

Efek Tekanan Kompaksi dan Suhu Sintering terhadap Densitas dan Kekerasan Komposit Matrik Aluminium diperkuat Silika Tailing

Sugiyarto^{1*}, Somawardi², Sukanto³, Yuliyanto⁴, Muhammad Asep⁵

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

⁵ Prodi DIV Teknik Mesin dan Manufaktur, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

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

*Corresponding author: yarto5943@gmail.com

Abstract

The use of asbestos material in motor vehicle brake linings can cause lung cancer. Ceramic-reinforced Aluminum Matrix Composite can be used as an environmentally friendly replacement material for brake linings. This research aims to determine the effect of variations in compaction pressure and sintering temperature on the density and hardness of silica reinforced Aluminum Matrix Composites. The sample making process was carried out using the powder metallurgy method. Powder mixing was carried out using mechanical alloying and hot compaction was applied at a temperature of 500 °C and held for 15 minutes. Meanwhile, three variations of compaction pressure are used, namely 4400 Psi, 4500 Psi and 4600 Psi. Next, sintering was varied at temperatures of 510 °C, 560 °C and 610 °C and held for 10 minutes. Density testing uses ASTM B962-17 referring to Archimedes' law and hardness testing uses ASTM E110-14. The density and hardness test results show that the values increase with increasing compaction pressure and sintering temperature, with the highest values respectively being a density of 2.368 g/cm³ and a hardness of 71.8 HB for samples with a compaction of 4600 Psi and a sintering temperature of 610 °C.

Key words: aluminum matrix composite, brake lining, compaction and sintering, powder metallurgy, silica.

Abstrak

Penggunaan material asbestos pada kampas rem kendaraan bermotor dapat mengakibatkan penyakit kanker paru-paru. Komposit Matrik Aluminium berpenguat keramik dapat digunakan sebagai material pengganti yang ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi tekanan kompaksi dan temperatur sintering terhadap densitas dan kekerasan Komposit Matrik Aluminium diperkuat silika. Pembuatan sampel dilakukan dengan metode metalurgi serbuk. Pencampuran serbuk dilakukan dengan *mechanical alloying* dan kompaksi panas diterapkan pada suhu 500 °C ditahan selama 15 menit. Sedangkan tekanan kompaksi digunakan tiga variasi yaitu 4400 Psi, 4500 Psi dan 4600 Psi. Selanjutnya, sintering divariasikan pada suhu 510 °C, 560 °C dan 610 °C ditahan selama 10 menit. Pengujian densitas digunakan ASTM B962-17 mengacu hukum Archimedes dan pengujian kekerasan digunakan ASTM E110-14. Hasil uji densitas dan kekerasan menunjukkan nilai semakin meningkat dengan bertambahnya tekanan kompaksi dan suhu sintering, dengan nilai tertinggi secara berturut-turut adalah densitas 2,368 g/cm³ dan kekerasan 71,8 HB untuk sampel dengan kompaksi 4600 Psi dan suhu sintering 610 °C.

Kata kunci: kampas rem, kompaksi dan sintering, komposit matrik aluminium, metalurgi serbuk, silika.

1. Pendahuluan

Kampas rem pada kendaraan bermotor merupakan komponen penting dalam berkendara, yang berfungsi mengurangi laju kecepatan dan menghentikan kendaraan secara aman dan nyaman sehingga tidak membayakan penumpangnya. Hingga saat ini, sekitar 60% material kampas rem masih menggunakan bahan dasar asbestos sebagai serat bahan utama dan bahan campuran lainnya yang meliputi resin, serpihan logam, *friction additive*, *filler*,

karet sintesis dan keramik [1]. Sementara itu, berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh *International Labour Organization* (ILO) dilaporkan bahwa beberapa negara telah menyumbangkan sebesar 54,7% terhadap penyakit kanker paru-paru yang diakibatkan oleh asbestos. Menurut (ILO) jenis kanker paru-paru ini adalah *Mesothelioma*, yaitu jenis kanker paru-paru yang dapat mengakibatkan kematian, sehingga sebagian besar negara telah melarang penggunaan material berbasis asbestos [2].

Oleh karena itu diperlukan material alternatif baru sebagai pengganti material berbasis asbestos tersebut [3], diantaranya adalah komposit serat alam [4], komposit matriks aluminium berpenguat keramik, seperti silikon karbida alumina, silikon dioksida dan lain-lain.[5].

