# PENGARUH VARIASI TEKANAN KOMPAKSI PANAS TERHADAP DENSITAS DAN KEKERASAN AMC DIPERKUAT SiO2

Muhammad Asep[1], Sugiyarto[2], Somawardi[3], Achmad Rusdy[4], Sukanto[5*]

[1,2,3,4,5] Teknik Mesin dan Manufaktur, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

Kawasan Industri Airkantung Sungailiat Bangka-33211- Telepon (0717) 93586

[*]Email: sukanto@polman-babel.ac.id

**Abstrak**

Penelitian komposit matrik logam aluminium yang diperkuat dengan keramik menggunakan metode metalurgi serbuk akhir-akhir ini semakin banyak diminati untuk dikembangkan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh perbedaan tekanan kompaksi terhadap sifat densitas dan sifat kekerasan komposit yang dihasilkan. Metode penelitian yang digunakan adalah mengikuti tahapan proses metalurgi serbuk, yaitu meliputi persiapan material, pencampuran dan kompaksi. Pencampuran serbuk penyusun komposit dilakukan dengan metode *mechanical alloying* atau pemaduan mekanik menggunakan mesin *horizontal ball mill* selama 4 jam. Sedangkan metode kompaksi panas yang digunakan adalah kompaksi dua-arah penekanan, menggunakan mesin pompa hidrolik. Material matriks yang digunakan adalah serbuk aluminium hasil daur ulang, dan material penguat digunakan serbuk dari pasir silika tailing tambang timah. Proses kompaksi panas dilakukan pada suhu 500 $^0$C ditahan selama 15 ment. Variasi tekanan kompaksi dua-arah digunakan 4400 PSi, 4500 PSi dan 4600 Psi. Pengujian densitas mengacu Archimedes dengan stradar ASTM B962-17. Sedangkan pengujian kekerasan digunakan mesin uji kekerasan Brinell, mengacu pada standar ASTM E110-14. Hasil uji densitas dan uji kekerasan menujukkan kecenderungan nilai semakin meningkat dengan meningkatnya tekanan kompaksi yang diaplikasikan. Densitas tertinggi adalah 2,147 g/cm$^3$ untuk sampel dengan kompaksi sebesar 4.600 Psi, dengan nilai kekerasan tertitinggi adalah 53,11 HRB. Berdasarkan foto mikro menunjukkan bahwa ikatan mekanik *interlocking* pada tekanan kompaksi yang lebih rendah cenderung lemah, patahan pada batas butir kelihatan jelas dan pola kerusakannya cenderung menunjukkan patahan rapuh/getas.

**Kata kunci**: tekanan kompaksi, silika, metalurgi serbuk

**Abstrak**

Research on aluminum metal matrix composites reinforced with ceramics using powder metallurgy methods has recently been increasingly in demand to be developed. The goals of this study determined the effect of differences in compaction pressure on the density and hardness properties of the resulting composite. The research method used of is following the stages of the powder metallurgy process, which includes material preparation, mixing and compaction. The mixing of the composite constituent powders was carried out using the mechanical alloying method using a horizontal ball mill for 4 hours. While the hot compaction method used is two-way compression compaction, using a hydraulic pump. The matrix material used is recycled aluminum powder, and the reinforcing material is powder from tin mine tailing silica sand. The hot compaction process was carried out at 500 0C and held for 15 minutes. Two-way compacting pressure variations used 4400 Psi, 4500 Psi and 4600 Psi. Density testing refers to Archimedes with the ASTM B962-15 standard. Meanwhile, the hardness test used the Rockwell hardness testing machine, referring to the ASTM E18-15 standard. The results of the density test and hardness test showed a tendency for the value to increase with increasing compaction pressure applied. The highest density was 2.147 g/cm$^3$ for a sample with a compaction of 4,600 Psi, with the highest hardness value being 53,11 HRB. Based on micro-photographs, it shows that the interlocking mechanical bonds at lower compaction pressures tend to be weak, fractures at the grain boundaries are clearly visible and the pattern of damage tends to show brittle/brittle fractures.

