PENGARUH KOMPOSISI PENGUAT DAN TEKANAN KOMPAKSI TERHADAP KEKERASAN DAN DENSITAS KOMPOSIT ALUMINIUM KAMPAS REM

Sukanto [1], Samukri [2*], Harwadi [1], Mego Wahyudi [1]

[1] Jurusan Rekaya Mesin, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

[2] Program Studi D-IV Teknik Mesin dan Manufaktur, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

Kawasan Industri Air Kantung, Sungailiat, Bangka, Kepulauan Bangka Belitung

samukridamar19@gmail.com [1]

Abstrak

Pengembangan kampas rem non-asbes memerlukan material yang memiliki kekerasan memadai dengan densitas yang tetap dapat dikendalikan. Penelitian ini mengevaluasi komposit matriks aluminium yang diperkuat campuran serbuk kuningan, serbuk besi, dan *coconut shell ash* (CSA) melalui proses metalurgi serbuk. Fraksi penguat divariasikan sebesar 5%, 11%, dan 17%, sedangkan tekanan kompaksi dua arah ditetapkan pada 5600, 6000, dan 6400 psi. Pemaduan mekanik dilakukan menggunakan *horizontal ball mill* selama 4 jam pada 90 rpm dengan *ball-to-powder ratio* 10:1. Sebanyak 27 spesimen diuji; kekerasan diukur dengan alat uji portabel mengacu ASTM E110-14, sedangkan densitas ditentukan menggunakan prinsip Archimedes mengacu ASTM B962-17. Perhitungan kembali data mentah menunjukkan rerata kekerasan berdasarkan tekanan meningkat dari 91,11 HB pada 5600 psi menjadi 123,04 HB pada 6000 psi dan 137,33 HB pada 6400 psi. Rerata kombinasi tertinggi sebesar 144,67 HB diperoleh pada penguat 17% dan tekanan 6400 psi. Respons densitas bersifat tidak linier, dengan rerata kombinasi tertinggi 1,431 g/cm³ pada penguat 5% dan tekanan 6400 psi. Hasil ini menunjukkan bahwa tekanan kompaksi memiliki hubungan yang lebih jelas dengan kekerasan dibandingkan densitas, sedangkan fraksi penguat dan distribusi partikel tetap memengaruhi respons material.
.

Kata kunci : *coconut shell ash*, kampas rem, kekerasan, komposit matriks aluminium, tekanan kompaksi.

Abstract

Non-asbestos brake-pad development requires materials with adequate hardness while retaining a controllable density. This study evaluates aluminum-matrix composites reinforced with a mixture of brass powder, iron powder, and coconut shell ash (CSA) produced by powder-metallurgy processing. The reinforcement fraction was varied at 5%, 11%, and 17%, while two-direction compaction pressure was set at 5600, 6000, and 6400 psi. Mechanical alloying was carried out in a horizontal ball mill for 4 h at 90 rpm with a ball-to-powder ratio of 10:1. Twenty-seven specimens were evaluated; hardness was measured using a portable tester referring to ASTM E110-14, while density was determined by the Archimedes method referring to ASTM B962-17. Recalculation of the raw data showed that mean hardness across pressures increased from 91.11 HB at 5600 psi to 123.04 HB at 6000 psi and 137.33 HB at 6400 psi. The highest combination mean was 144.67 HB at 17% reinforcement and 6400 psi. Density showed a non-linear response, with the highest combination mean of 1.431 g/cm³ at 5% reinforcement and 6400 psi. These results indicate that compaction pressure has a clearer relationship with hardness than with density, while reinforcement fraction and particle distribution still influence the final response.

Key words : *aluminum matrix composite, brake pad, coconut shell ash, compaction pressure, hardness.*

PENDAHULUAN

Kampas rem bekerja melalui kontak gesek untuk menurunkan kecepatan kendaraan, sehingga karakter material penyusunnya perlu mendukung ketahanan terhadap deformasi dan pemakaian berulang. Pengembangan material *non-asbestos* mendorong penggunaan komposit yang mampu memadukan matriks logam dengan penguat berbasis serbuk. Komposit matriks aluminium menjadi salah satu pilihan karena aluminium relatif ringan, mudah diproses, dan dapat dikombinasikan dengan penguat untuk mengubah kekerasan maupun karakter fisiknya [1], [2].

