

“KARAKTERISASI SIFAT MEKANIK MATERIAL ALUMINIUM RECYCLE DENGAN VARIASI TEMPERATUR DAN HOLDING TIME MENGGUNAKAN METODE SINTERING”

*Abid Galang Wicaksono¹, Ismi Choirotin^{2**}, Cepi Yazirin³*

¹ Teknik Mesin, Universitas Islam Malang, 22101052032@unisma.ac.id

² Teknik Mesin, Universitas Islam Malang, ismi.choirotin@unisma.ac.id

³ Teknik Mesin, Universitas Islam Malang, cepiyazirin10@unisma.ac.id

ABSTRAK

Limbah geram aluminium hasil proses pemesinan berpotensi dimanfaatkan kembali melalui proses daur ulang untuk mendukung efisiensi penggunaan material. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi temperatur sintering dan *holding time* terhadap kekuatan tekan aluminium AA6061 hasil daur ulang menggunakan metode *compressive forming* yang dikombinasikan dengan proses *sintering*. Variasi temperatur sintering yang digunakan adalah 525°C, 550°C, dan 575°C dengan *holding time* 45, 60, dan 75 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur sintering dan *holding time* cenderung meningkatkan kekuatan tekan, meskipun pada beberapa kombinasi perlakuan masih terjadi fluktuasi akibat variasi orientasi penyusunan chip dan porositas. Kekuatan tekan tertinggi sebesar 339,70 MPa diperoleh pada temperatur 550°C dan 575°C dengan *holding time* 75 menit, sedangkan nilai terendah sebesar 254,78 MPa diperoleh pada temperatur 525°C dengan *holding time* 60 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan parameter sintering yang tepat mampu meningkatkan sifat mekanik aluminium AA6061 hasil daur ulang hingga mendekati material konvensional.

Kata kunci: aluminium AA6061, daur ulang aluminium, *compressive forming*, temperatur sintering, *holding time*, kekuatan tekan

Pendahuluan

Aluminium merupakan salah satu logam yang banyak digunakan pada sektor otomotif, konstruksi, dan manufaktur karena memiliki massa jenis rendah, ketahanan korosi yang baik, serta sifat mekanik yang tinggi. Seiring meningkatnya penggunaan aluminium, jumlah limbah geram (*machining chips*) yang dihasilkan dari proses pemesinan juga terus bertambah. Apabila tidak dimanfaatkan kembali, limbah tersebut dapat menurunkan efisiensi penggunaan material serta meningkatkan biaya produksi dan dampak lingkungan. Oleh karena itu, teknologi daur ulang aluminium menjadi salah satu solusi yang penting dalam mendukung efisiensi material sekaligus mengurangi limbah industri [1][2]

Salah satu metode daur ulang aluminium yang berkembang adalah *solid-state recycling*, yaitu proses daur ulang tanpa melalui peleburan sehingga mampu mengurangi kehilangan material akibat

oksidasi, konsumsi energi, serta emisi yang dihasilkan selama proses pengecoran konvensional. Metode ini umumnya dikombinasikan dengan proses kompaksi dan sintering untuk menghasilkan ikatan metalurgi antarpartikel sehingga diperoleh material dengan sifat mekanik yang mendekati aluminium konvensional [3][4]. Keberhasilan proses sintering dipengaruhi oleh beberapa parameter, di antaranya temperatur sintering dan *holding time*, karena kedua parameter tersebut menentukan laju difusi atom, pertumbuhan *neck* antarpartikel, proses densifikasi, serta penurunan porositas material [5][6]

Beberapa penelitian telah melaporkan bahwa peningkatan temperatur sintering mampu meningkatkan densitas dan sifat mekanik aluminium hasil metalurgi serbuk.[7] melaporkan bahwa peningkatan temperatur sintering mempercepat proses difusi sehingga meningkatkan pembentukan ikatan

antarpartikel. [5] juga menunjukkan bahwa kombinasi temperatur sintering dan *holding time* yang tepat berpengaruh terhadap peningkatan densifikasi dan kekuatan mekanik material berbasis aluminium. Selain itu, [8] menjelaskan bahwa berkurangnya porositas selama proses sintering berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan mekanik material hasil kompaksi.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada material berbentuk serbuk (*powder metallurgy*), sedangkan penelitian mengenai pemanfaatan geram aluminium AA6061 melalui metode *compressive forming* dengan variasi temperatur sintering dan *holding time* masih relatif terbatas. Selain itu, pengaruh kombinasi kedua parameter tersebut terhadap kekuatan tekan aluminium hasil daur ulang berbasis geram belum dijelaskan secara komprehensif. Kondisi tersebut menunjukkan masih terdapat *research gap* yang perlu dikaji lebih lanjut [4][9].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengajukan hipotesis bahwa peningkatan temperatur sintering dan *holding time* akan meningkatkan proses difusi atom, memperbaiki ikatan antarpartikel, mengurangi porositas, serta meningkatkan kekuatan tekan aluminium AA6061 hasil daur ulang. Untuk membuktikan hipotesis tersebut, geram aluminium AA6061 diproses menggunakan metode *compressive forming* dengan variasi temperatur sintering 525°C, 550°C, dan 575°C serta *holding time* 45, 60, dan 75 menit. Selanjutnya dilakukan pengujian tekan untuk mengevaluasi pengaruh kedua parameter tersebut terhadap kekuatan tekan material.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur sintering dan *holding time* berpengaruh terhadap kekuatan tekan aluminium AA6061 hasil daur ulang. Kombinasi temperatur sintering 550°C dan