**Key words** : pressure compaction, silica, powder metallurgy

## PENDAHULUAN

Material komposit merupakan suatu material yang tersusun dari hasil pencampuran dua atau lebih material pembentuknya yang mempunyai sifat berbeda antara satu bahan dengan bahan yang lainnya, bahkan juga berbeda dari sifat material penyusunnya [1]. Material komposit dibagi menjadi tiga berdasarkan matriknya yaitu *Metal Matrik Composite* (MMC), *Polymer Matrik Composite* (PMC) dan *Ceramic Matrik Composite* (CMC) [2] [3]. Pada saat ini komposit jenis *Metal Matrik Composite* sudah banyak diteliti serta dikembangkan untuk dijadikan sebagai bahan material untuk membuat komponen otomotif, dengan menggunakan bahan dari material aluminium yang dijadikan sebagai matriknya serta menggunakan penguat seperti Nitrida, oksida logam, karbida, karbon, serat alam dan lain-lain [4]. Material aluminium digunakan karena mempunyai beberapa keunggulan seperti, ringan, lebih tahan terhadap korosi, titik lebur relatif rendah sehingga biaya daur ulang sangat rendah [5]. Biaya daur ulang aluminium yang murah, telah memotivasi para peneliti dan industri untuk mengembangkan pembuatan komposit menggunkan matrik aluminium [6]. Hal ini dapat membantu untuk mengurangi volume pasokan logam aluminium secara internasional dan nasional [7]. Material penguat umumnya digunakan untuk meningkatkan sifat kekerasan dan ketahanan geseknya, serta untuk meningkatkan kemampuannya pada operasinal suhu yang relative tinggi, material yang memiliki sifat tersebut sangat bagus untuk digunakan sebagai penguat pada komposit dengan matrik aluminium. Material yang dapat meningkatkan nilai tersebut dianyaranya meliputi oksida mineral logam seperti, alumina ($Al_2O_3$), Zirkonium silikat($Zr(SiO_2)$, silikon dioksida ($SiO_2$) dan lain-lain [8]. Pada penelitian ini digunakan penguat silikon dioksida ($SiO_2$) sisa hasil penambangan timah yaitu pasir silika tailing, karena material komposit aluminium yang dipadukan dengan silikon dioksida ($SiO_2$) dapat menghasilkan material komposit yang mempunyai sifat seperti sifat tahan korosi, ringan, kuat serta *machinability* yang sangat baik [9].

Proses pembuatan komposit dapat dibuat dengan menggunakan beberapa metode *seperti stir casting, powder metallurgy, compo casting, friction stir casting, roll bonding* dan lain-lain [4]. Metode pembuatan komposit dengan menggunakan *powder metallurgy* atau metalurgi serbuk semakin banyak dikembangkan pada saat ini karena memiliki banyak keuntungan bila dibandingkan dengan proses pembuatan komposit yang lainnya [10] [11]. Keuntungan yang diperoleh dari metode metalurgi serbuk dalam proses pembuatan komposit diantaranya adalah energi proses yang rendah [12]. Selain itu proses metalurgi sebuk lebih ekonomis karena 95% penggunaan bahan baku yang digunakan dalam proses metalurgi serbuk ini akan menjadi sebuah produk jadi sehingga sedikit bahan yang hilang atau tidak terpakai [13][14]. Pada proses metalurgi serbuk mempunyai 3 tahapan proses utama yaitu proses pencampuran serbuk matrik dengan serbuk penguat, proses kompaksi atau penekanan dan proses sintering [15]. Pada proses kompaksi memiliki peranan yang sangat penting untuk meningkatkan nilai kerapatan serta densitas pada material komposit. Proses kompaksi pada metalurgi serbuk dapat dilakukan dengan menggunakan dua metode kompaksi yaitu kompaksi panas dan kompaksi dingin [16][1].

Metode kompaksi panas dilakukan dengan cara pada saat proses penekanan diberikan pemanasan hingga suhu tertentu terhadap sampel, dan secara bersamaan, sambil suhunya ditahan dilakukan dilakukan penekanan dengan mesin press hidrolik. Sedangkan pada metode kompaksi dingin, proses penekanan sampel tidak menggunakan pemanas, atau hanya dilakukan pada suhu ruangan. Pada pembuatan komposit logam metode kompaksi panas sering digunakan, karena proses kompaksi panas akan meningkatkan sifat pembasahan pada serbuk matrik sehingga pada saat proses penekanan dilakukan, dapat meningkatkan terjadinya ikatan mekanik antar muka serbuk/parikel atau lebih dikenal dengan *interlocking bonding* antara serbuk matrik dengan serbuk penguatnya [17]. Oleh karena itu, pada penelitian eksprimen ini telah dilakukan pembuatan komposit matrik aluminium dengan menggunakan bahan serbuk aluminium hasil daur ulang dan menggunakan penguat berupa serbuk silika dari pasir silika tailing tambang timah.