Metode metalurgi serbuk banyak digunakan pada pengembangan komposit matriks aluminium karena komposisi bahan dapat diatur sejak tahap pencampuran, kemudian campuran dipadatkan untuk membentuk specimen [3]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa tekanan kompaksi dapat memengaruhi densitas dan kekerasan material, walaupun besar pengaruhnya dapat berbeda bergantung pada jenis penguat, ukuran partikel, homogenitas campuran, dan kondisi proses [2], [4].

Pemanfaatan limbah pertanian sebagai penguat juga berkembang karena dapat menambah nilai guna material yang sebelumnya kurang dimanfaatkan [5]. *Coconut shell ash* (CSA) mengandung fase mineral yang dapat berperan sebagai partikel penguat atau pengisi pada matriks aluminium [6]. Kajian pada komposit aluminium-CSA melaporkan perubahan kekerasan dan densitas setelah penambahan CSA, tetapi responsnya dipengaruhi oleh kadar penguat dan proses fabrikasi yang digunakan [7], [8].

Penelitian ini menggunakan alumunium sebagai matriks dengan campuran serbuk kuningan, serbuk besi, dan CSA sebagai penguat. Kebaruan praktis penelitian terletak pada penggunaan tiga jenis penguat secara bersamaan dengan variasi fraksi total 5%, 11%, dan 17% serta tekanan kompaksi 5600, 6000, dan 6400 psi. Tujuan penelitian adalah menganalisis kecenderungan perubahan kekerasan dan densitas akibat variasi komposisi penguat dan tekanan kompaksi, serta menentukan kombinasi yang menghasilkan respons tertinggi pada data pengujian yang tersedia.

METODE PENELITIAN

1. Rancangan Penelitian

Penelitian menggunakan rancangan faktorial dengan dua faktor. Faktor pertama adalah fraksi total penguat, yaitu 5%, 11%, dan 17%, sedangkan faktor kedua adalah tekanan kompaksi, yaitu 5600, 6000, dan 6400 psi. Masing-masing kombinasi dibuat tiga spesimen sehingga diperoleh 27 spesimen. Fraksi aluminium yang bersesuaian dengan variasi penguat adalah 95%, 89%, dan 83%. Rancangan perlakuan ditunjukkan pada Tabel 1.

2. Bahan dan Proses Pembuatan

Bahan utama yang digunakan adalah serbuk aluminium pasaran sebagai matriks, sedangkan serbuk kuningan (CuZn), serbuk besi (Fe), dan *Coconut Shell Ash* (CSA) digunakan sebagai penguat. CSA yang digunakan pada penelitian ini disiapkan pada ukuran *mesh* 80. Serbuk aluminium, kuningan, dan CSA ditunjukkan berturut-turut pada Gambar 1, Gambar 2 dan Gambar 3.

Tabel 1. Rancangan faktorial penelitian

Komposisi Al:penguat	Tekanan (psi)
95% : 5%	5600
95% : 5%	6000
95% : 5%	6400
89% : 11%	5600
89% : 11%	6000
89% : 11%	6400
83% : 17%	5600
83% : 17%	6000
83% : 17%	6400



Gambar 1. Serbuk Aluminium



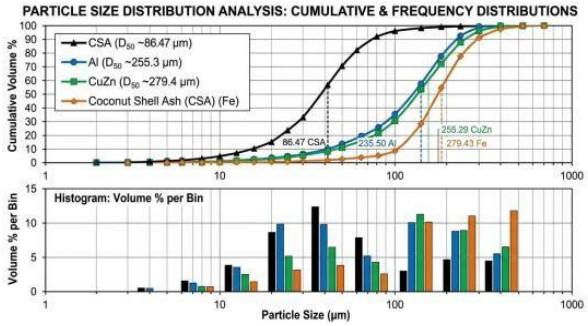
Gambar 2. Serbuk Serbuk Kuningan (CuZn)

Pemaduan mekanik dilakukan menggunakan *horizontal ball mill* pada kecepatan 90 rpm selama 4 jam dengan *Ball-to-Powder Ratio* (BPR) 10:1. Berdasarkan hasil *Particle Size Analysis* pada laporan penelitian, ukuran median partikel (D50) CSA sebesar 86,47 µm, CuZn 255,29 µm, aluminium 235,50 µm, dan Fe 279,43 µm.



