

Pembuatan Komposit Matrik Aluminium Diperkuat Silicon Carbida Dan Rice Husk Ash Dengan Metode Metalurgi Serbuk

Arise Graafian Dylan¹, Sugiyarto¹, Agus Wanto¹, Abdul Budi¹, Sukanto^{1*}

¹) Teknik Mesin dan Manufaktur, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung
Kawasan Industri Airkantong Sungailiat Bangka-33211- Telepon (0717) 93586

*Corresponding author: sukanto@polman-babel.ac.id

ABSTRAK

Kampas rem yang mengandung asbestos sangat berbahaya bagi kesehatan manusia, sehingga diperlukan inovasi material yang lebih ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh fraksi volume dan suhu sintering terhadap densitas dan kekerasan komposit matriks aluminium daur ulang, dengan penguat paduan antara silikon carbida dan abu sekam padi dengan metode metalurgi serbuk, dengan variasi fraksi volume penguat sebesar 10%, 15%, dan 20%. Proses pencampuran serbuk digunakan metode pemaduan mekanik dengan mesin ball mill horizontal, sedangkan proses kompaksi panas digunakan metode dua arah penekanan dengan mesin pompa hidrolik yang dilengkapi dengan alat pembaca tekanan pada tekanan kompaksi 6000 PSI. Temperatur sintering divariasikan pada suhu 550 °C, 580 °C, 610 °C. Pengujian densitas mengacu hukum Archimedes dengan standar ASTM B 962-17, sedangkan pengujian kekerasan menggunakan Brinel Portabel dengan standar ASTM E110-14. Hasil uji densitas dan kekerasan menunjukkan nilai semakin meningkat dengan banyaknya matriks yang digunakan. Sampel dengan fraksi volume 90%, nilai densitasnya tertinggi adalah 1,72 g/cm³ dan nilai kekerasan tertinggi adalah 40 HB. Berdasarkan analisis struktur mikro, kondisi ini terjadi dikarenakan durasi proses pemaduan mekanik serbuk yang relatif rendah telah mengakibatkan terjadinya penggumpalan serbuk penguat, dan berdampak pada ikatan *interlocking* semakin rendah dengan meningkatnya serbuk penguat yang digunakan.

ABSTRACT

Brake lining components that contain asbestos are dangerous for human health, so innovation materials environmentally friendly is needed. This research aims to determine the effect of volume fraction and sintering temperature to density and hardness of recycled aluminum matrix composites, reinforced with silicon carbide and rice husk ash using the powder metallurgy method, with varying reinforcement volume fractions 10%, 15%, and 20%. The powder mixing process uses a mechanical alloying method, while the hot compaction process uses a two-way pressing method with a hydraulic pump machine compaction pressure of 6000 PSI. The sintering temperature was varied at 550°C, 580°C, 610°C. Density testing refers to Archimedes' law with the ASTM B 962-17 standard, while hardness testing uses Portable Brinel with the ASTM E110-14 standard. The density and hardness test results show that the value increases with the amount of matrix used. For samples volume fraction 90%, the highest density value is 1.72 g/cm³ and the highest hardness value is 40HB. Based on microstructural analysis, this condition occurs because the relatively low duration of the powder mechanical alloying process has resulted in agglomeration of the reinforcing powder, and the impact interlocking bond becomes lower with increasing reinforcing powder used.

Keywords: aluminum matrix composite; brake lining; rice husk ash, powder metallurgy, silicon carbide

PENDAHULUAN

Material komposit adalah material yang terbentuk dari pencampuran dua bahan atau lebih. Bahan yang akan dicampurkan memiliki karakteristik yang berbeda dari satu bahan dan

bahan lainnya, serta berbeda dari sifat material yang digunakan untuk membuatnya [1]. Bahan komposit dapat dikelompokkan menjadi tiga bagian berdasarkan jenis matriksnya, yaitu komposit matrik logam (KML), komposit matrik polimer (KMP) dan komposit matrik keramik (KMK) [2]. Diera