## METODE PENELITIAN

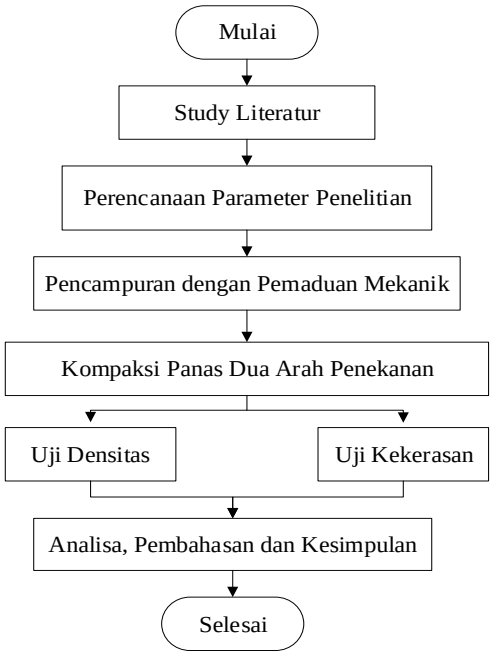
Pada penelitian ini digunakan material serbuk aluminium hasil daur ulang dan silikon dioksida dengan perbandingan fraksi volume berat 80 wt.% serbuk aluminium dan 20 wt.% silikon dioksida. Perbandingan tersebut secara umum akan menghasilkan sifat fisik serta mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan komposisi yang lain [10] [18]. Serbuk aluminium hasil daur ulang yang digunakan mempunyai komposisi senyawa 74%Al, 23%Cu($FeO_2$) dan 3% Si, yang mempunyai ukuran distribusi serbuk hasil uji *Particle Size Analyzer* yaitu

D50:204 µm. Sedangkan serbuk silikon dioksida yang digunakan merupakan pasir silika tailing hasil dari limbah pencucian tambang timah, yang memiliki komposisi senyawa 83% $SiO_2$, 12% $Fe_2O_3$ dan TiO2, yang mempunyai ukuran distribusi serbuk hasil uji *Particle Size Analyzer* yaitu D50:164 µm. Gambar 1, dibawah ini merupakan foto serbuk aluminium hasil daur ulang dan Gambar 2. Merupakan foto serbuk dari pasir silika.

**Gambar 1 Serbuk Aluminium**

**Gambar 2 Serbuk Silikon Dioksida**

Pada proses penelitian ekperimental ini telah dilakukan dengan mengikuti diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, dimana diawali dengan proses start yang dilanjutkan dengan studi literatur dan perencanaan proses parameter penelitian.




**Gambar 3 Diagram Alir Penelitian**

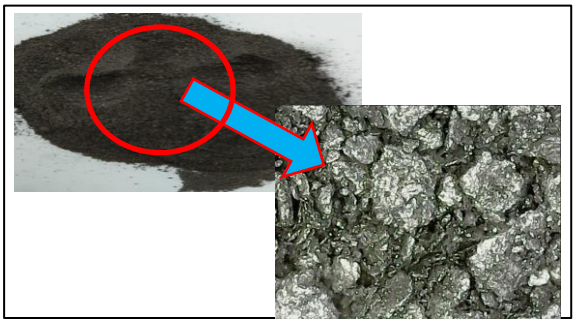
Tahapan proses penelitian selanjutnya adalah proses pencampuran serbuk aluminium hasil daur ulang dengan serbuk pasir silika menggunakan metode pemaduan mekanik atau *Mechanical Alloying* dengan menggunakan mesin *horizontal ball mill.* Proses pemaduan mekanik dengan *ball mill* ini digunakan parameter proses yang meliputi parameter *Ball Powder weight Ratio* (BPR) 10:1, parameter kecepatan putaran mesin adalah 90 rpm dan parameter waktu penggilingan adalah 4 jam. Pada proses pencampuran menggunakan metode *Mechanical Alloying* ini terjadi dua proses secara simultan, yaitu proses pencampuran dan proses penggerusan. Oleh karena itu metode pemaduan mekanik ini mampu menghasilkan campuran yang relative homogen dan mampu menghasilkan serbuk campuran yang semakin halus dari ukuran sebelumnya [19] [20] .