Gambar 3. Serbuk *Coconut Shell Ash* (CSA) *mesh* 80

Gambar 4 menunjukkan distribusi kumulatif dan frekuensi ukuran partikel bahan penyusun komposit. Nilai D50 menunjukkan bahwa CSA memiliki ukuran median partikel paling kecil, yaitu 86,47 µm, diikuti aluminium 235,50 µm, CuZn 255,29 µm, dan Fe 279,43 µm. Perbedaan ukuran partikel tersebut memungkinkan partikel CSA yang lebih halus mengisi sebagian celah di antara partikel logam yang lebih besar, sehingga distribusi ukuran partikel berpotensi memengaruhi kerapatan dan homogenitas campuran [9].



Gambar 4 Distribusi ukuran partikel bahan penyusun komposit

Campuran serbuk dipadatkan dengan sistem penekanan dua arah menggunakan cetakan berbentuk cincin, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Variasi tekanan yang digunakan adalah 5600, 6000, dan 6400 psi dengan waktu tahan 15 menit. Pembahasan pada artikel ini difokuskan pada data pra-sintering yang tersedia pada laporan proyek akhir, sehingga hasil yang dibahas merupakan karakter awal hasil pencampuran dan kompaksi, bukan validasi akhir performa kampas rem pada kondisi operasi.



Gambar 5. Hasil cetakan spesimen komposit

3. Pengujian dan Pengolahan Data

Kekerasan diukur pada tiga titik permukaan setiap spesimen menggunakan alat uji kekerasan portabel dengan acuan ASTM E110-14 [10]. Nilai tiga titik kemudian dirata-ratakan untuk mewakili kekerasan satu spesimen. Untuk menghindari kesalahan penyalinan pada kolom rerata di laporan, rerata pada artikel ini dihitung kembali dari tiga nilai pengukuran mentah setiap specimen.

Densitas ditentukan dengan prinsip Archimedes mengacu ASTM B962-17 [11]. Massa spesimen diukur dalam kondisi kering dan saat tersuspensi di dalam air. Densitas dihitung dengan Persamaan (1), dengan m_s sebagai massa kering, m^g sebagai massa tersuspensi, dan ρH_2O sebagai densitas air.

$$\rho = m_s / (m_s - m^g) \times \rho H_2O \quad \text{..... (1)}$$

Data selanjutnya dikelompokkan berdasarkan sembilan kombinasi perlakuan. Setiap nilai pada Tabel 2 merupakan rerata dari tiga spesimen pada kombinasi yang sama. Pengolahan ini digunakan untuk memperjelas kecenderungan pengaruh komposisi penguat dan tekanan kompaksi terhadap dua respons yang diamati.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Kekerasan Komposit

Hasil Hasil pengolahan ulang menunjukkan bahwa tekanan kompaksi memberikan kecenderungan yang paling jelas terhadap kekerasan. Jika seluruh komposisi dirata-ratakan, kekerasan meningkat dari 91,11 HB pada 5600 psi menjadi 123,04 HB pada 6000 psi dan 137,33 HB pada 6400 psi. Kecenderungan ini sejalan dengan penelitian AMC lain yang menunjukkan bahwa peningkatan tekanan kompaksi dapat memperbesar kontak

antarpartikel dan menaikkan kekerasan setelah serbuk dipadatkan [2], [12].

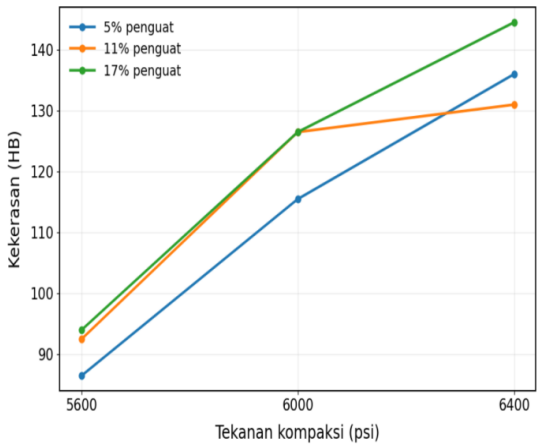
Tabel 2. Rerata hasil pengujian pada setiap kombinasi perlakuan

