksi pada proses metalurgi serbuk, yaitu metode kompaksi panas dan metode kompaksi dingin [6], [7]. Metode kompaksi panas dilakukan dengan cara ketika proses penekanan diterapkan terhadap sampel juga dilakukan bersamaan dengan proses pemanasan serbuk. Sedangkan metode kompaksi dingin, proses penekanannya dilakukan pada suhu ruangan. Pada kondisi tertentu, pembuatan *metal matrix composite* atau komposit matrik logam sering digunakan metode kompaksi panas [6]. Hal ini dikarenakan pada proses kompaksi panas mampu meningkatkan sifat pembersihan pada serbuk matrik sehingga ketika proses penekanan dilakukan, dapat meningkatkan terjadinya ikatan antar muka atau *interlocking bonding* antara serbuk matrik dengan serbuk penguatnya [8].

Sifat fisik dan mekanik produk hasil proses metalurgi serbuk, seperti densitas, kekerasan dan ketahanan aus sangat dipengaruhi metode, tahapan dan parameter proses kompaksi yang diterapkan. Terdapat dua cara yang digunakan untuk proses kompaksi, yaitu cara penekanan satu arah saja dan cara penekanan dua arah. Menurut ilmu fisika secara umum, gaya aksi dan reaksi proses penekanan akan memiliki besaran yang sama dengan arah yang berbeda. Namun dalam proses kompaksi pada teknologi metalurgi serbuk tidak sesederhana itu. Hal ini harus mempertimbangkan berbagai faktor, mengingat keadaan serbuk yang dikompaksi memiliki karakteristik yang kompleks, seperti karakteristik bentuknya yang bermacam-macam, karakteristik ikatan kimia antar serbuk juga berbeda-beda, serta besaran ukuran serbuk yang sangat bervariasi. Maka dari itu, dikarenakan adanya distribusi porositas, perbedaan bentuk dan densitas yang tidak merata serta terjadinya perbedaan yang diakibatkan oleh gesekan antar partikel/serbuk selama penyusunannya pada cetakan mengakibatkan terjadi deformasi [9]. Selanjutnya kondisi

ini sudah barang tentu, berdampak terhadap sifat dan karakteristik kemampuan fisik dan mekanik pada keseluruhan bidang permukaan produk hasil kompaksi serbuk ini [10].

Material komposit dengan matrik polimer (resin) dan matrik logam aluminium, dengan penguat oksida logam, karbida, karbon, serat alam dan lain-lain akhir-akhir ini banyak diteliti dan dikembangkan guna diaplikasikan pada komponen otomotif [1]. Material aluminium, secara umum memiliki beberapa keunggulan, diantaranya adalah ringan, lebih tahan terhadap korosi, karena aluminium merupakan logam yang bersifat reaktif sehingga mudah teroksidasi dengan oksigen membentuk lapisan aluminium oksida atau Alumina (Al_2O_3) [11]. Selain itu, titik lebur aluminium juga relatif rendah sehingga biaya daur ulang sangat rendah [12]. Proses pengolahan daur-ulang aluminium *scrap* hanya memerlukan konsumsi energi sebesar $\pm 5\%$ dari konsumsi energi pada pengolahan aluminium primer, dengan kata lain mampu menghemat energi hingga $\pm 95\%$ [13]. Terlebih lagi dengan tingginya permintaan logam aluminium di pasaran Indonesia akhir-akhir ini mencapai 1 juta ton pertahun [14]. Maka pengolahan dan penggunaan aluminium *scrap* hasil daur ulang sebagai bahan dasar pembuatan komposit matrik logam aluminium perlu dikembangkan, mengingat selain lebih ekonomis juga dapat membantu dalam mengurangi permasalahan kurangnya pasokan logam aluminium internasional dan nasional [15], [16]. Oksida mineral logam, seperti alumina (Al_2O_3), Zirkonium silikat ($ZrSiO_4$) [17], silikon dioksida (SiO_2) [18] dan lain-lain merupakan material dengan tingkat kekerasan dan ketahanan gesek sedang hingga tinggi dan memiliki titik cair yang relatif tinggi juga, sesuai untuk suhu operasi komponen gesek yang relatif tinggi. Sifat material tersebut sangat sesuai untuk penguat pada komposit dengan matrik logam aluminium [7].

Cadangan pasir silika (SiO_2) di Bangka Belitung, terutama daerah bekas tambang Timah, yang biasa disebut dengan pasir silika tailing sangat melimpah, yang diperkirakan menempati lahan seluas 64.255 Ha pada area bekas tambang Timah yang menempati area seluas 124.838 Ha [19]. Hal ini terjadi karena berdasarkan penelitian terdahulu, struktur tanah bekas lahan tambang timah memiliki tekstur pasir, yaitu diperkirakan fraksi pasir ini mencapai 81-94% dengan kandungan debu antara 2-10% dan kandungan tanah liat sekitar 2-12% [20]. Oleh karena itu, dalam penelitian eksperimen ini digunakan matrik dari bahan aluminium hasil daur ulang dan Penguat digunakan serbuk dari pasir silika tailing tambang timah.