575°C dengan *holding time* 75 menit menghasilkan kekuatan tekan tertinggi sebesar 339,70 MPa, sedangkan nilai terendah sebesar 254,78 MPa diperoleh pada temperatur 525°C dengan *holding time* 60 menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemilihan parameter sintering yang tepat mampu menghasilkan aluminium hasil daur ulang dengan sifat mekanik yang mendekati aluminium AA6061 konvensional.

Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang bertujuan menganalisis pengaruh variasi temperatur sintering dan *holding time* terhadap kekuatan tekan aluminium AA6061 hasil daur ulang menggunakan metode *compressive forming*. Material yang digunakan berupa geram aluminium AA6061 hasil proses pemesinan. Sebelum diproses, geram dibersihkan menggunakan larutan pembersih untuk menghilangkan minyak dan kotoran yang menempel, kemudian dikeringkan hingga bebas dari kadar air [10]

Geram aluminium yang telah bersih kemudian dimasukkan ke dalam cetakan silinder dan dipadatkan menggunakan mesin kompaksi hingga diperoleh spesimen berbentuk silinder dengan diameter 15 mm dan tinggi 30 mm. Selanjutnya spesimen disinter menggunakan furnace listrik dengan variasi temperatur 525°C, 550°C, dan 575°C, sedangkan variasi *holding time* yang digunakan adalah 45 menit, 60 menit, dan 75 menit. Setelah proses sintering selesai, spesimen didinginkan di dalam furnace hingga mencapai suhu ruang untuk meminimalkan tegangan sisa [9].

Pengujian sifat mekanik dilakukan menggunakan *Compressive Strength* melalui metode uji tekan sesuai standar ASTM E9-19. Beban maksimum yang diterima spesimen dicatat selama proses pengujian, kemudian digunakan untuk menghitung kekuatan tekan menggunakan Persamaan:

$$A = \pi r^2$$

Dengan $r = 7,5$ mm, maka diperoleh:

$$A = 3,14 \times (7,5)^2 = 176,63 \text{ mm}^2$$

Volume spesimen dapat dihitung dengan:

$$\begin{aligned} V &= 3,14 \times (7,5)^2 \times 30 \\ &= 3,14 \times 56,25 \times 30 \\ &= 5298,75 \text{ mm}^3 \\ V &= 5298,75 \text{ mm}^3 = 5,29 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Dengan densitas teoritis aluminium sebesar $2,70 \text{ g/cm}^3$, maka berat teoritis dalam satu spesimen padat dapat dihitung dengan

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Atau

$$m = \rho \cdot v = 2,70 \cdot 5,31 = 14,377 \text{ gram}$$

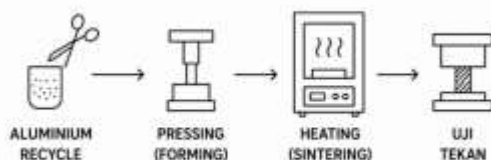
Maka diperoleh sekitar 14,377 gram. Nilai ini digunakan sebagai acuan dalam menghitung densitas relatif spesimen hasil *sintering* dengan:

Σ = tegangan tekan (MPa),

F = gaya maksimum (N),

A = luas penampang spesimen (mm^2).

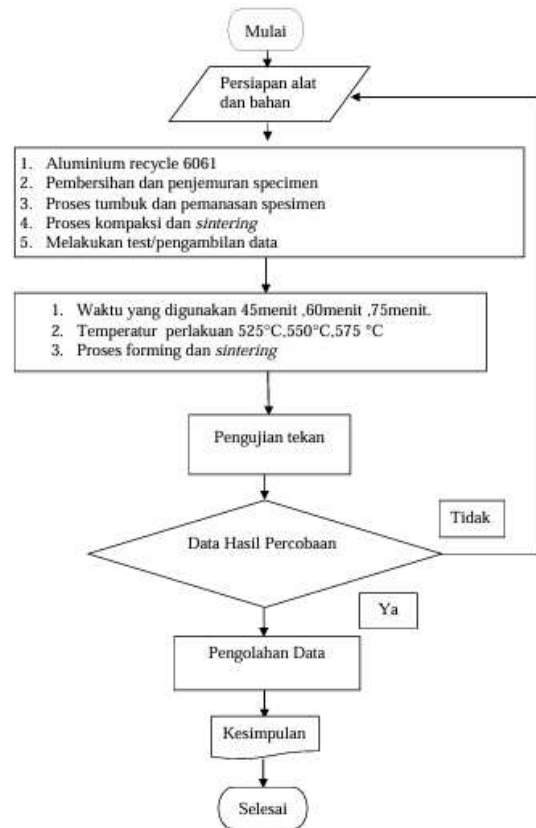
Perhitungan tegangan tekan mengacu pada standar ASTM E9-19 mengenai pengujian tekan material logam [11]. berikut merupakan skema penelitian