Beberapa keunggulan logam aluminium yaitu densitas rendah dan titik leburnya rendah sehingga biaya daur ulangnya juga sangat rendah [6], relatif tahan terhadap korosi, memiliki konduktivitas listrik dan elastisitas yang baik [7], sehingga aluminium merupakan logam terbanyak kedua yang digunakan pada berbagai industri setelah besi [8], seperti untuk konstruksi pesawat terbang [9], industri otomotif [10] kabel jaringan listrik tegangan tinggi, untuk peralatan laboratorium distilasi [11] serta untuk berbagai pembuatan komposit matriks aluminium untuk peralatan industri [12]. Sedangkan material jenis silikon dioksida atau silika (SiO_2), seperti jenis material keramik pada umumnya yang memiliki keunggulan kekerasan relatif tinggi, titik cair tinggi, densitas rendah dan kemampuan gesek tinggi. Selain itu, penggunaan silika sebagai material penguat komposit dipadukan dengan logam aluminium dapat diperoleh material komposit yang memiliki sifat tahan korosi, ringan, kuat serta *machinability* yang sangat baik [13]. Bahkan pasir silika tailing, yang merupakan limbah pencucian biji timah pada perusahaan penambangan Pt. Timah., Tbk. juga menunjukkan kadar kemurnian Si yang relatif tinggi yaitu mencapai 83%, [14]. Material ini secara ekonomis dapat langsung digunakan sebagai filler atau penguatan pada pembuatan aluminium matrik komposit. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan material matrik aluminium dari bahan serbuk aluminium hasil daur ulang dan digunakan material penguat berupa serbuk silika dari pasir silika tailing limbah pencucian tambang timah.

Poses pembuatan komposit matriks aluminium dengan metode *powder metallurgy* atau metalurgi serbuk memiliki

berbagai keunggulan dibandingkan dengan metode lainnya [15] [16] yaitu meliputi energi prosesnya relatif rendah [17], pembuatan produk cepat sehingga produknya relatif tidak mahal, hasil produk dicetak sehingga langsung dapat digunakan tanpa harus melalui proses permesinan, produksinya dapat dikerjakan baik skala kecil maupun massal, serta lebih hemat karena 95% dari bahan bakunya dapat menjadi produk jadi [18]. Selanjutnya, tahapan dalam proses metalurgi serbuk digolongkan menjadi tiga tahapan proses yaitu proses pencampuran serbuk matrik dengan serbuk penguat, proses kompaksi atau pemadatan serta proses sintering [19].

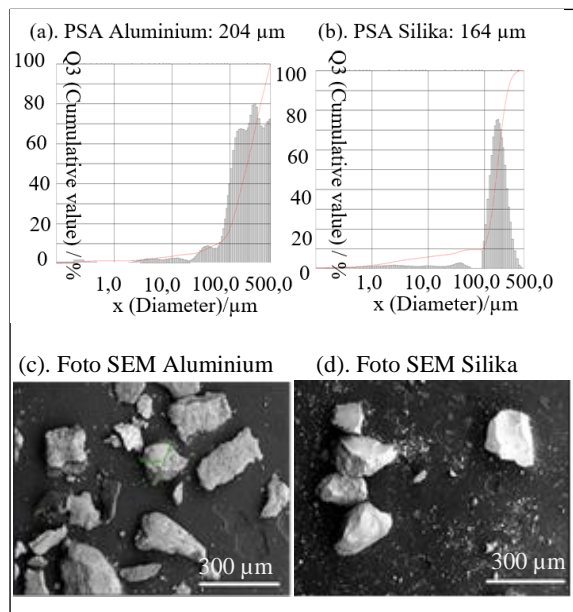
Kampas rem kendaraan bermotor yang terbuat dari bahan dasar asbestos, ketika bergesekan dan menghasilkan serbuk debu harus berterbangan di udara sangat berbahaya karena berpotensi besar mengakibatkan penyakit kanker paru-paru. Berdasarkan laporan Sudrajat juni tahun 2021 dalam tulisannya pada forum Indonesia BAN *Asbestos Network* (INA_BAN) [20] menyatakan bahwa setiap tahun sekitar 4.000 orang di Australia meninggal dunia akibat dampak produk asbestos ini, selain itu dalam laporan tersebut juga menyampaikan bahwa 67 negara telah melarang penggunaan material berbasis asbestos. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menyelidiki pembuatan komposit matrik aluminium diperkuat pasir silika tailing dengan metode metalurgi serbuk, guna menghasilkan material yang lebih ramah lingkungan sebagai alternatif pengganti bahan rem gesek yang bebas dari asbestos.