2. Metode

Peralatan dan material yang digunakan dalam penelitian metalurgi serbuk ini seperti ditunjukkan pada tabel 1. Secara umum peralatan proses metalurgi serbuk dikelompokkan menjadi tiga yaitu peralatan penyediaan (penggilingan) dan pencampuran serbuk, peralatan pemadatan atau kompaksi dan peralatan pengujian. Sedangkan untuk material hanya dikelompokkan menjadi dua yaitu material (serbuk) matrik dan serbuk penguat.

Material yang digunakan sebagai penyusun dalam pembuatan komposit ini meliputi 80 wt.% dari serbuk

aluminium hasil daur ulang dan 20 wt.% dari serbuk silikon dioksida [2], [21]. Paduan fraksi volume berat ini secara umum dapat menghasilkan sifat fisik dan mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan komposisi yang lainnya [2], [21]. Serbuk aluminium hasil daur ulang yang digunakan memiliki kadar 74% Al, 23%Cu(FeO₂) dan 3%Si, dengan ukuran distribusi serbuk hasil uji *Particle Size Analyzer* adalah pada D50: 204 μ m. Sedangkan serbuk silikon dioksida yang digunakan berasal dari pasir silika tailing limbah pencucian tambang timah, dengan komposisi senyawa 83% SiO₂, 12%Fe₂O₃ dan 5%TiO₂, dengan ukuran distribusi serbuk hasil uji *Particle Size Analyzer* adalah pada D50: 164 μ m. Gambar serbuk Aluminium dan serbuk silika berturut-turut seperti ditunjukkan pada Gambar 1 (a) dan Gambar 1 (b).

mechanical alloying menggunakan mesin *horizontal ball mill* [2].



(a)



(b)

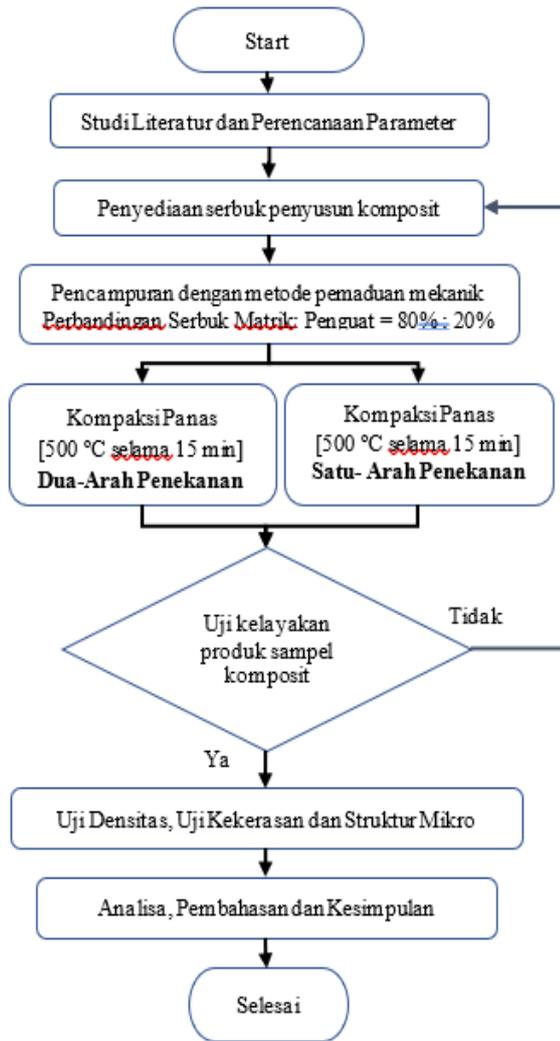
Gambar 1. (a) Serbuk Aluminium, (b) Serbuk Silikon Dioksida

Tabel 1. Peralatan dan material penelitian

Peralatan proses metalurgi serbuk	Material penyusun komposit
A. Peralatan penyediaan serbuk (penggilingan dan pencampuran serbuk dengan metode pepaduan mekanik: 1. Timbangan digital [0,001] gram. 2. <i>Universal Ball mill</i> . 3. <i>Partice Size Analyzer (PSA)</i> .	1. Material serbuk aluminium (matrik) berukuran hasil uji PSA = D50: 204 μ m. Dengan tingkat kemurnian 74% Al, 23% Cu(FeO ₂) dan 3%Si, dengan campuran fraksi volume 80%.
B. Peralatan kompaksi: 1. Mesin press hidrolik satu-arah penekanan. 2. Mesin press hidrolik satu-arah penekanan. 3. Cetakan sampel (<i>molding</i>) dan oven pemanas 500 °C.	2. Material serbuk pasir silika tailing (penguat) berukuran hasil uji PSA = D50: 164 μ m. Tingkat kemurnian 83%SiO ₂ , 12%Fe ₂ O ₃ dan 5%TiO ₂ , dengan campuran fraksi volume 20%.
C. Peralatan pengujian 1. Timbangan digital dan <i>picnometry</i> untuk uji densitas dengan metode Archimedes. 2. Mesin uji kekerasan [HRB] 3. <i>Partice Size Analyzer (PSA)</i> . 4. Foto digital/mikroskop optik	