Selelah proses pencampuran selesai selanjutnya dengan pembuatan sampel dengan cara pemadatan atau kompaksi. Proses kompaksi divariasikan tekanannya, hal itu bertujuan untuk mengetahui perbedaan nilai densitas dan kekerasan yang dihasilkan akibat pengaruh dari perbedaan tekanan yang diberikan pada material komposit yang menggunakan bahan serbuk aluminium daur ulang dan pasir silika tailing. Variasi tekanan kompaksi yang digunakan yaitu 4400 PSi, 4500 PSi dan 4600 PSi selama 15 menit. Proses kompaksi dilakukan pada suhu kompaksi yaitu 500°C pada area dapur pemanas yang melingkupi cetakan. Proses kompaksi

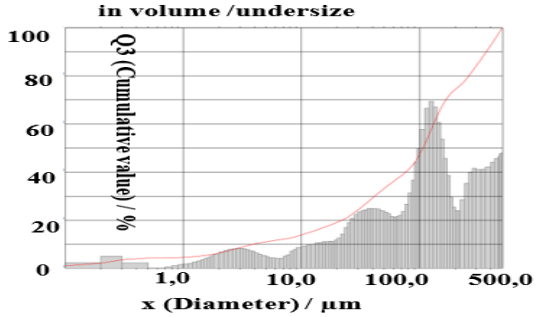
ini telah dipilih dan digunakan metode kompaksi dua-arah penekanan yaitu penekanan atas dan bawah menggunakan alat kompaksi hidrolik, yang mempunyai alat ukur untuk mengetahui nilai tekanan yang harus diterapkan, dalam satuan PSi. Selanjutnya setelah proses kompaksi sampel selesai dilakukan, dilanjutkan dengan dilakukan pengujian densitas dan kekerasan terhadap sampel hasil aplikasi dari kedua variasi tekanan kompaksi tersebut. Selanjutnya, semua data yang telah diperoleh dilakukan pembahasan dan analisa untuk mengetahui sejauh mana pengaruh perbedaan tekanan kompaksi terhadap sifat densitas dan kekerasan komposit yang dihasilkan. Tahapan terakhir pada proses penelitian ini adalah pengambilan HRB berdasarkan data-data, berdasarkan pembahasan dan berdasarkan analisa.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 4. berikut ini merupakan foto digital serbuk hasil proses pencampuran dengan metode *Mechanical Alloying* selama 4 jam. Berdasarkan foto tersebut dapat diamati dan disampaikan pernyataan bahwa dengan metode pemaduan mekanik (dingin) dapat menghasilkan campuran padatan yang lebih homogen dibandingkan dengan metode pencampuran lainnya. *Cold-weld* atau pengelasan dingin antara serbuk matrik aluminium dengan serbuk penguat silika tampak jelas terjadi seperti ditunjukkan pada gambar pembesarannya, pada Gambar 4. Kondisi pengelasan dingin pada campuran padatan serbuk ini yang telah membantu proses terjadinya ikatan mekanik *interlocking* pada komposit yang dihasilkan ketika proses sintering dilakukan. Ukuran distribusi serbuk campuran hasil uji *Particle Size Analyzer* (PSA) merk cilas 1090 Dry di Laboratorium Kimia pada MIPA Universitas Brawijaya, sebanyak 3 sampel dengan berat masing-masing serbuk sampel 10-5 gram. Diperoleh rata-rata ukuran D50: 106 µm dapat dilihat pada Gambar 5.