2. Metode Penelitian

Bahan matrik pada penelitian ini digunakan dengan memanfaatkan serbuk Aluminium hasil proses daur ulang [20] [22] dari Laboratorium $\alpha\beta\gamma$ Landungsari Malang, sehingga lebih ekonomis dan berwawasan lingkungan. Tingkat spesifikasi kemurnian kadar kimianya meliputi Aluminium 74%, senyawa 23% $\text{Cu}(\text{FeO}_2)$ dan silikon 3%, serta dengan distribusi ukuran serbuk hasil

pengujian *Particle Size Analyzer* (PSA) secara rata-rata adalah D50:204 μm . Sedangkan penguatnya digunakan serbuk silika tailing, yang merupakan limbah dari pencucian penambangan timah di Bangka Belitung, dengan ukuran distribusi hasil pengujian *Particle Size Analyzer* (PSA) adalah D50:164 μm , serta dengan dengan tingkat spesifikasi kemurnian kadar kimia adalah 83% SiO_2 , 12% Fe_2O_3 dan 5% TiO_2 . Gambar hasil uji *Particle Size Analyzer* dan foto *Scanning Electron Machine* (SEM) untuk serbuk matrik dan serbuk penguat seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Penelitian Komposit Matrik Aluminium ini menerapkan persentasi komposisi berat matrik adalah 80 wt.% dan 20 wt.% serbuk penguat silika tailing, dimana perpaduan fraksi persentase berat ini secara umum telah menghasilkan sifat fisik dan mekanik lebih baik dibandingkan menggunakan jumlah nilai persentasi komposisi yang lainnya [15], [22].



Gambar 1. Grafik serbuk hasil uji *Particle Size Analyser* dan Foto *Scanning Electron Microscope*

Prosedur dan proses pembuatan sampel dalam penelitian ini menggunakan metode teknologi metalurgi serbuk, dengan tahapan-tahapan proses meliputi; proses pencampuran, proses pemadatan dan proses sintering. Pencampuran serbuk dilakukan dengan metode pemaduan mekanik atau

lebih dikenal dengan sebutan *mechanical alloying*, dimana pada metode pencampuran ini terjadi dua proses secara simultan yaitu proses penggerusan dan pencampuran [23], sehingga serbuk hasil pemaduan mekanik ini dapat tercampur relatif lebih merata (mendekati homogen) serta mampu menghasilkan serbuk paduan yang lebih halus dari ukuran serbuk sebelum diproses pemaduan mekanik. Proses *mechanical alloying* serbuk penyusun komposit matrik aluminium ini dilakukan dengan menggunakan mesin *horizontal ball mill*, dengan parameter-parameter yang meliputi *Ball Powder weight Ratio* (BPR) 10:1, kecepatan mesin 90 rpm dan waktu pencampuran selama 4 jam.

Proses pemadatan serbuk hasil pemaduan mekanik dilakukan dengan menggunakan metode kompaksi panas dua arah penekanan [24], yaitu menggunakan mekanisme pompa hidrolik secara manual dari arah bawah dan arah atas, dengan mesin yang dilengkapi manometer, sambil dipanaskan menggunakan pemanas induksi bersuhu 500 $^{\circ}\text{C}$. Tekanan kompaksi panas yang diterapkan terdiri dari tiga variasi yaitu sebesar 4400 Psi, 4500 Psi dan 4600 Psi dengan waktu tahan kompaksi selama 15 menit. Sampel produk komposit ini berbentuk cincin dengan ukuran cetakan berdiameter luar 50 mm dan diameter dalam 20 mm. Material paduan mekanik penyusun komposit yang digunakan dalam satu sampel seberat 35-40 gram sehingga diperoleh ketebatan sampel ± 10 mm. Tujuan penerapan kompaksi panas dua-arah penekanan ini diharapkan diperoleh ikatan *interlocking* yang optimal pada sampel komposit yang dihasilkan, sehingga titik terlemahnya berupa pada titik pusat lingkaran cincinnya [25] [26].

Tahapan terakhir proses metalurgi serbuk adalah proses sintering, dengan tujuan untuk meningkatkan terjadinya ikatan *interlocking* antar serbuk matrik dengan serbuk penguatnya. Pada umumnya suhu sintering dilakukan pada suhu sekitar 90% dari suhu titik cair matriknya [18]. Mengingat matrik aluminium yg digunakan

memiliki titik cair sekitar 660 °C, maka variasi suhu sintering yang digunakan meliputi 510 °C, 560 °C, dan 610 °C, dengan penahanan waktu (*Holding Time*) selama 10 menit. Setelah proses sintering selesai, maka oven dimatikan kemudian secara perlahan-lahan oven dibuka sebagian, sedangkan sampel tetap didinginkan di dalam oven hingga minimal 14 jam, dengan tujuan sampel didinginkan secara perlahan-lahan sehingga tidak terjadi kejutan suhu atau *thermal shock* yang dapat merusak dan menurunkan sifat mekanik sampel, seperti retak-retak ataupun pecah [16].