Metode penelitian ini dilakukan mengikuti diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, yang diawali dengan *start* dan dilanjutkan dengan studi literatur dan perencanaan parameter penelitian. Proses selanjutnya adalah penggilingan serbuk penguat dari pasir silika tailing, menggunakan mesin *horizontal ball mill*. Prinsip kerja mesin ini adalah material yang akan digiling dicampur dengan bola-bola giling dimasukkan ke dalam tabung *stainless-steel* dengan *Ball to Powder weight Ratio (BPR)* 10:1, dengan volume maks 1/3 dari volume tabungnya. Material bola-bola giling atau *ball mill* sebagai penggerus bersifat keras dan tahan gesek terbuat dari material paduan baja dengan lapisan karbida [22]. Proses penggilingan dilakukan selama 2 jam sehingga dihasilkan ukuran serbuk silika D50: 164 μ m dari ukuran awal mesh 50 (308 μ m) [23]. Kemudian dilanjutkan proses pencampuran serbuk matriks dan serbuk penguat silika menerapkan metode pepaduan mekanik dingin pada suhu ruangan atau

Perbandingan campuran bahan penyusun komposit, antara serbuk aluminium dengan serbuk silikon dioksida adalah 80% berbanding 20%. Proses pencampuran serbuk yang dilakukan dengan pepaduan mekanik, telah berdampak pada terjadinya dua proses secara simultan yaitu penggerusan dan pencampuran. Oleh karena itu, hasil akhir metode pencampuran ini berupa paduan padatan dengan ukuran serbuk yang semakin kecil dari ukuran sebelum proses pencampuran. Selain itu, juga terjadi pengelasan dingin (*cold-weld*) akibat tumbukan berulang antara bola-bola *bearing* dengan serbuk matrik serta serbuk penguatnya [20]. Parameter proses pepaduan mekanik dengan *ball mill* yang diterapkan adalah *Ball to Powder weight Ratio (BPR)* 10:1, kecepatan mesin 90 rpm dengan waktu penggilingan selama 4 jam. Selanjutnya dilakukan proses kompaksi dengan dua metode, yaitu metode Kompaksi Panas Dua-Arah Penekanan dan metode Kompaksi Panas Satu-Arah Penekanan. Setelah dilakukan proses uji kelayakan sampel, berupa pengamatan fisik, dimana padatan sampel harus berbentuk cincin secara sempurna dan tidak pecah bila sampel memenuhi syarat tersebut maka dilanjutkan proses uji densitas dan uji kekerasan, sedangkan untuk saampel yang gagal dilakukan proses pembuatan ulang. Kemudian proses terakhir adalah analisa pembahasan dan kesimpulan.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

Foto serbuk setelah dilakukan proses pencampuran dengan metode *mechanical alloying*, seperti ditunjukkan pada Gambar 3-1(a). Foto tersebut menunjukkan bahwa bentuk material setelah dilakukan *mechanical alloying* tampak butiran serbuk/partikel telah terjadi inisiasi ikatan mekanik berupa pengelasan dingin atau *cold-weld*, seperti yang ditampilkan pembesarannya pada Gambar 3-1(a). Hal ini diakibatkan adanya energi tumbukan antara bola-bola giling terhadap serbuk penyusun komposit secara terus-menerus berulang selama 4 jam [27].

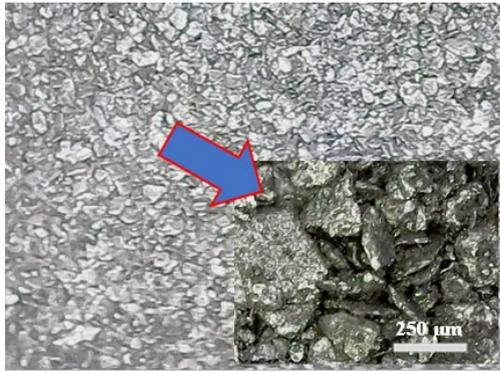
Mekanisme terjadinya *cold-weld* pada proses pencampuran dengan metode *mechanical alloying* adalah akibat dari kombinasi antara logam aluminium sebagai matrik cenderung bersifat lunak dan ulet (*ductile*), sedangkan pasir silika sebagai penguat bersifat getas dan rapuh (*brittle*), sehingga pada kondisi ketika tertumbuk terjadi pengelasan dingin dan kondisi ketika tertumbuk mengalami *crack* dan pecah secara berulang selama proses *ball mill* [23]. Dimana ciri-ciri bentuk serbuknya menjadi lebih pipih-pipih dibandingkan dengan bentuk serbuk awalnya yang cenderung bulat-bulat, ditunjukkan Gambar

3(a). Hal inilah yang akhirnya berdampak kepada terjadinya ikatan mekanik *interlocking* ketika material penyusun komposit paduan dingin ini di-*sintering*, yang mana kondisi ikatan ini sudah barang tentu lebih baik bila dibandingkan dengan metode pencampuran tanpa menggunakan metode *mechanical alloying* [24].