sekarang ini, banyak penelitian ekstensif dan pengembangan komposit matriks logam, atau KML, dengan tujuan memproduksi suku cadang kendaraan bermotor. Komposisi komposit ini terdiri dari matriks aluminium dengan penguat yang meliputi nitrat, oksida logam, karbon, karbida, dan serat alam [3]. Aluminium digunakan karena banyak keuntungannya, seperti sifatnya yang ringan, ketahanannya yang luar biasa terhadap karat, dan titik lelehnya rendah, sehingga mengurangi biaya daur ulang [4] [5]. Proses daur ulang scrap aluminium hanya memerlukan konsumsi energi sebesar $\pm 5\%$ dari konsumsi aluminium primer, sehingga dapat menghemat energi hingga $\pm 95\%$ [6] [7]. Selain itu, mengingat permintaan tinggi untuk logam aluminium di pasar Indonesia, yang saat ini mencapai 1 juta ton per tahun [8]. Pengembangan dan penggunaan aluminium scrap daur ulang sebagai bahan dasar pembuatan komposit matriks logam aluminium diperlukan. Penggunaan aluminium scrap ini selain lebih hemat biaya, juga dapat membantu mengurangi masalah kekurangan pasokan logam aluminium di tingkat internasional dan domestik [9][10]. Secara umum, tujuan dari bahan penguat adalah untuk meningkatkan kekerasan, ketahanan gesekan, dan operasional suhu tinggi, karakteristik ini membuatnya menjadi pilihan yang sangat baik untuk digunakan sebagai penguat dalam komposit yang mengandung matriks aluminium. Oksida mineral logam seperti alumina (Al_2O_3), zirkonium silikat $Zr(SiO_2)$, silikon karbida (SiC), Ash, dan lainnya merupakan material yang dapat meningkatkan nilai material ini [11].

Silikon karbida atau biasanya yang disebut sebagai carborondum merupakan salah satu senyawa kimia yang dilambangkan dengan lambang SiC (*Silicon Carbide*), serbuk silikon karbida bisa diperoleh dari silika mineral, nabati, dan sintetis. Serbuk silikon karbida bisa disatukan melalui proses sintering, yang kemudian membentuk material keramik non-oksida yang sangat keras dan memiliki konduktivitas termal yang tinggi. Selain itu SiC juga dapat sebagai konduktor yang baik [12].

Limbah pertanian yang dihasilkan dari proses penggilingan padi disebut *Rice Husk Ash* (RHA). *Rice Husk Ash* merupakan bagian dari sekam padi yang tersisa setelah biji padi dipisahkan dari sekamnya. Sekam padi yang terbakar menghasilkan abu yang dikenal sebagai *Rice Husk Ash*, yang memiliki sejumlah besar silika sehingga membuatnya memiliki sifat yang unik dan mungkin bermanfaat dalam berbagai aplikasi. Selain itu sekam *Rice Husk Ash* juga memiliki beberapa kelebihan yaitu mengurangi biaya proses produksi, mereduksi terjadinya Al_4C_3 (Aluminium carbide) yang bersifat korosif dan menjadi bahan alternatif baru untuk pengganti asbes [13].

Proses pembuatan komposit dapat dilakukan dengan berbagai cara, seperti: *seperti stir casting, powder metallurgy, compo casting, friction stir casting, roll bonding* dan lain-lain [3]. Metode metalurgi serbuk, memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan metode lainnya, sehingga pembuatan komposit menggunakan metode ini semakin populer saat ini [14] [15]. Pembuatan komposit dengan metode metalurgi serbuk memiliki beberapa keuntungan, salah satunya adalah energi proses yang rendah [16]. Metode metalurgi serbuk juga lebih hemat biaya karena 95% bahan baku yang digunakan menjadi produk jadi, sehingga sedikit bahan yang hilang atau tidak digunakan [17] [18]. Proses ini terdiri dari tiga tahap utama: pencampuran serbuk matriks dengan serbuk penguat, kompaksi atau penekanan, dan sintering [19]. Proses kompaksi adalah proses yang sangat penting untuk meningkatkan kerapatan dan densitas material komposit. Dalam metalurgi serbuk, proses kompaksi dapat dilakukan dengan dua metode, yaitu kompaksi panas dan kompaksi dingin [20] [1].