Penguat / tekanan	Kekerasan (HB)	Densitas (g/cm³)
5% / 5600	86,67	1,277
5% / 6000	115,78	1,253
5% / 6400	136,22	1,431
11% / 5600	92,44	1,224
11% / 6000	126,89	1,197
11% / 6400	131,11	1,289
17% / 5600	94,22	1,260
17% / 6000	126,44	1,260
17% / 6400	144,67	1,332

Pada level komposisi, rerata kekerasan seluruh tekanan meningkat bertahap dari 112,89 HB pada penguat 5%, menjadi 116,81 HB pada 11%, dan 121,78 HB pada 17%. Meskipun demikian, kenaikannya tidak selalu seragam pada setiap tekanan. Hal ini menunjukkan bahwa fraksi penguat tidak bekerja secara terpisah dari proses kompaksi; distribusi partikel, ukuran partikel, dan keseragaman campuran ikut menentukan respons lokal permukaan terhadap penetrasi [4].

Kombinasi dengan rerata kekerasan tertinggi adalah penguat 17% pada 6400 psi sebesar 144,67 HB. Pada data per spesimen, nilai tertinggi mencapai 155 HB pada salah satu spesimen penguat 11%–6000 psi dan salah satu spesimen penguat 17%–6400 psi. Perbedaan antara nilai maksimum spesimen dan rerata kombinasi penting diperhatikan karena satu nilai tinggi belum selalu menunjukkan kestabilan proses. Penelitian sejenis pada AMC juga memperlihatkan bahwa komposisi dan tekanan dapat menghasilkan perubahan kekerasan yang berbeda akibat kondisi distribusi penguat [13], [14].

Nilai kekerasan yang tinggi belum cukup untuk menyatakan material langsung layak sebagai kampas rem. Beberapa penelitian kampas rem komposit menggunakan kekerasan sebagai salah satu indikator, tetapi tetap memerlukan pengujian lain seperti keausan, koefisien gesek, dan stabilitas termal untuk mengevaluasi performa pada kontak pengereman [1], [15]. Oleh karena itu, hasil kekerasan penelitian ini lebih tepat digunakan sebagai tahap penyaringan komposisi untuk pengujian lanjutan.



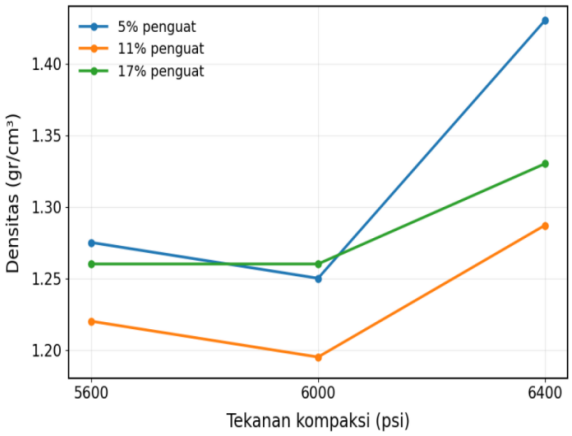
Gambar 6 Pengaruh tekanan kompaksi terhadap rerata kekerasan

2. Densitas Komposit

Berbeda dengan kekerasan, respons densitas tidak menunjukkan kenaikan yang benar-benar linier. Rerata densitas berdasarkan tekanan adalah 1,254 g/cm³ pada 5600 psi, turun sedikit menjadi 1,236 g/cm³ pada 6000 psi, kemudian meningkat menjadi 1,351 g/cm³ pada 6400 psi. Nilai ini menunjukkan bahwa penambahan tekanan dapat membantu pemadatan, tetapi hasil akhirnya tetap dipengaruhi oleh rongga, distribusi partikel, serta perbedaan densitas masing-masing bahan penyusun. [16], [17].

Jika dilihat berdasarkan fraksi penguat, densitas rata-rata adalah 1,320 g/cm³ pada 5%, 1,237 g/cm³ pada 11%, dan 1,284 g/cm³ pada 17%. Respons tidak linier tersebut sesuai dengan karakter komposit yang mengandung CSA karena penambahan partikel berbasis abu dapat menurunkan densitas bulk, sedangkan porositas dan kualitas dispersi dapat mengubah selisih antara densitas teoritis dan densitas aktual [17], [18].