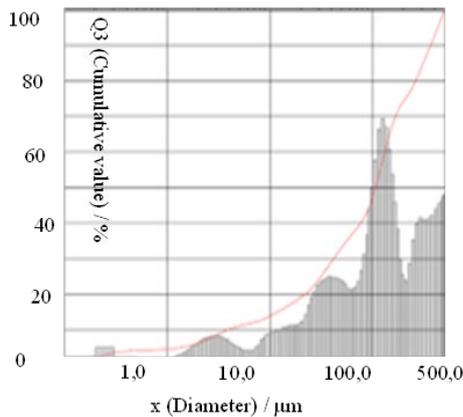
Hasil uji *Particle Size Analyzer* (PSA) terhadap distribusi ukuran serbuk campuran setelah proses pemaduan mekanik adalah berukuran D50: 106 μm , seperti ditunjukkan pada gambar 3(b). Berdasarkan grafik tersebut dapat diamati bahwa ukuran serbuk penyusun komposit ini tampak semakin halus. Pencampuran padatan dengan ukuran matriks aluminium D50:204 μm dan ukuran serbuk penguat silika D50:164 μm telah berubah menjadi berukuran D50:106 μm setelah dilakukan diproses *mechanical alloying* selama 4 jam menggunakan *horizontal ball mill*. Ukuran serbuk yang semakin kecil ini, telah mempengaruhi kecepatan waktu terbentuknya ikatan mekanik *interlocking* pada komposit ketika proses sintering, dimana meskipun suhu matriks aluminium tidak menurun, namun dengan semakin kecilnya ukuran serbuk maka semakin mempercepat perambatan panas antar partikel penyusun kompositnya [2].

Sampel hasil kompaksi panas seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Foto Sampel Hasil Kompaksi. Berdasarkan gambar tersebut dapat diamati bahwa sampel dengan kompaksi panas dua-arah penekanan menunjukkan kondisi yang jauh lebih baik dibandingkan dengan sampel dengan kompaksi panas satu-arah penekanan. Dimana sampel dengan kompaksi panas dua-arah penekanan tidak menunjukkan adanya retak atau pecah, sedangkan sampel dengan kompaksi panas satu-arah penekanan menunjukkan adanya patahan getas atau patahan rapuh. Hasil pengujian densitas dengan ASTM B962-17 [25] dan pengujian kekerasan dengan ASTM E110-14 [26] terhadap hasil kompaksi serbuk penyusun komposit seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan grafik tersebut dapat diamati dan dianalisa bahwa hasil kompaksi dua-arah penekanan menunjukkan nilai densitas dan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan sampel yang dikompaksi dengan satu-arah penekanan yaitu berturut-turut bernilai 2,132 g/cm^3 dan 43,67 HRB. Sedangkan nilai densitas dan kekerasan komposit AMCs hasil kompaksi panas satu-arah penekanan hanya bernilai 2,119 g/cm^3 dan 36,78 HRB.

Uji mikrostruktur dengan mikroskop optik terhadap sampel penelitian ini seperti ditampilkan pada Gambar 3-4. Gambar 6(a). menunjukkan foto sampel hasil kompaksi dua-arah penekanan, sedangkan Gambar 6(b). menunjukkan sampel hasil kompaksi panas satu-arah penekanan. Selanjutnya Gambar 6(c). menunjukkan foto digital untuk sampel hasil kompaksi dua-arah penekanan, sedangkan Gambar 6 (d). menunjukkan foto digital sampel hasil kompaksi panas satu-arah penekanan. Berdasarkan Gambar 6. tersebut, dapat disampaikan bahwa kondisi struktur mikro pada sampel dengan kompaksi dua-arah penekanan menunjukkan bagian yang lemah terjadi pada tengah-tengah sampel atau pada titik berat sampel. Sedangkan pada sampel dengan kompaksi satu-arah penekanan bagian yang mengalami lemah dan terjadi patahan adalah berjarak lebih dekat dari landasan pengepresan bawah.