Gambar 1. Skema proses penelitian

Data hasil pengujian kemudian dianalisis secara deskriptif kuantitatif

dengan membandingkan nilai kekuatan tekan pada setiap kombinasi temperatur *sintering* dan *holding time*. Berikut merupakan diagram alir/flow chart pada penelitian ini



Gambar 2. Flow chart penelitian

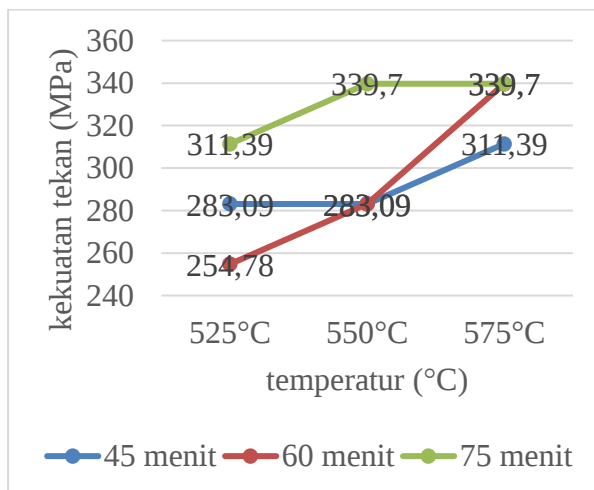
Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan pengaruh setiap kombinasi temperatur *sintering* dan *holding time* terhadap nilai kekuatan tekan aluminium AA6061 hasil daur ulang. Hasil analisis selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik untuk mempermudah interpretasi hubungan antara parameter *sintering* dengan kekuatan tekan material.[9],

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut hasil data ujitekan pada kombinasi semua variable:

Temperatur (°C)	Holding Time (menit)	Kekuatan Tekan (MPa)
525	45	283,09
525	60	254,78
525	75	311,39
550	45	283,09
550	60	283,09
550	75	339,70
575	45	311,39
575	60	339,70
575	75	339,70

Tabel 1. Data hasil perolehan kekuatan tekan tiap variabel



Gambar 3. Grafik hasil pengaruh Temperatur dan *holding time* terhadap nilai kekuatan tekan hasil *sintering*

Berdasarkan Gambar 3, kombinasi temperatur *sintering* dan *holding time* memberikan pengaruh terhadap kekuatan tekan aluminium AA6061 hasil daur ulang. Secara umum, peningkatan temperatur *sintering* yang diikuti dengan bertambahnya *holding time* cenderung meningkatkan nilai kekuatan tekan, meskipun pada beberapa kombinasi perlakuan masih dijumpai fluktuasi. Nilai kekuatan tekan tertinggi diperoleh pada temperatur 550°C dan 575°C dengan *holding time* 75 menit, yaitu sebesar 339,70 MPa, sedangkan nilai terendah diperoleh pada temperatur 525°C dengan *holding time* 60 menit, yaitu sebesar 254,78 MPa.

Peningkatan kekuatan tekan tersebut menunjukkan bahwa temperatur *sintering* dan *holding time* berperan penting dalam meningkatkan proses difusi atom selama *sintering* [12]. Temperatur yang lebih tinggi meningkatkan mobilitas atom sehingga mempercepat pembentukan *neck growth* antarpartikel dan meningkatkan densifikasi material. Selain itu, waktu penahanan yang lebih lama memberikan kesempatan bagi proses difusi berlangsung lebih sempurna sehingga ikatan metalurgi (*inter-particle bonding*) menjadi semakin kuat dan porositas berkurang [5], [13]

Meskipun demikian, peningkatan kekuatan tekan tidak berlangsung secara linier pada seluruh kombinasi perlakuan. Fluktuasi yang terjadi diduga dipengaruhi oleh karakteristik proses manufaktur yang sulit dikontrol secara sempurna. Pada penelitian ini ukuran geram aluminium telah diseragamkan sekitar 5 μ m, namun orientasi dan susunan chip di dalam cetakan saat proses kompaksi tidak dapat dibuat identik pada setiap spesimen. Perbedaan orientasi tersebut menyebabkan luas bidang kontak antar partikel berbeda sehingga efektivitas proses difusi dan pembentukan ikatan metalurgi selama *sintering* juga bervariasi. Selain itu, distribusi porositas awal serta keberadaan lapisan oksida pada permukaan chip turut memengaruhi proses densifikasi [11], [14]