Proses kompaksi panas sampel dipanaskan hingga suhu tertentu selama proses penekanan, sedangkan pada proses kompaksi dingin penekanan sampel dilakukan pada suhu ruangan tanpa pemanas. Dalam pembuatan komposit logam, proses kompaksi panas sering digunakan, karena proses ini meningkatkan sifat pembasahan pada serbuk matriks sehingga terjadi ikatan mekanik yang

lebih baik antara muka serbuk dan parikel atau ikatan interlocking antara serbuk matrik dan serbuk penguatnya selama proses penekanan [21]. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian dengan penggunaan matriks aluminium yang diperkuat dengan *hybrid* (silikon karbida dan *Rice Husk Ash*) sebagai bahan alternatif yang baru untuk material rem gesek. Hal ini dimungkinkan dengan meneliti cara membuat formula yang baru dengan campuran bahan bebas asbes yang memiliki komposisi yang baik.

METODE PENELITIAN

Penelitian pembuatan komposit matrik aluminium ini dilakukan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut:

Studi Litelatur dan Perancangan Parameter Proses

Studi literatur diperlukan sebagai pendukung penelitian untuk menemukan dan mempelajari ide-ide teori yang dapat digunakan sebagai acuan dan untuk menemukan data pendukung. Setelah menyelesaikan studi literalur, langkah berikutnya adalah menciptakan parameter proses. Ini dilakukan setelah memahami penelitian yang akan dilakukan dengan membaca publikasi penelitian terdahulu.

Persiapan Alat dan Bahan

Pembuatan sampel penelitian dilakukan di bengkel lapalo di Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung. Kemudian, uji densitas dan kekerasan dilakukan di Laboratorium Material Jurusan Teknik Mesin Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung. Penelitian ini menggunakan bahan dan peralatan sebagai berikut:

Bahan yang digunakan yaitu:

- Serbuk Aluminium dengan kandungan 83,4% Al, 10,06% Si, 2,67% Cu, dan 3,87% unsur lain

- Serbuk Silicon Karbida dengan kandungan 99,3% Si, 0,22% Ca, 0,215% Fe dan 0,265% unsur lain.
- Serbuk *Rice Husk Ash* dengan kandungan 82,7 % Si, 2,97% K, dan 4,74% Ca, dan 9,59% unsur lain

Peralatan yang digunakan yaitu:

- Timbangan digital.
- *Ball mill machine*.
- Mesin press hidrolik dua arah.
- Cetakan.
- *Thermocouple*.
- Oven.
- Gelas ukur.
- Alat uji kekerasan portable.
- Alat uji densitas.
- Alat digital mikroskopik

Pencampuran dengan Pemaduan Mekanik (*mechanical alloying*)

Metode pemaduan mekanik digunakan untuk menggabungkan serbuk aluminium daur ulang dengan serbuk silikon karbida dan serbuk *rice husk ash*. Parameter yang digunakan seperti rasio berat bola (BPR) 10:1, kecepatan mesin 90 Rpm, dengan waktu pencampuran selama 2 jam. Dalam studi ini, menggunakan campuran serbuk dengan perbandingan Al 90% : 10% (SiC + RHA), Al 85% : 15% (SiC + RHA), dan Al 80% : 20% (SiC + RHA) setiap sampel memiliki berat 35 gram. Serbuk aluminium yang didaur ulang, serbuk silikon karbida, dan serbuk *rice husk ash* yang telah di campur dalam satu kali pencampuran memiliki berat 350 gram, dan proses penimbangan serbuk dilakukan dengan timbangan digital dengan ketelitian 0,01. Kemudian, setelah selesai melakukan proses penimbangan serbuk tersebut di masukkan ke dalam tabung di mesin *ball mill horizontal* untuk melakukan proses pencampuran. Mesin ini memiliki bola-bola kecil berdiameter 30 mm dan 25 mm dengan berat masing-masing bola yaitu 111,18 gram dan 65.96 gram. Kekerasan rata-rata bola tersebut adalah 61 HRC dan 58,2 HRC.