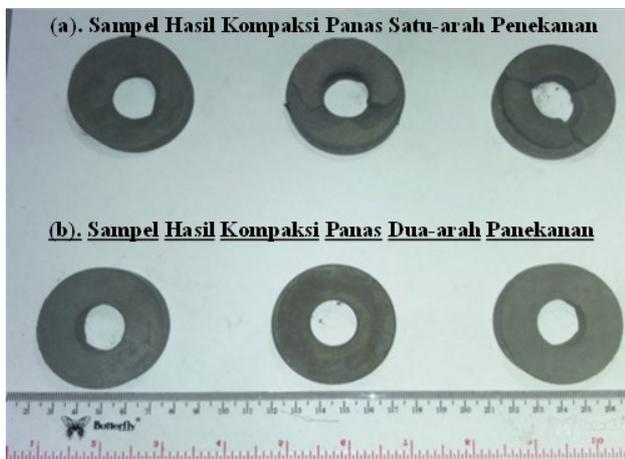


(a)

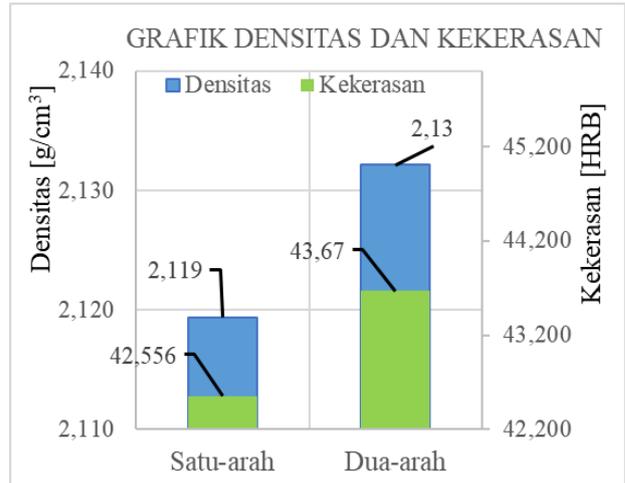


(b)

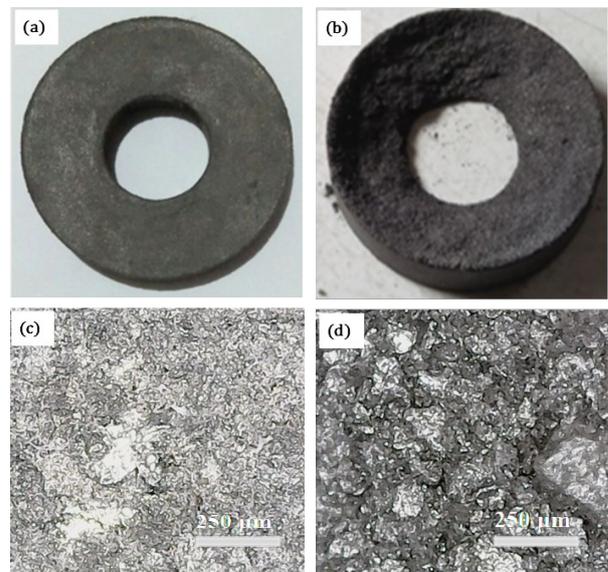
Gambar 3. (a) Foto Serbuk Hasil Pemaduan Mekanik Selama 4 jam. (b) Grafik Distribusi *Particle Size Analyzer* terhadap Serbuk Hasil Pemaduan Mekanik 4 Jam.



Gambar 4. Foto Sampel Hasil Kompaksi



Gambar 5. Grafik Densitas dan Kekerasan pada Sampel Dua-arah Penekanan dan Satu-Arah Penekanan



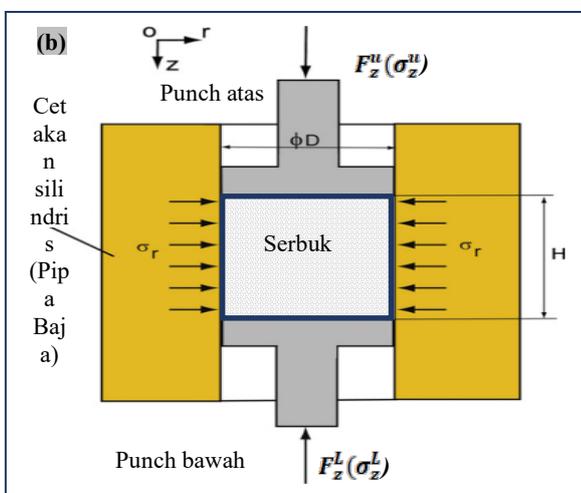
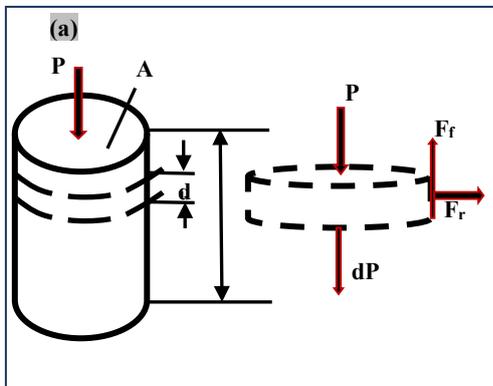
Gambar 6. Perbedaan Permukaan Produk Hasil Pemadatan. (a) Dua-arah Penekanan (b) Satu Arah Penekanan.