Selanjutnya, proses uji densitas dan uji kekerasan sampel dilakukan sebanyak dua kali, yaitu ketika sampel selesai diproses kompaksi panas dan setelah proses sintering, dengan sekurang-kurangnya setelah 20 hari setelah proses dilakukan agar sampel yang bermatrik serbuk logam aluminium ini sudah relatif stabil [15]. Proses uji densitas mengacu pada hukum archimedes yaitu ASTM B962-17 [27], dimana sampel dilakukan penimbangan berat sampel di udara (W_a), dan kemudian dilakukan penimbangan berat sampel di air (W_b) dengan menggunakan wadah keranjang, sehingga yang terbaca berat keranjang dan berat sampel dalam air (W_{sb}). Jika ρ_w merupakan densitas air, maka nilai densitas komposit ($\rho_{komposit}$) diperoleh dengan persamaan (1) [15].

$$\rho_{Composite} = \frac{W_a}{W_a - (W_{sb} - W_b)} \times \rho_w \dots \quad (1)$$

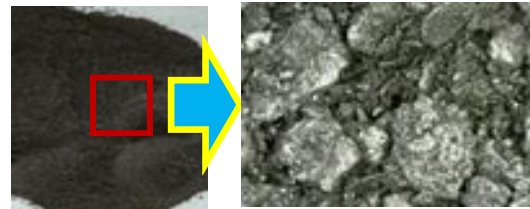
Pengujian kekerasan komposit matrik aluminium hasil penelitian ini dilakukan dengan menggunakan alat uji kekerasan *microhardness portable* dengan pembebanan penekanan 2 kg menggunakan indentor bentuk bola berdiameter 2 mm. Proses pengujian kekerasan ini sesuai untuk material komposit bermatrik logam dengan mengacu pada standar ASTM E110-14 [28].

3. Hasil dan Pembahasan

a. Sampel Penelitian

Pembuatan sampel dengan metode metalurgi serbuk diawali dengan proses

pencampuran serbuk matrik aluminium dan serbuk silika tailing sebagai penyusun komposit dengan menggunakan metode *mechanical alloying* selama 4 jam menggunakan mesin *universal ball mill*. Hasil proses pencampuran serbuk dengan pepaduan mekanik ini seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Foto Makro Serbuk Hasil Pepaduan Mekanik. Berdasarkan foto tersebut dapat dilihat bahwa setelah *mechanical alloying* butiran serbuk/partikel tampak terjadi inisiasi ikatan mekanik berupa pengelasan dingin atau *cold-weld* pada tampilan pembesarannya. Kondisi ini terjadi merupakan akibat dari energi tumbukan diantara bola-bola giling terhadap serbuk material komposit secara terus-menerus berulang hingga 4 jam.



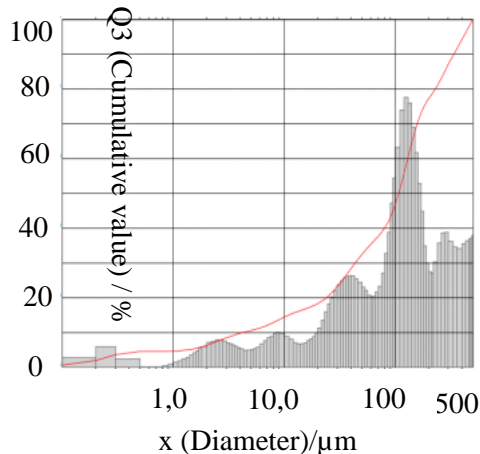
Gambar 2. Foto Makro Serbuk Hasil Pepaduan Mekanik.

Proses *mechanical alloying* selain mencampur juga menggerus. Hal ini terbukti bahwa ukuran serbuk campuran hasil *ball mill* semakin kecil seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Grafik Distribusi Ukuran Serbuk Hasil Uji *Particle Size Analyzer*, yaitu mencapai ukuran D50: 107 μm , dimana ukuran serbuk penyusunnya seperti ditunjukkan pada Gambar 1, yang memiliki ukuran serbuk matrik aluminium D50:204 μm dan ukuran serbuk pengisi silika tailing D50:164 μm , menurun lebih kecil dua kali.

Hasil proses pemadatan panas dua-arah penekanan sebanyak 27 sampel yang ditunjukkan pada Gambar 4. Foto Makro Sampel Penelitian Hasil Kompaksi Panas Dua-Arah Penekanan.