Pemadatan dan Penekanan Dua Arah

Setelah selesai melakukan proses pemaduan mekanik maka, langkah berikutnya adalah melakukan proses kompaksi panas. Proses kompaksi panas dilakukan dengan tujuan untuk mengurangi volume campuran serbuk yang telah selesai di *mixing*. Mesin press hidrolik memiliki dua mesin hidrolik yaitu (hidrolik atas dan hidrolik bawah) yang digunakan untuk melakukan proses kompaksi panas. Mesin press hidrolik ini juga dilengkapi dengan alat pengukur tekanan (*pressure gauge*). Dalam proses kompaksi panas ini menggunakan metode penekanan dua arah dikarenakan metode penekanan dua arah memiliki keunggulan yaitu tekanan atas bawahnya merata. Dalam proses kompaksi panas, alat *Thermocouple* digunakan untuk memanaskan serbuk. Kemudian untuk cetakkannya berbentuk cincin yang memiliki diameter luar yaitu 50 mm dan diameter dalamnya 20 mm. Sebelum melakukan proses kompaksi panas, cetakan terlebih dahulu diletakkan di mesin kompaksi dan serbuk yang telah dicampur secara merata dimasukkan ke dalam cetakan. Selanjutnya, untuk menekan serbuk, besi bulat berbentuk cincin dipasang di atas cetakan. Cetakan kemudian ditekan dengan hidrolik dua arah yang terdiri dari hidrolik atas dan bawah, dan dilengkapi dengan alat ukur tekanan. Tekanan kompaksi panas adalah 6000 Psi ditahan dengan waktu 15 menit. Proses kompaksi panas berlangsung pada suhu 550°C, 580°C, dan 610°C di area dapur pemanas. Setelah proses tersebut selesai, tunggu sampai cetakan dingin dan keluarkan sampel dari cetakan.

Validasi Spesimen

Pada langkah ini, bahan uji diperiksa secara visual untuk memastikan bahwa sampel yang dibuat telah memenuhi persyaratan, seperti bentuk yang tidak sempurna (cacat), retak, atau pecah. Jika sampel masih memiliki kekurangan, maka sampel akan dicetak ulang dengan bahan dan peralatan yang telah disiapkan sesuai dengan diagram alir yang telah disusun.

Sintering (Pemanasan)

Tujuan dari proses sintering adalah untuk meningkatkan ikatan antar partikel pada serbuk. Saat proses dijalankan, sampel yang telah diverifikasi dimasukkan ke dalam oven. Dalam proses pemanasan, sampel diberikan suhu 550°C, 580°C, dan 610°C serta waktu tahan selama 20 menit. Setelah proses sintering selesai, sampel dikeluarkan dari oven dan didinginkan pada suhu ruangan.

Uji Densitas

Untuk menguji densitas, sampel ditimbang sebelum dimasukkan ke dalam air atau dalam keadaan kering dan setelahnya. Timbangan digital digunakan untuk menghitung massa sampel dan membandingkannya dengan massa sampel dalam keadaan basah dan kering. Uji densitas dilakukan sesuai dengan standar ASTM B962-17.

Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan dengan menggunakan perangkat uji kekerasan portable yang memiliki beban tekanan sebesar 2 kg dan menggunakan indentor bola dengan diameter 2 mm. Alat uji ini dipilih karena cukup sederhana dan hasil uji kekerasan dapat langsung dibaca pada layar alat uji portable serta nilai yang tertera dapat langsung dicatat. Proses pengujian kekerasan mengikuti standar ASTM E110-14.

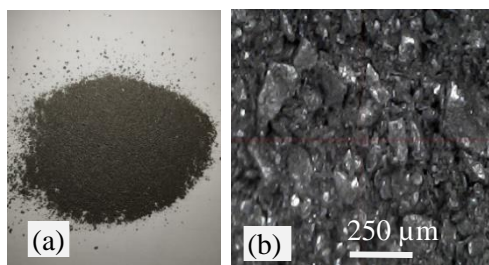
Pengolahan Data

Selanjutnya, data dari pengujian densitas dan kekerasan dimasukkan ke dalam tabel dan grafik. Untuk mengetahui bagaimana spesimen komposit matrik aluminium yang diperkuat SiC dan RHA bekerja, penelitian ini menggunakan metode eksperimen faktorial dengan 3 tingkat faktor fraksi volume dan suhu sintering untuk menganalisis data. Dengan menggunakan banyak faktor, tingkat antar parameter dapat ditingkatkan hingga mendapatkan kombinasi 9 sampel pengujian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Domain Komputasi

Hasil dari pencampuran dengan menggunakan metode *Mechanical Alloying* selama 2 jam di tunjukkan pada gambar 1(a) dibawah ini.