**Gambar 4 Foto Serbuk Campuran Padatan Hasil Proses *Mechanical Alloying* 4 jam**

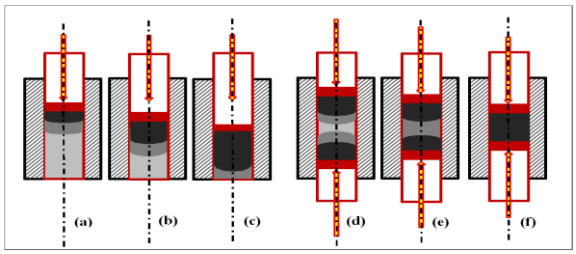



**Gambar 5 Grafik Sebaran Ukuran Serbuk D50: 106 Hasil Proses *Mechanical Alloying* 4 Jam, Diuji dengan Particle Size Analyzer.**

Bentuk produk sampel dalam penelitian ini adalah berupa cincin dengan diameter luar 50 mm dan diameter dalam 20 mm, dengan ketinggian produk rata-rata adalah antara 8-9 mm. Berat campuran padatan serbuk per sampel adalah 35 gram. Proses kompaksi dalam penelitian ini dipilih menggunakan metode kompaksi dua-arah penekanan, untuk mendapatkan kemampuan fisik dan mekanik yang lebih merata pada bidang permukaan sampel. Hal ini dapat diamati dan dianalisa mengacu pada Gambar 6. [21]. Pada gambar tersebut diilustrasikan kepadatan serbuk campuran hasil kompaksi satu arah penekanan yaitu gambar (a), (b) dan (c), dengan besar tekanan berturut-turut dari rendah ke tinggi. Selanjutnya ilustrasi yang sama juga ditampilkan ketika kompaksi dua-arah penekananan diterapkan, maka proses pemadanan serbuk bulk campuran material penyusun komposit terjadi dari jarak terdekat sumber energi penekanan bergerak menuju pada jarak terjauh dari sumber tekanan. Sehingga pada saat pemadatan dua-arah penekanan ini terapkan, maka densifikasi dan tekanan terendah terjadi pada bidang tengah aglomerat serbuk atau pada pusat titik berat cincin sampel. Sedangkan densifikasi tertinggi dan tekanan tertinggi terjadi pada bidang permukaan sampel bagian luar aglomerat serbuk, mulai dari daerah dengan jarak terdekat terhadap sumber energi penekanan atau dari arah gaya tekan yang diaplikasikan.

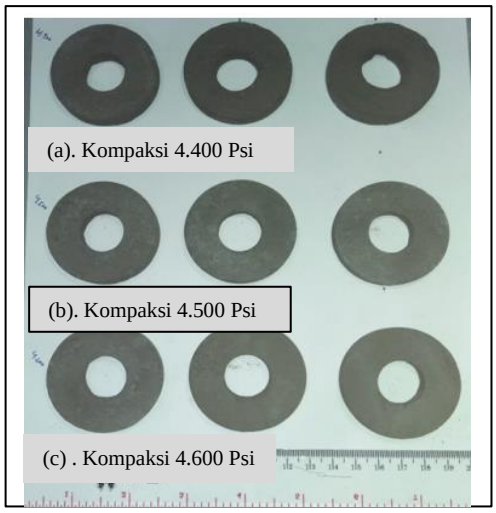
Demikian halnya karakteristik kekerasan produk juga identik pada karakteristik pemadatan ini, yaitu bagian luar produk, yaitu terutama pada permukaan atas dan bawah, yang memiliki kekerasan tertinggi dan bagian tengah produk memiliki kekerasan terendah. Dengan kata lain, proses pemadatan dan sifat fisik-mekanik terhadap sampel komposit ini tidak dapat ditentukan hanya dengan memperhitungkan gaya reaksi-reaksi tanpa

memperhatikan nilai gesekan antar partikel dan antar partiken dengan dinding cetakan.



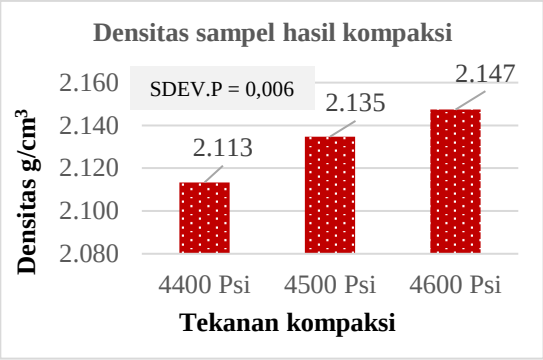

**Gambar 6 Ilustrasi Pemadatan: (a), (b) dan (c) Satu-arah. (d), (e) dan (f). Dua-arah [21]**

Hasil proses kompaksi dua-arah penekanan, dengan sejumlah sembilan sampel seperti ditunjukkan pada Gambar 7., yaitu tiga sampel dengan tekanan 4400 Psi, tiga sampel tekanan 4500 Psi dan tiga sampel dengan 4600 Psi.