Pada Gambar 4., 27 sampel tersebut merupakan hasil perhitungan dari metode *full factorial* dari dua variabel dengan masing-masing tiga level, yaitu variasi

tekanan kompaksi tiga level (4400 Psi, 4500 Psi dan 4600 Psi) dan suhu sintering tiga level (510 °C, 560 °C, dan 610 °C), dengan pengulangan tiga kali. Sampel berbentuk cincin berdiameter luar 50 mm dan berdiameter dalam 20 mm, dengan ketebalan rata-rata adalah 8-10 mm.



Gambar 3. Grafik Distribusi Ukuran Serbuk Hasil Uji Particle Size Analyzer



Gambar 4. Foto Makro Sampel Penelitian Hasil Kompaksi Panas Dua-Arah Penekanan.

b. Densitas dan Kekerasan Komposit Hasil Kompaksi Panas

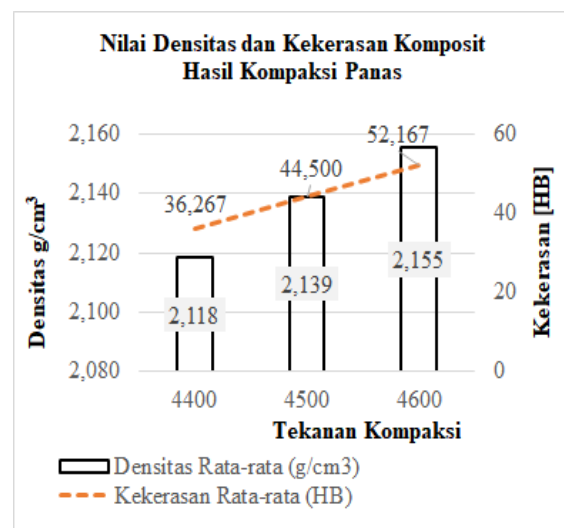
Proses uji densitas terhadap sampel dilakukan sebanyak dua kali, yaitu ketika sampel selesai diproses kompaksi panas dan setelah dilakukan sintering. Mengacu standar ASTM B962-17, pengujian densitas dilakukan dengan cara proses penimbangan di udara dan penimbangan di air, kemudian dihitung menggunakan persamaan (1), sehingga diperoleh hasil perhitungan densitas rata-rata, masing-masing dari data sembilan sampel, yang kemudian datanya ditampilkan pada Tabel 1.

Selain itu, uji kekerasan terhadap sampel juga segera dilakukan setelah 20 hari proses kompaksi panas dilakukan dengan

menggunakan mesin uji kekerasan Brinell mengacu pada standar ASTM E110-14. Hasil uji kekerasan yang telah dirata-ratakan (dari sembilan sampel), juga ditabelkan, seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan kedua nilai uji tersebut (uji densitas dan uji kekerasan), selanjutnya dibuat grafik seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Grafik Nilai Densitas dan Kekerasan Komposit hasil Kompaksi Panas.

Tabel 1. Densitas Sampel Hasil Kompaksi Panas

No	Kompaksi Panas (PSi)	Densitas Rata-rata (g/cm ³)	Kekerasan Rata-rata (HB)
1	4400	2,118	36,267
2	4500	2,139	44,500
3	4600	2,155	52,167



Gambar 5. Grafik Nilai Densitas dan Kekerasan Komposit hasil Kompaksi Panas

Mengacu pada Gambar 5, dapat disampaikan bahwa semakin tinggi tekanan kompaksi semakin tinggi pula nilai densitas dan kekerasan komposit yang dihasilkan. Nilai densitas dan kekerasan tertinggi berturut-turut adalah 2,155 g/cm³ dan 52,167 HB, hasil dari proses kompaksi pada tekanan 4600 Psi.

c. Densitas dan Kekerasan Komposit Setelah Proses Sintering.

Pengujian densitas dan kekerasan sampel hasil sintering dilakukan setelah 20 hari sejak sintering dilakukan. Proses uji densitas dan uji kekerasan secara prinsip adalah sama seperti proses pengujian densitas dan kekerasan sampel hasil kompaksi panas, menggunakan standar ASTM B962-17 dan ASTM E110-14. Hasil pengujian densitas dan pengujian kekerasan setelah dihitung dan dirata-ratakan ditampilkan pada Tabel 2. Nilai Hasil Uji Densitas dan Uji Kekerasan Setelah Sintering.