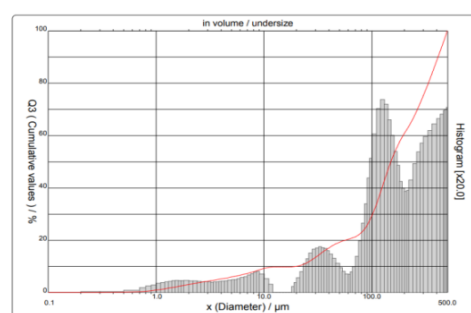


Gambar 1. Hasil pencampuran dengan metode *Mechanical Alloying* selama 2 jam, (a) serbuk; (b) pembesaran serbuk

Berdasarkan gambar tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan menggunakan metode *mechanical alloying* hasil pencampurannya akan lebih homogen. Pengelasan dingin yang terjadi antara matrik aluminium dengan penguat hybrid ditunjukkan pada gambar 2(b) pembesarrannya, sehingga akan membentuk ikatan *interlocking* saat dilakukan pada proses sintering. Menurut hasil pengujian *Particle Size Analyzer* (PSA) merk cilas1090 Dry yang dilakukan di laboratorium FMIPA-KIMIA, Universitas Brawijaya bahwa ukuran distribusi serbuk sebanyak 10 gram didapatkan rata-rata D50:149.70 µm. Dengan hasil pengujian bisa dilihat di gambar 2 dibawah ini.

Sampel yang digunakan pada penelitian ini berbentuk lingkaran dengan diameter dalam 20 mm, diameter luar 50 mm, tinggi sample 8 mm dan berat 35 gram. Penelitian ini menggunakan proses kompaksi dua arah. Proses penekanan kompaksi dua arah lebih baik dibandingkan dengan kompaksi satu

arah. Hal ini dikarenakan pada proses penekanan kompaksi dua arah bidang yang paling rapuh terletak pada bagian tengah sampel, sedangkan yang paling kuat terletak pada permukaan sampel [22].



Gambar 2. Grafik sebaran serbuk D50:149.70 dengan pengujian PSA

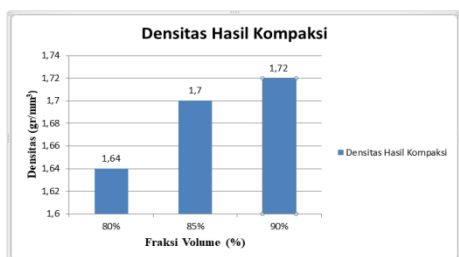


Gambar 3. Hasil hasil uji penekanan dua arah

Sampel yang dihasilkan dari proses kompaksi sebanyak 9 sampel seperti pada Gambar 3. dibawah ini, dengan masing-masing 3 sampel untuk fraksi volume 80%, 85%, dan 90% serta tekanan kompaksi yang digunakan sebesar 6000 Psi.

Hasil Uji Densitas

Pengujian densitas yang mengacu pada standar ASTM B962-17 yang dilakukan pada 9 sampel dapat dilihat pada Gambar 4. dibawah ini. Dari gambar grafik tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin banyak matrik aluminium yang digunakan maka semakin tinggi nilai densitasnya.



Gambar 4. Grafik pengaruh perbedaan fraksi volume terhadap nilai densitas komposit

Hasil Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan yang mengacu pada standar ASTM E110-14 yang dilakukan pada 9 sampel dapat dilihat pada gambar 5 dibawah ini. Dari gambar grafik tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin banyak matrik aluminium yang digunakan maka semakin tinggi nilai densitasnya.

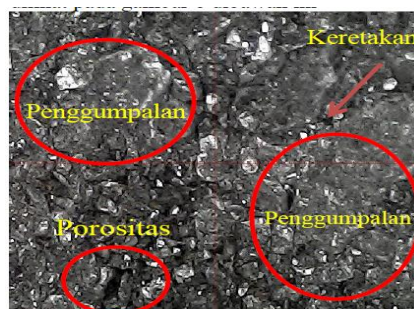


Gambar 5. Grafik pengaruh perbedaan fraksi volume terhadap nilai densitas komposit

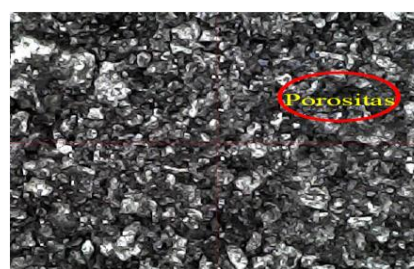
Hasil Uji Mikroskop Digital

Berdasarkan hasil uji digital microscope menggunakan pembesaran 50X-1600X pada sample yang telah dikompaksi dapat dilihat pada Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8. dibawah ini.