Rerata kombinasi densitas tertinggi diperoleh pada penguat 5% dan tekanan 6400 psi sebesar 1,431 g/cm³, sedangkan nilai spesimen tertinggi pada kombinasi yang sama mencapai 1,658 g/cm³. Hasil ini memperlihatkan bahwa tekanan 6400 psi mampu menghasilkan densitas tertinggi pada sebagian kondisi, tetapi fraksi penguat yang lebih besar tidak otomatis menghasilkan material yang lebih rapat. Ukuran CSA yang lebih kecil dibandingkan serbuk Fe, CuZn, dan aluminium berpotensi membantu pengisian celah, namun penggumpalan atau distribusi yang tidak seragam tetap dapat membentuk pori.



Gambar 7 Pengaruh tekanan kompaksi terhadap rerata densitas

3. Implikasi terhadap Kandidat Material Kampas Rem

Secara keseluruhan, tekanan 6400 psi menghasilkan rerata kekerasan dan densitas tertinggi jika seluruh variasi komposisi digabungkan. Namun, komposisi yang memberikan kekerasan tertinggi berbeda dengan komposisi yang menghasilkan densitas tertinggi. Penguat 17% pada 6400 psi memberikan rerata kekerasan terbesar, sedangkan penguat 5% pada 6400 psi memberikan rerata densitas terbesar. Kondisi ini menunjukkan adanya kompromi antara peningkatan kekerasan dan perubahan kerapatan material.

Temuan tersebut sejalan dengan prinsip pengembangan komposit hibrid bahwa penambahan penguat tidak selalu memberikan satu arah perubahan pada seluruh sifat material. Penelitian berbasis CSA melaporkan bahwa penambahan abu tempurung kelapa dapat menaikkan kekerasan sekaligus mengubah densitas, sedangkan besarnya perubahan sangat dipengaruhi oleh kadar penguat dan kondisi proses [7], [8]. Dengan demikian, pemilihan komposisi untuk kampas rem sebaiknya tidak hanya didasarkan pada nilai kekerasan tertinggi, tetapi dilanjutkan dengan uji keausan, koefisien gesek, ketahanan panas, serta pengamatan struktur mikro. [18], [19].

4. Hasil Perbandingan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini menunjukkan pola yang berbeda jika dibandingkan dengan beberapa penelitian komposit matriks aluminium untuk kampas rem. Ridani dkk. [1] melaporkan kekerasan tertinggi 73,66 HB dan densitas 2,498 g/cm³ pada komposit yang diperkuat pasir silika hibrid. Penelitian Asep dkk. [12] juga menunjukkan peningkatan sifat setelah proses sintering, dengan kekerasan mencapai 71,8 HB dan densitas 2,368 g/cm³. Nilai tersebut tidak dapat dibandingkan secara langsung dengan penelitian ini karena jenis penguat, kondisi kompaksi, tahapan proses, dan kondisi pengujiannya berbeda.

Tabel 3. Perbandingan hasil utama dengan penelitian terdahulu.

Studi	**Kekerasan (HB)**	**Densitas (g/cm3)**
Ridani dkk, [1]	73,66	2,498
Asep dkk, [5]	71,8	2,368
Penelitian ini*	144,67	1,431

**Nilai penelitian ini merupakan rerata kombinasi perlakuan tertinggi pada data pra-sintering.*

Rerata kekerasan tertinggi pada penelitian ini lebih besar dibandingkan angka yang dilaporkan pada dua penelitian tersebut, sedangkan densitasnya lebih rendah. Perbedaan ini tidak serta-merta menunjukkan material yang lebih baik atau lebih buruk. Kekerasan hanya menggambarkan ketahanan permukaan terhadap penetrasi, sedangkan densitas berkaitan dengan kerapatan material dan keberadaan pori. Komposisi serbuk kuningan dan besi yang digunakan bersama CSA juga memberikan karakter yang berbeda dari penguat berbasis silika, SiC, atau abu pertanian pada penelitian lain [1],[12].