Berdasarkan hasil-hasil pengujian diatas dapat dianalisa bahwa pada dasarnya karakteristik tahapan penekanan pada arah aksial dimana dalam keadaan steady, keadaan sistem adalah tetap tidak bervariasi terhadap waktu, yang dilakukan pada suhu kamar dengan laju penekanan bergerak lambat dapat diilustrasikan dan dianalisa mengikuti Gambar 7(a). [10]. Dimana P adalah tekanan kompaksi, A luas penampang bidang tekan, Ff adalah gaya friksi, Fr adalah gaya ke dinding cetakan, h adalah ketinggian pengaruh kompaksi dan dP adalah deferensial dari P tekanan. Selanjutnya σ_a adalah tegangan pada titik a, U adalah koefisien gesek, x adalah jarak antara P terhadap titik yang diamati dan r adalah jari-jari cetakan sampel, maka analisa posisi jarak x yang diamati sifat sampelnya (densitas dan kekerasannya) dapat menggunakan persamaan (1) berikut:

$$\sigma_a(x) = \sigma_a(0) \exp(-2\mu x/r) \quad (1)$$

Persamaan di atas dapat menjelaskan bahwa tegangan aksial tekan pada massa $F_a(x)$ berkurang secara eksponensial pada saat jarak “x” bertambah terhadap permukaan bidang tekan atas. Bahkan penurunan tegangan ini akan bertambah lagi ketika semakin besar koefisien gesekan F yang terjadi serta ketika semakin kecil dalam diameter $2r$ dari cetakan sampelnya (semakin menuju posisi tengah cetakan).

Selanjutnya pada karakteristik pemadatan dua-arah ini seperti diilustrasikan Gambar 7 (b). Diagram Instrumen Cetakan 2-D pada kompaksi dua-arah penekanan [27, 28]. Nilai tegangan aksial σ_z^u ditentukan berdasarkan gaya tekan cetakan atas dibagi oleh luasan penampang bidang kompaksi. Demikian juga nilai tegangan aksial bawah σ_z^l dihitung berdasarkan gaya tekan bawah dibagi luas penampangnya. Selanjutnya perubahan ketinggian serbuk (ΔH) dibagi oleh tinggi pengisian awal (H_0) pada cetakan yang merupakan strain aksialnya. Oleh karena itu kedua kurva beban dan non pembebanan ini memiliki perilaku non linier.



Gambar 7. (a). Distribusi Kompaksi Arah Aksial.
(b) Diagram 2-D Instrumen Cetakan pada Kompaksi Dua-arah Penekanan [10]

Kemudian nilai densitas hasil pemadatan ditentukan berdasarkan pada berat serbuk dibagi oleh volume serbuk dalam cetakan. Selama proses pemadatan, perilaku gesekan antar partikel serbuk terhadap dinding cetakan sampel menginduksi tegangan non-uniform-aksial, sehingga gradien densitas dihasilkan dalam kompaksi. efek gesekan ini dapat ditentukan dengan mempertimbangkan koefisien gesekan dinding selama pemadatan, mengacu teori Jansen-Walker dengan persamaan (2) berikut [10] :

$$u = \frac{D}{4H} \frac{\sigma_z^l}{\sigma_r(z)} \left(\frac{\sigma_z^u}{\sigma_z^l} \right)^{\frac{z}{H}} \ln \left(\frac{\sigma_z^u}{\sigma_z^l} \right) \quad (2)$$

dengan H , D , $\sigma_r(z)$, σ_z^l dan σ_z^u adalah berturut-turut adalah nilai dari: tinggi kompaksi dalam cetakan, diameter dalam cetakan, tekanan dalam posisi z dari permukaan kompaksi serbuk, tegangan kompresi yang diterapkan oleh penekanan dari bawah dan tegangan kompresi penekanan dari atas.

Oleh karena itu, ketika pemadatan dua-arah penekanan ini densifikasi dan tekanan terendah terjadi pada bidang tengah (titik berat cincin) aglomerat serbuk, sedangkan densifikasi tertinggi dan tekanan tertinggi terjadi pada permukaan bidang bagian luar aglomerat serbuk, atau dari arah gaya tekan yang diaplikasikan. Demikian halnya karakteristik kekerasan produk juga identik pada karakteristik pemadatan ini, yaitu bagian luar produk (terutama permukaan atas dan bawah) memiliki kekerasan tertinggi dan bagian tengah produk memiliki kekerasan terendah. Dengan kata lain, proses pemadatan dan sifat fisik-mekanik terhadap sampel komposit ini tidak dapat ditentukan hanya dengan memperhitungkan gaya reaksi-reaksi tanpa memperhatikan nilai gesekan antar partikel dan antar partikel dengan dinding cetakan [10].