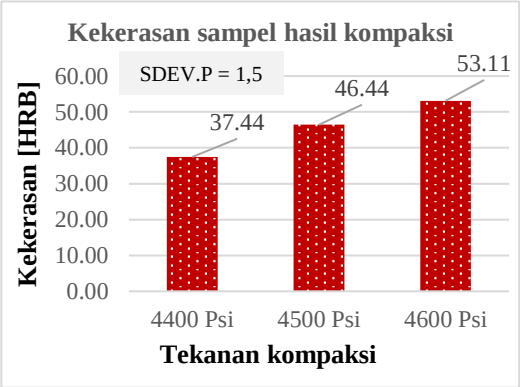

**Gambar 7 Foto sampel hasil kompaksi dua-arah penekanan.**

Hasil uji densitas menggunakan stadar ASTM B962−17 [22] terhadap sembilan sampel tersebut diperoleh hasil seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Grafik pengaruh perbedaan tekanan terhadap sifat densitas komposit.




**Gambar 8 Grafik pengaruh perbedaan tekanan terhadap sifat densitas komposit**

Hasil uji kekerasan Rockwell Brinell menggunakan standar ASTM E110-14 [23] terhadap sampel hasil kompaksi dua-arah penekanan tersebut diperoleh nilai seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Grafik pengaruh perbedaan tekanan terhadap sifat kekerasan komposit, pada SDEV.P.= 1,5.




**Gambar 9 Grafik pengaruh perbedaan tekanan terhadap sifat kekerasan komposit.**

Hasil foto digital terhadap sampel hasil kompaksi dengan tekanan 4.400 Psi dan dengan tekanan 4.600 Psi ditunjukkan pada Gambar 10. Berdasarkan pada foto tersebut, dapat diamati dan diperbandingkan, bahwa sampel hasil kompaksi dua-arah penekanan 4.400 Psi jelas berbeda dengan sampel hasil kompaksi 4.600 Psi. Gambar 10 (b) menunjukkan struktur mikro untuk sampel hasil kompaksi dua-arah penekanan 4.600 Psi tersebut memperlihatkan kondisi ikatan antar muka secara mekanik *(interlocking bonding)* antara matrik aluminium (cenderung berwarna gelap) dengan penguat silika (cenderung warna terang) tampak lebih rapat dan lebih baik dibandingkan gambar 10 (a) yang merupakan sampel hasil kompaksi 4.400 Psi. Hal ini

sesuai dengan hasil uji kekerasan (Gambar 9.), dimana sampel dengan ikatan yang lebih baik dan lebih rapat (gambar 10 (b)). memiliki kekerasan yang lebih tinggi.

(a) (b)

**Gambar 10 Foto Mikro Sampel (a) Foto sampel hasil kompaksi 4400 Psi (b) Foto sampel hasil kompaksi 4400 Psi**

## KESIMPULAN

Berdasarkan data, pembahasan dan Analisa, maka dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi tekanan kompaksi yang diterapkan terhadap komposit matrik logam aluminium hasil daur ulang yang diperkuat 20%.wt serbuk silika menunjukkan semakin tinggi nilai kekerasannya, yaitu pada tekanan kompaksi diterapkan 4.600 Psi nilai kekerasanya adalah 53,11 HRB. Demikian juga sifat kerapatannya atau densitasnya juga semakin meningkat dengan meningkatnya tekanan kompaksi yang diterapkan, dengan densitas tertinggi adalah 2,147 g/cm$^3$.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada berbagai pihak yang telah berkontribusi dalam penelitian ini yaitu:

1. Laboratorium Kimia pada Fakultas MIPA Universitas Brawijaya yang telah membantu dalam pengujian *Particle Size Analyzer* dan Uji Densitas.
2. Laboratorium Sentral Material Universitas Negeri Malang yang telah membantu dalam pengujian senyawa untuk bahan baku pembuatan komposit.
3. Direktur, Ketua Jurusan Teknik Mesin dan Kepala Laboratorium Teknik Material dan Pengelasan serta para Laboran di Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung yang telah berkontribusi pada pembiayaan dan penggunaan sarana prasarana dalam pelaksanaan penelitian ini.