Selain itu, data yang dianalisis pada artikel ini merupakan data pra-sintering yang tersedia pada laporan proyek akhir. Karena sintering dapat meningkatkan ikatan antarpartikel, mengurangi sebagian porositas, dan mengubah respons mekanik, hasil pra-sintering lebih tepat diposisikan sebagai gambaran awal dari pengaruh komposisi dan tekanan kompaksi. Dengan demikian, tahap berikutnya yang paling penting bukan hanya mencari nilai kekerasan yang lebih tinggi, tetapi memverifikasi konsistensi hasil setelah sintering serta menghubungkannya dengan laju keausan dan koefisien gesek yang merupakan parameter utama dalam aplikasi kampas rem.

KESIMPULAN

Variasi komposisi penguat dan tekanan kompaksi menghasilkan perubahan kekerasan dan densitas komposit matriks aluminium. Tekanan kompaksi menunjukkan kecenderungan yang paling jelas terhadap kekerasan, dengan rerata keseluruhan meningkat dari 91,11 HB pada 5600 psi menjadi 137,33 HB pada 6400 psi. Kombinasi penguat 17% dan tekanan 6400 psi menghasilkan rerata kekerasan tertinggi sebesar 144,67 HB, sedangkan nilai spesimen tertinggi mencapai 155 HB. Densitas menunjukkan respons yang tidak linier; rerata kombinasi tertinggi sebesar 1,431 g/cm³ dan nilai spesimen tertinggi 1,658 g/cm³ sama-sama diperoleh

pada penguat 5% dan tekanan 6400 psi. Hasil ini menunjukkan bahwa tekanan tinggi dapat mendukung pemadatan dan peningkatan kekerasan, tetapi fraksi penguat, homogenitas, serta distribusi partikel tetap menentukan karakter material. Komposit yang dihasilkan dapat dijadikan kandidat awal untuk pengembangan kampas rem *non-asbestos*, namun kelayakan aplikasinya masih memerlukan pengujian tribologi dan termal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Pimpinan Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung yang telah mendanai penelitian ini melalui BIMA 2025 dengan Surat Keputusan: 059/C/DT.50.00/KPA/ 2025, tertanggal 08 Juli 2025, dengan kontrak: 161/C3/DT.05.00/PL-BATCHII/2025.

DAFTAR PUSTAKA

[1] H. N. Ridani, S. Sukanto, and R. Rodika, "Kajian Komposit Matrik Alumunium Untuk Kampas Rem Sepeda Motor Diperkuat Pasir Silika Hibrid (SiO2/BA/RHA) Dengan Metode Metalurgi Serbuk," Jurnal Inovasi Teknologi Terapan, vol. 3, no. 1, pp. 36–42, 2025, doi: 10.33504/jitt.v3i1.245.

[2] Sukanto, S., Wahyudie, I. A., Erwanto, E., Oktriadi, Y., Rodika, R., Irwansyah, R., … Algaza, H. T. (2024). Fabrication of Aluminium Matrix Composite Powder Reinforced with Silicon Dioxide Tailings for Non-Asbestos Brake Pads (NOB). Jurnal Penelitian Pendidikan IPA, 10(10), 7696 7704.https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i10.9208.

[3] V. Chak, H. Chattopadhyay, and T. L. Dora, "A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites," Journal of Manufacturing Processes, vol. 56, pp. 1059–1074,2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.05.042.

[4] Sukanto, R. Soenoko, W. Suprapto, and Y. S. Irawan, "Characterization of aluminium matrix composite of Al-ZnSiFeCuMg alloy reinforced with silica sand tailings particles," *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 14, no. 3, pp. 7094–7108, 2020, doi: 10.15282/jmes.14.3.2020.11.0556.

[5] 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: Physics and Engineering*, no. 1, pp. 103–117, 2022, doi: 10.21303/2461-4262.2022.001906.

[6] A. P. Murali, K. R. Kannan, K. V. Shankar, K. G. Krishnan, S. Kannan, B. Sankar, R. Kumar, and S. Karuppaiah, "Influence of ageing time on the microstructural and mechanical behaviour of Al-Si-Mg/coconut shell ash metal matrix composite," Scientific Reports, vol. 16, art. no. 6629, 2026, doi: 10.1038/s41598-026-35796-9.