4. Kesimpulan

Berdasarkan Analisa dan pembahasan pada bagian terdahulu dapat disimpulkan bahwa sifat fisik dan mekanik pada komposit AMCs diperkuat serbuk silika, dengan fabrikasi teknologi metalurgi serbuk, maka ketika kompaksi diaplikasikan 4500 Psi pada sampel berbentuk cincin, dengan dua-arah penekanan telah mengakibatkan bagian dalam sampel yaitu pada jarak tertentu menuju pusat sumbu cincin sampel bentuk silinder menghasilkan sifat kekerasan paling lemah dikarenakan oleh adanya gesekan antar partikel dan antar dinding cetakan telah mengakibatkan tegangan menurun dengan semakin jauhnya sumber tekanan, sehingga ikatan mekanik *interlocking* pada titik pusat berat sampel cincin tersebut paling rendah. Sedangkan pada penerapan kompaksi satu-arah penekanan, maka jarak terjauh dari bidang energi tekan yang diterapkan seharusnya yang memiliki ikatan mekanik *interlocking* terendah dan berdampak pada kekerasan juga paling rendah pula. Namun yang terjadi, sifat sampel kekerasan terendah telah sedikit bergeser ke atas dari jarak terjauhnya atau dari landasan pengepresan bawah, dikarenakan terjadinya efek balik gaya reaksi dari tumpuan landasan. Hal ini sesuai fenomena fisika material, dimana meskipun gaya aksi sama dengan gaya reaksi, namun gaya gesek antar partikel sangat mempengaruhi distribusi sifat mekaniknya. Oleh

karena itu, sifat fisik dan mekanik pada komposit yang dihasilkan dengan kompaksi panas dua-arah penekanan lebih tinggi dibandingkan dikompaksi satu-arah penekanan yaitu berturut-turut sifat densitas dan kekerasannya 2,132 g/cm³ dan 43,67 HRB berbanding 2,119 g/cm³ dan 36,78 HRB.