.

## DAFTAR PUSTAKA

[1] P. Garg, P., Jamwal, A., Kumar, D., Sadasivuni, K. K., Hussain, C. M., Gupta, "Advance research progresses in aluminium matrix composites : manufacturing & applications," vol. 8, no. 5, pp. 4924–4939, 2019.

[2] A. Kaw, *Mechanic of Composite Material. Edisi kedua. Amerika Serikat: Taylor & Francis Group, LLC.* 2006.

[3] Suhdi, "Analisa Kekuatan Mekanik Komposit Serat Sabut Kelapa (Cocos Nucifera)," *J. Tek. Mesin*, vol. 2, no. 1, pp. 29–35, 2016.

[4] M. Syahid, A. Hayat, and Aswar, "Effect of Graphite Addition on Aluminum Hybrid Matrix Composite by Powder Metallurgy Method," *Rev. des Compos. des Mater. Av.*, vol. 32, no. 3, pp. 125–132, 2022, doi: 10.18280/rcma.320303.

[5] I. P. A. Zay, F. R. Zulfi, and A. Gurning, "Daur Ulang Scrap Aluminium Sebagai Solusi Alternatif Untuk Mengurangi Ketergantungan ...," *Conf. Pap.*, no. November, 2014, doi: 10.13140/2.1.3237.6006.

[6] Y. S. Sukanto, Soenoko, R., Suprapto, W., 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. 6971–6981, 2020, doi: 10.15282/jmes.14.3.2020.01.0546.

[7] 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, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.926.

[8] I. A. Wahyudie, R. Soenoko, W. Suprapto, 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.

[9] H. A. Prasetya, "Pengaruh Silika Dari Abu Sekam Padi Sebagai Bahan Subtitusi Asbes Untuk Pembuatan Kampas Rem Menggunakan Bahan Karet Alam," *Pros. Semin. Nas. Kulit, Karet dan Plast. Ke-5*, pp. 153–162, 2016.

[10] Sukanto, W. Suprapto, 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.

[11] I. A. Wahyudie, R. Soenoko, W. Suprapto, and Y. S. Irawan, "Optimizing warm compaction parameters on the porosity and hardness of

Bronze/Tin ore waste composites," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 494, no. 1, pp. 0–12, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/494/1/012101.

[12] 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.

[13] R. Suprapto, W & Soenoko, "Teknologi Metalurgi Serbuk, Solo, Pena Mas Publishing, ISBN: 978-602-73670-0-5.," vol. 192, p. 10, 2015.

[14] 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.

[15] 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. February, p. 100377, 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100377.

[16] I. A. Wahyudie, "H OT C OMPACTION P ROCESS O PTIMIZATION FOR I MPROVEMENT T RIBOLOGY B EHAVIOR OF Z IRCONIUM S ILICATE S TRENGTHENED BMC S `," 2021.

[17] M. S. El-Eskandarany, *Mechanical Alloying, Nanotechnology, Material Science and Powder Metallurgy. second edition, Elsevier, ISBN: 978-1-4557-7752-5, See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net*. 2015.

[18] 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, doi: 10.21315/jps2019.30.1.7.

[19] C. Suryanarayana, "Mechanical Alloying: A Novel Technique to Synthesize Advanced Materials," *Research*, vol. 2019, pp. 1–17, 2019, doi: 10.34133/2019/4219812.

[20] Sukanto, R. Soenoko, W. Suprapto, 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.

[21] M. Milani, "Optimization of the pressing process of triangular shaped cutting tool inserts," 2016.

[22] 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, 2013, doi: 10.1520/B0962-17.2.

[23] E110-14, "Standard Test Method for Rockwell and Brinell Hardness of Metallic Materials by Portable Hardness Testers," *ASTM B. Stand.*, pp. 4–8, 2015, doi: 10.1520/E0110-14.2.