[7] L. J. Kumar, V. J. S., J. P. Ganjigatti, G. Irfan, and R. Thara, "Investigation of mechanical properties of Al6061 with reinforcement of coconut shell ash and graphene metal matrix composites," Materials Today: Proceedings, vol. 92, pt. 1, pp. 413–417, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.529.

[8] S. Tejyan, A. K. Tiwari, N. Kumar, V. Singh, and B. Gangil, "Influence of coconut shell ash and cow dung ash reinforcement on the mechanical properties of aluminum alloy composites synthesized by stir casting," Materials Today: Proceedings, 2024, doi: 10.1016/j.matpr.2024.05.099.

[9] G. T. Sudha, B. Stalin, M. Ravichandran, and M. Balasubramanian, "Mechanical properties, characterization and wear behavior of powder metallurgy composites – A review," Materials Today: Proceedings, vol. 22, pp. 2582–2596, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.389.

[10] ASTM International, ASTM E110-14, Standard Test Method for Rockwell and Brinell Hardness of Metallic Materials by Portable Hardness Testers. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2023, https://store.astm.org/e0110-14.html.

[11] ASTM International, ASTM B962-17, Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes' Principle. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017, https://doi.org/10.1520/B0962-17.

[12] M. Asep, Sugiyarto, Somawardi, A. Rusdy, and Sukanto, "Pengaruh Variasi Tekanan Kompaksi Panas Terhadap Densitas Dan Kekerasan AMC

Diperkuat SiO2," Machine: Jurnal Teknik Mesin, vol. 9, no. 1, pp. 1–7, 2023, doi: 10.33019/jm.v9i1.3606.

[13] J. M. Torralba, C. E. da Costa, and F. Velasco, "P/M aluminum matrix composites: An overview," Journal of Materials Processing Technology, vol. 133, no. 1–2, pp. 203–206, 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00234-0.

[14] K. Maclin John Vasanth, P. S. Lokendar Ram, V. Pon Anand, M. Prabu, and S. Rahul, "Experimental investigation of mechanical and tribological properties of Aluminium metal matrix composites fabricated by powder metallurgy route – A review," Materials Today: Proceedings, vol. 33, pp. 1058–1072, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.057.

[15] Sukanto, Erwanto, Husman, Erwansyah, Rodika, Y. Oktriadi, E. Yudo, and Ardiansyah, "Evaluation of hardness and dry sliding wear performance of Al/BA-silica sand composites as brake friction materials," *Jurnal Polimesin*, vol. 24, no. 3, pp. 482–488, Jun. 2026, https://doi.org/10.30811/jpl.v24i3.8952.

[16] U. K. Annigeri and G. B. Veeresh Kumar, "Effect of reinforcement on density, hardness and wear behaviour of aluminium metal matrix composites: A review," Materials Today: Proceedings, vol. 5, no. 5, part 2, pp. 11233–11237,2018, doi:10.1016/j.matpr.2018.02.002.

[17] S. Tejyan, A. K. Tiwari, N. Kumar, V. Singh, and B. Gangil, "Influence of coconut shell ash and cow dung ash reinforcement on the mechanical properties of aluminum alloy composites synthesized by stir casting," Materials Today: Proceedings, 2024, doi: 10.1016/j.matpr.2024.05.099.

[18] K. K. Sadhu, N. Mandal, and R. R. Sahoo, "SiC/graphene reinforced aluminum metal matrix composites prepared by powder metallurgy: A review," Journal of Manufacturing Processes, vol. 91, pp. 10–43, 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.02.026.

[19] A. M. Sankhla, K. M. Patel, M. A. Makhesana, K. Giasin, D. Y. Pimenov, S. Wojciechowski, and N. Khanna, "Effect of mixing method and particle size on hardness and compressive strength of aluminium based metal matrix composite prepared through powder metallurgy route," Journal of Materials Research and Technology, vol. 18, pp. 282–292, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.02.094.

[20] A. H. Fikri, S. Wiryono, and M. Subhan, "Penyelidikan Kampas Rem Komposit Matriks Aluminium Diperkuat Boiler-Fly-Ash dan Silika Terhadap Nilai Densitas dan Kekerasannya," Infotekmesin, vol. 16, no. 2, pp. 477–484, 2025, doi: 10.35970/infotekmesin.v16i2.2561.