Ucapan Terimakasih

Terima kasih kepada berbagai pihak yang telah berkontribusi dalam penelitian ini yaitu Laboratorium Kimia pada Fakultas MIPA Universitas Brawijaya yang telah membantu dalam pengujian Particle Size Analyzer dan Uji Densitas, Lab Sentral Material Universitas Negeri Malang dan Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung yang telah berkontribusi pada pembiayaan dan penggunaan sarana prasarana dalam pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] M. Syahid, A. Hayat, and Aswar, "Effect of Graphite Addition on Aluminium Hybrid Matrix Composite by Powder Metallurgy Method," *Rev. des Compos. des Mater. Av. Compos. Adv. Mater.*, vol. 32, no. 3, pp. 125–132, 2022, doi: 10.18280/rcma.320303.
- [2] Sukanto, W. Suprpto, R. Soenoko, and Y. S. Irawan, "The Effect of Milling Time on The Alumina Phase Transformation in The AMCs Powder Metallurgy Reinforced by Silica-Sand-Tailings", *Eureka: Phys. Eng.*, no. 1, pp. 103–117, 2022, doi: 10.21303/2461-4262.2022.001906.
- [3] I. Chatur Adhi WA, A. A. Alit Triadi, M. Wijana, I. M. Nuarsa, and I. M. Mara, "Kekerasan Produk Metalurgi Serbuk Berbahan Limbah Aluminium dengan Metode Kompaksi Bertahap," *J. Sains Teknol. Lingkung.*, pp. 141–146, 2021, doi: 10.29303/jstl.v0i0.252.
- [4] R. Rinanda and D. Puryanti, "Analisis Sifat Magnetik Kalsium Ferit yang Disintesis Menggunakan Metode Metalurgi Serbuk," *J. Fis. Unand*, vol. 9, no. 2, pp. 224–230, 2020, doi: 10.25077/jfu.9.2.224-230.2020.
- [5] S. E. Susilowati, A. Fudholi, and D. Sumardiyanto, "Mechanical and microstructural characteristics of Cu–Sn–Zn/ Gr metal matrix composites processed by powder metallurgy for bearing materials," *Results Eng.*, vol. 14, no. March, p. 100377, 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100377.
- [6] I. A. Wahyudie, "Hot Compaction Process Optimization For Improvement Tribology Behavior Of Zirconium Silicate Strengthened BMCs," *J. Southwest Jiaotong Univ.*, vol. 56, no. 4, 2021, doi: 10.35741/issn.0258-2724.56.4.27.
- [7] P. Garg, A. Jamwal, D. Kumar, K. K. Sadasivuni, C. M. Hussain, and P. Gupta, "Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 4924–4939, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.06.028.
- [8] M. S. El-Eskandarany, *Mechanical Alloying, Nanotechnology, Material Science and Powder Metallurgy.*, Second Edi. Kuwait: Elsevier, 2015. doi: http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-4557-7752-5.00001-2.
- [9] H. A. Al-Qureshi, M. R. F. Soares, D. Hotza, M. C. Alves, and A. N. Klein, "Analyses of the fundamental parameters of cold die compaction of powder metallurgy," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 199, no. 1, pp. 417–424, 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.08.030.
- [10] W. Suprpto dan R. Soenoko, *Teknologi Metalurgi Serbuk*. Solo: Pena Mas Publishing, 2015. ISBN: 978-602-73670-0-5
- [11] Pujono, "Perpatahan Fatik Material Aluminium 2024 T3 dengan Pengelasan FSW", *Jurnal Infotekmesin*, Vol.9 No.1 Januari 2018, <https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v9i01.5>
- [12] I. P. A. Zay, F. R. Zulfi, and A. Gurning, "Daur Ulang Scrap Aluminium Sebagai Solusi Alternatif Untuk Mengurangi Ketergantungan ...," *Conf. Pap.*, 2014, doi: 10.13140/2.1.3237.6006.
- [13] D. Brough and H. Jouhara, "The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery," *Int. J. Thermofluids*, vol. 1–2, 2020, doi: 10.1016/j.ijft.2019.100007.
- [14] E. Sutrisno, (2022) "Indonesia Menuju Industri Aluminium Berdikari", Indonesia.go.id., Rabu, 20 April 2022, 6 WIB, diakses 20 November 2022 pukul 01.30 WIB., 2022.
- [15] A. Ramanathan, P. K. Krishnan, and R. Muraliraja, "A review on the production of metal matrix composites through stir casting Furnace design, properties, challenges, and research opportunities," *J. Manuf. Process.*, vol. 42, pp. 213–245, 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.04.017.
- [16] C. Bulei, I. Kiss, and V. Alexa, "Development of metal matrix composites using recycled secondary raw materials from aluminium wastes," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, pp. 4143–4149, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.926.
- [17] I. A. Wahyudie, R. Soenoko, W. Suprpto, and Y. S. Irawan, "Enhancing hardness and wear resistance of ZrSiO₄-SnO₂/Cu₁₀Sn composite produced by warm compaction and sintering," *Metalurgija*, vol. 59, no. 1, pp. 27–30, 2020. <https://hrcak.srce.hr/file/327708>.
- [18] Sukanto, R. Soenoko, W. Suprpto, Y. S. Irawan "Characterization of aluminium matrix composite of Al-ZnSiFeCuMg alloy reinforced with silica sand tailings particles," *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 14, no. 3, pp. 7094–7108, 2020, doi: 10.15282/jmes.14.3.2020.11.0556.
- [19] Sukarman and R. A. Gani, "Lahan Bekas Tambang Timah di Pulau Bangka dan Belitung, Indonesia dan Kesesuaiannya untuk Komoditas Pertanian," *J. Tanah dan Iklim*, vol. 41, no. 2, pp. 101–112, 2017, <https://www.researchgate.net/publication/323390912>
- [20] C. Suryanarayana, "Mechanical Alloying: A Novel Technique to Synthesize Advanced Materials," *Research*, vol. 2019, p. 17, 2019, doi: 10.34133/2019/4219812.
- [21] Munasir, Triwikantoro, M. Zainuri, R. Bäßler and Darminto, "Mechanical Strength and Corrosion Rate of Aluminium Composites (Al / SiO₂): Nanoparticle Silica (NPS) as Reinforcement," *J. Phys. Sci.*, vol. 30, no. 1, pp. 81–97, 2019. <https://doi.org/10.21315/jps2019.30.1.7>
- [22] S. Wilastari, Optimasi Temperatur yang Mempengaruhi Kekerasan pada Pembuatan Ball Mill dengan Cara Hot Rolling, *Jurnal Infotekmesin*, Vol.9 No.2 Juli 2018, <https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v9i02.14>
- [23] Sukanto, R. Soenoko, W. Suprpto, and Y. S. Irawan, "Parameter Optimization of Ball Milling Process for Silica Sand Tailing," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 494, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/494/1/012073.
- [24] C. Suryanarayana, "Mechanical alloying and milling," *Mech. Alloy. Milling*, vol. 46, pp. 1–472, 2004, doi: 10.4150/kpmi.2006.13.5.371.
- [25] ASTM International, "Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes' Principle," *Astm B962-17*, vol. i, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1520/B0962-17.2.
- [26] E110-14, "Standard Test Method for Rockwell and Brinell Hardness of Metallic Materials by Portable Hardness Testers," *ASTM B. Stand.*, pp. 1–5, 2014, doi: 10.1520/E0110-14.2.
- [27] M. Asep, Sugiyarto, Somawardi, A. Rusdy dan Sukanto, "Pengaruh Variasi Tekanan Kompaksi Panas terhadap

Densitas dan Kekerasan AMC Diperkuat SiO₂" Machine: Jurnal Teknik Mesin Univesitas Bangka Belitung, Vol:9 No.1., 2023.

[28]. L. H. Han, J. A. Elliott, A. C. Bentham, and A. Mills, "A modified Drucker-Prager Cap model for die compaction

simulation of pharmaceutical powders," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 45, pp. 3088–3106, 2008, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2008.01.024.