Tabel 2. Nilai Hasil Uji Densitas dan Uji Kekerasan Setelah Sintering

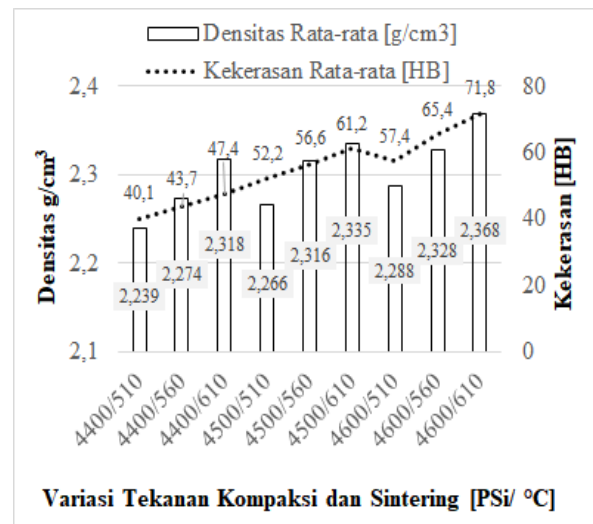
No	Kompaksi/Sinterring [Psi/°C]	Densitas Rata-rata [g/cm ³]	Kekerasan Rata-rata [HB]
1	4400/510	2,239	40,1
2	4400/560	2,274	43,7
3	4400/610	2,318	47,4
4	4500/510	2,266	52,2
5	4500/560	2,316	56,6
6	4500/610	2,335	61,2
7	4600/510	2,288	57,4
8	4600/560	2,328	65,4
9	4600/610	2,368	71,8

Berdasarkan pengolahan data yang ditampilkan pada Tabel 2., dibuat grafik pengaruh variasi kompaksi panas dan sintering seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Grafik Nilai Densitas dan Kekerasan berdasarkan Variasi kompaksi Panas dan Suhu Sintering.

Grafik pada gambar 6. jelas menunjukkan bahwa semakin meningkat tekanan kompaksi yang diaplikasikan dan semakin suhu sintering yang diterapkan telah mempengaruhi peningkatan nilai densitas dan kekerasan komposit matrik aluminium diperkuat serbuk silika tailing ini. Dengan kata lain dapat disampaikan bahwa meningkatnya densitas bermakna porositas komposit menurun dan ikatan antar partikel meningkat.

Perbedaan tekanan kompaksi dari 4400 Psi menjadi 4600 Psi telah meningkatkan densitas sebesar 0,037 g/cm³

atau sebesar 1,75%, sedangkan perbedaan suhu sintering antara 510 °C ke 610 °C telah meningkatkan densitas sebesar 0,076 g/cm³ atau 3,36%. Hal ini menunjukkan indikasi bahwa perbedaan variasi tekanan kompaksi memiliki pengaruh relatif kecil terhadap komposit yang dihasilkan bila dibandingkan dengan variasi suhu sintering yang diterapkan.



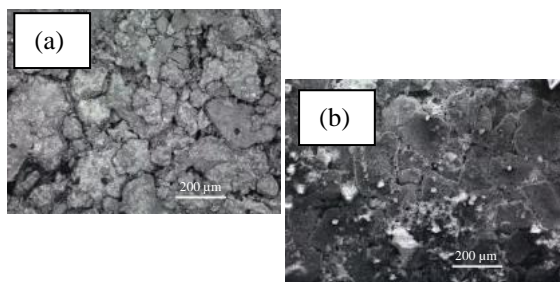
Gambar 6. Grafik Nilai Densitas dan Kekerasan berdasarkan Variasi kompaksi Panas dan Suhu Sintering.

d. Analisa Struktur Mikro Komposit

Pencapaian peningkatan nilai densitas dan nilai kekerasan ini sudah barang tentu juga dipengaruhi oleh proses sebelumnya, yaitu proses pencampuran dengan metode pemaduan mekanik atau metode *mechanical alloying*. Hal ini dikarenakan, pada mekanisme pencampuran pemaduan mekanik terjadi *cold-weld* atau pengelasan dingin antara serbuk matrik dengan serbuk penguat. Kombinasi matrik dari logam aluminium yang cenderung bersifat lunak dan ulet (*ductile*), dengan serbuk silika tailing sebagai penguat yang bersifat getas dan rapuh (*brittle*), ketika tertumbuk terjadi pengelasan dingin dan mengalami *crack* dan pecah.