Dari hasil pengujian menggunakan digital microscope seperti ditunjukkan pada Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8 tampak jelas bahwa kerapatan paling baik pada sample 90% dikarenakan ukuran penyebaran serbuk lebih merata, sedangkan pada sample 80% dan 85% masih terdapat banyak penggumpalan, keretakan, dan porositas



Gambar 6, Hasil uji mikroskopik 80% matrik



Gambar 7, Hasil uji mikroskopik 85% matrik



Gambar 8. Hasil uji mikroskopik 90% matrik

KESIMPULAN

Berdasarkan data yang telah didapatkan pada pengujian sebelumnya bisa disimpulkan bahwa semakin banyak matrik aluminium yang digunakan maka tingkat kekerasannya akan semakin tinggi yaitu 40 HB pada fraksi volume 90%, demikian juga dengan nilai densitas yang tertinggi terdapat pada fraksi volume 90% dengan nilai 1,72gr/mm³. Hal ini

dikarenakan pencampuran serbuk matrik dengan serbuk penguat yang kurang homogen sehingga terjadi penggumpalan, yang mengakibatkan ikatan antar muka *interlocking* serbuk matrik dengan serbuk penguat tidak maksimum atau lemah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. 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.
- [2]. A. K. Kaw, *Mechanic of Composite Material.*, Edisi kedua. Amerika Serikat: Taylor & Francis group ,LLC, 2006.
- [3]. 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.
- [4]. 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.
- [5]. J. U. Jason, "Analisa Laju Korosi Logam tak Sejenis pada Berbagai Jenis Logam," *LONTAR J. Tek. Mesin Undana*, vol. 01, pp. 26–33, 2014, [Online]. Available: <https://ejurnal.undana.ac.id/index.php/LJTMU/article/view/445/398>
- [6]. 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.
- [7]. W. B. Petrus K. Meol, Erick U. K. Maliwemu and Y. M. Pell., "Pengaruh Tegangan Listrik Dan Waktu Pada Krom Plating Terhadap Keausan Pada Hasil Produk Pengecoran Aluminium Scrap," *LONTAR J. Tek. Mesin UNDANA*, vol. LJTMU: Vol, 2016.
- [8]. E. Sutrisno, (2022) "Indonesia Menuju Industri Aluminium Berdikari", Indonesia.go.id., Rabu, 20 April 2022, 6 WIB, diakses 20November 2022 pukul 01.30 WIB., 2022.
- [9]. 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, no. June, pp. 213–245, 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.04.017.
- [10]. A. Ciprian, Bulei. Imre, Kiss. Vasila, "Development of metal matrix composites using recycled secondary raw materials from aluminium wastes," vol. 45, 2021.
- [11]. 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.
- [12]. N. Devi, C. #1, K. Srinivasa, P. #2, and V. M. Kumar, "Characterization of Rice Husk Ash and SiC Reinforced Aluminium Metal Matrix Hybrid Composite," *SSRG Int. J. Mech. Eng. (SSRG-IJME)-Special*, pp. 329–332, 2017, [Online]. Available: www.internationaljournalsrsg.org
- [13]. G. S. Gehlen *et al.*, "Tribological assessment of rice husk ash in eco-friendly brake friction materials," *Wear*, vol. 516–517, no. December, p. 204613, 2023, doi: 10.1016/j.wear.2022.204613.
- [14]. 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.

- [15]. I. A. Wahyudie, R. Soenoko, W. Suprpto, 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.
- [16]. 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. Lingkungan*, pp. 141–146, 2021, doi: 10.29303/jstl.v0i0.252.
- [17]. S. Wahyono, "Teknologi Metalurgi Serbuk. Malang: Penamas, 2015.
- [18]. 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.
- [19]. 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.
- [20]. Sukanto, R. Soenoko, W. Suprpto, and 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.
- [21]. M. S. El-Eskandarany, "Mechanical Alloying: Nanotechnology, Materials Science and Powder Metallurgy," *William Andrew-an Impr. Elsevier*, no. July, pp. 1–350, 2015.
- [22]. E. Ricky, "Proses Metalurgi Serbuk Pada Fabrikasi Komposit Matrik Aluminium Diperkuat Pasir Silika Tailing," *Skripsi Politek. manufaktur bangsa belitung*, pp. 1–88, 2022.