Fenomena yang terjadi pada proses pemaduan mekanik tersebut berlangsung terus-menerus secara bergantian berulang selama proses penggilingan dengan

universal ball mill. Kondisi campuran pemaduan dingin *cold-weld* inilah yang pada akhirnya berdampak pada terjadinya ikatan mekanik *interlocking* ketika material penyusun komposit paduan dingin ini dikompaksi panas dan kemudian disintering, sehingga kondisi ikatannya menjadi lebih baik dan lebih rapat, seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Struktur Mikro Sampel Densitas Terendah dan Tertinggi, dimana pada sampel dengan densitas terendah tampak strukturnya berpori, sedangkan pada sampel dengan densitas tertinggi berstruktur porositasnya lebih rendah.



Gambar 7. Struktur Mikro Sampel (a). Densitas Terendah dan (b) Densitas Tertinggi

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data dan analisa yang telah dilakukan, penelitian ini menyimpulkan perbedaan tekanan kompaksi panas yang diterapkan pada proses pembuatan komposit matrik aluminium diperkuat serbuk silika tailing terbukti telah dapat mempengaruhi nilai densitas dan kekerasan yang dihasilkan. Semakin tinggi tekanan kompaksi panas yang diaplikasikan semakin meningkat densitas dan kekerasan komposit yang dihasilkan, yaitu nilai densitas dan kekerasan tertinggi diperoleh pada tekanan kompaksi panas 4600 PSI sebesar 2,162 g/cm³ dan 53,1 HB. Sedangkan nilai densitas dan kekerasan terendah adalah 2,113 g/cm³ dan 35,2 HB pada tekanan kompaksi panas 4400 Psi.

Perbedaan temperatur pemanasan pada proses sintering komposit matrik aluminium diperkuat serbuk silika tailing juga telah dapat mempengaruhi densitas dan kekerasan komposit yang dihasilkan, dimana semakin tinggi suhu sintering yang

diterapkan semakin meningkat nilai densitas dan kekerasannya. Densitas dan kekerasan tertinggi diperoleh pada proses kompaksi panas 4600 Psi dengan suhu sintering 610°C yaitu sebesar 2,368 g/cm³ dan kekerasan 71,8 HB. Sedangkan densitas dan kekerasan terendah diperoleh pada tekanan kompaksi 4400 Psi dengan suhu sintering 510°C yaitu dihasilkan densitas 2,239 g/cm³ dan kekerasan 40,1 HB.

Referensi

- [1] Suhardiman and Syaputra, M., 2017, Analisa Keausan Kampas Rem Non Asbes Terbuat Dari Komposit Polimer Serbuk Padi dan Tempurung Kelapa,” *J. Invotek Polbeng*, vol. 07, no. 2, pp. 210–214.
- [2] Fauziah, P., 2019, Seminar Asbestos : Racun Berhambur di Negeri Bencana.
- [3] Telang A K and R. A, 2010, Alternate Materials in Automobile Brake Disc Applications with Emphasis on Al Composites- A Technical Review,” *J. Eng. Res. Stud.*, vol. I, no. I, pp. 35–46.
- [4] Sunardi, Susanto, H., Lusiani, R., Saefuloh, I., Notonegoro, H. A., dan Fawaid, M., 2023, Pengaruh perendaman bambu dengan air laut terhadap kekerasan dan laju keausan komposit kampas rem, *Turbo*, Vol. 12 No.1., DOI: <http://dx.doi.org/10.24127/trb.v12i1.2444>.
- [5] Garg, P., Jamwal, A., Kumar, D., Sadasivuni, K. K., Hussain, C. M., Gupta, P., 2019, Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (5), 4924–4939. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.028>.
- [6] Bulei, I., Todor, C., Heput, M.P., and Kiss, 2018, Recovering Aluminium for Recycling in Reuseable Backyard

- Foundry that Melts Aluminium Cans, *Material Science and Engineering* 416, 012099.
- [7] Abdi, Z. I. P., Risfa, Z. F, dan Alfred, G., 2014, Daur Ulang Scrap Aluminium Sebagai Solusi Alternatif Untuk Mengurangi Ketergantungan ..., *Conf. Pap.*, no. November, doi: 10.13140/2.1.3237.6006.
- [8] Callister, W.D. Jr and Rethwish, D. G., 2014, *Material Science and Engineering an Introduction*, 9th Edition, Wiley Binder Version ISBN: 978-1-118-47770-0.
- [9] Eliasson J. and Sandström, R., 2009, Applications of Aluminium Matrix Composites, *Key Eng. Mater.*, vol. 104–107, pp. 3–36, Mar. doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.104-107.3.
- [10] Masy'ari, Prasetyo, A.D., dan Karyadi, E., 2021, Pembuatan prototipe Aluminium cylinder head engine dengan metode rapid prototyping dan investment casting, *Turbo*, Vol. 10 No. 1, DOI: <http://dx.doi.org/10.24127/trb.v10i1.1519>.
- [11] Ridhuan, K.; Wahyudi, T. C.; Sulistiyo, D.; dan Anggara, B.; 2021; Karakteristik proses destilasi asap cair grade, *Turbo*, Vol. 10 No. 2.; DOI: <http://dx.doi.org/10.24127/trb.v10i2.1761>.
- [12] Syahid, M., Hayat, A. and Aswar, 2022, 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, doi: 10.18280/rcma.320303.
- [13] Prasetya, H. A. 2016., Pengaruh Silika Dari Abu Sekam Padi Sebagai Bahan Substitusi Asbes Untuk Pembuatan Kampas Rem Menggunakan Bahan Karet Alam, *Pros. Semin. Nas. Kulit, Karet dan Plast. Ke-5*, pp. 153–162,
- [14] Sukanto, Soenoko, R., Suprpto, W., and Irawan, Y. S., 2020, 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, doi: 10.15282/jmes.14.3.2020.01.0546.
- [15] Sukanto, W. Suprpto, R. Soenoko, and Y. S. Irawan, 2022, The Effect of Milling Time on The Alumina Phase Transformation in The AMCs Powder Metallurgy Reinforced by Silica-Sand-Tailing, *Eureka, Phys. Eng.*, no. 1, pp. 103–117, doi: 10.21303/2461-4262.2022.001906.
- [16] Subramanian and A. P.C, 2008. *Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications*, Prentice Hall India, New Delhi.
- [17] Chatur Adhi I., Alit Triadi, WA, A. A., Wijana, M., Nuarsa, I. M., and Mara, I. M., 2021, Kekerasan Produk Metalurgi Serbuk Berbahan Limbah Aluminium dengan Metode Kompaksi Bertahap, *J. Sains Teknol. Lingkung.*, pp. 141–146, doi: 10.29303/jstl.v0i0.252.
- [18] Suprpto, W dan Soenoko, 2015, *Teknologi Metalurgi Serbuk*, Solo, Pena Mas Publishing, ISBN: 978-602-73670-0-5.
- [19] Susilowati, S. E., Fudholi, A., and Sumardiyanto, D., 2022, 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, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100377.
- [20] Bulei, C., Kiss, I., and Alexa, V., 2020, Development of metal matrix composites using recycled secondary raw materials from aluminium wastes, *Mater. Today Proc.*, vol. 45, pp. 4143–4149, doi:

- 10.1016/j.matpr.2020.11.926.
- [21] Brough D. and Jouhara, H., 2020, 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, doi: 10.1016/j.ijft.2019.100007.
- [22] Munasir, Triwikantoro, M. Zainuri, R. Bäßler and Darminto, 2019, 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, doi:10.21315/JPS2019.30.1.7.
- [23] Sukanto, Soenoko, R., Suprpto, W., and Irawan, Y. S., 2019, Parameter Optimization of Ball Milling Process for Silica Sand Tailing, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 494, no. 1, doi: 10.1088/1757-899X/494/1/012073.
- [24] Asep, M., Sugiyarto, Somawardi, Achmad Rusdy, dan Sukanto, 2023, Pengaruh Variasi Tekanan Kompaksi Panas terhadap Densitas dan Kekerasan AMC diperkuat SiO₂, *Machine; Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 9 No. 1. DOI:10.33019/jm.v9i1.3606.
- [25] Wahyudie, I. A. , Soenoko, R., Suprpto, W. and Irawan, Y. S. 2020. Enhancing hardness and wear resistance of ZrSiO₄-SnO₂ /Cu₁₀Sn composite produced by warm compaction and sintering, *Metalurgija*, vol. 59, no. 1, pp. 27–30.
- [26] Irwansyah, R., Rodika, Wanto, A, Wahyudi, M., dan Sukanto, 2023, Pengaruh Pemasakan Dua-arah Penekanan Terhadap Densitas dan Kekerasan AMC diperkuat Serbuk Silikon Dioksida, *Infotekmesin* Vol.14, No.2, DOI: 10.35970/infotekmesin.v14i2.1902, pp. 265-272.
- [27] ASTM International, 2013, Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes' Principle, *Astm B962-17*, vol. i, pp. 1–7, doi: 10.1520/B0962-17.2.
- [28] ASTM E110-14, 2015, Standard Test Method for Rockwell and Brinell Hardness of Metallic Materials by Portable Hardness Testers, *ASTM B. Stand.*, pp. 4–8, doi: 10.1520/E0110-14.2.