Pada *holding time* 75 menit, peningkatan temperatur dari 550°C menjadi 575°C tidak lagi meningkatkan kekuatan tekan, di mana kedua variasi menghasilkan nilai yang sama, yaitu 339,70 MPa. Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses *sintering* telah mendekati kondisi optimum sehingga sebagian besar pori telah tertutup dan proses difusi telah berlangsung secara efektif. Setelah kondisi densifikasi optimum tercapai, peningkatan temperatur tidak lagi memberikan peningkatan sifat mekanik yang signifikan.[7]

Apabila dibandingkan dengan aluminium AA6061 konvensional, nilai kekuatan tekan maksimum sebesar 339,70 MPa yang diperoleh pada penelitian ini telah mendekati kekuatan tekan aluminium AA6061 pejal yang umumnya berada pada kisaran 350–400 MPa [11]. Selisih kekuatan tekan tersebut diduga masih dipengaruhi oleh porositas sisa, lapisan oksida pada permukaan chip, serta keterbatasan penyatuan antarpartikel selama proses *sintering*. Meskipun demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi metode *compressive forming* dan parameter *sintering* yang tepat mampu menghasilkan aluminium hasil daur ulang dengan sifat mekanik yang mendekati material aslinya sehingga berpotensi diterapkan sebagai alternatif pemanfaatan limbah geram aluminium[8], [11]

Berdasarkan hasil penelitian dapat diketahui bahwa kombinasi temperatur *sintering* dan *holding time* merupakan parameter penting dalam proses daur ulang aluminium AA6061 berbasis geram menggunakan metode *compressive forming*. Peningkatan kedua parameter tersebut mampu meningkatkan proses difusi atom, memperbaiki kualitas ikatan antarpartikel, dan mengurangi porositas sehingga menghasilkan peningkatan kekuatan tekan. Meskipun masih dijumpai fluktuasi akibat variasi orientasi chip dan distribusi porositas, kecenderungan hasil penelitian tetap menunjukkan bahwa pemilihan parameter *sintering* yang tepat mampu menghasilkan sifat mekanik yang mendekati aluminium AA6061 konvensional. Dengan demikian, metode yang digunakan pada penelitian ini memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai alternatif pemanfaatan limbah geram aluminium pada aplikasi rekayasa.

KESIMPULAN

Variasi temperatur *sintering* dan *holding time* berpengaruh terhadap kekuatan tekan aluminium AA6061 hasil daur ulang menggunakan metode *compressive forming*. Secara umum, peningkatan temperatur *sintering* yang diikuti dengan bertambahnya *holding time* cenderung meningkatkan

kekuatan tekan melalui peningkatan proses difusi atom, pembentukan ikatan antarpartikel (*inter-particle bonding*), serta berkurangnya porositas. Namun, pada beberapa kombinasi perlakuan masih dijumpai fluktuasi nilai kekuatan tekan yang diduga dipengaruhi oleh orientasi penyusunan chip, distribusi porositas, dan kualitas kontak antarpartikel selama proses kompaksi.

Kombinasi temperatur *sintering* 550°C dan 575°C dengan *holding time* 75 menit menghasilkan kekuatan tekan tertinggi sebesar 339,70 MPa, sedangkan nilai terendah diperoleh pada temperatur 525°C dengan *holding time* 60 menit, yaitu sebesar 254,78 MPa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan parameter *sintering* yang tepat mampu meningkatkan sifat mekanik aluminium AA6061 hasil daur ulang hingga mendekati kekuatan tekan aluminium AA6061 konvensional, sehingga metode ini berpotensi menjadi alternatif dalam pemanfaatan kembali limbah geram aluminium.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. M. Altharan, S. Shamsudin, S. Al-Alimi, Y. Saif, dan W. Zhou, "A review on solid-state recycling of aluminum machining chips and their morphology effect on recycled part quality," *Heliyon*, vol. 10, no. 14, hal. e34433, 2024.
- [2] V. K. Parikh, V. Patel, D. P. Pandya, dan J. Andersson, "Current status on manufacturing routes to produce metal matrix composites: State-of-the-art," *Heliyon*, vol. 9, no. 2, hal. e13558, 2023.
- [3] S. J. Hirsch, T. Grund, dan T. Lampke, "Towards Closed-Loop Recycling of Ceramic Particle-Reinforced Aluminium Alloys: Comparative Study of Resistance-Heating Sintered Primary and Solid-State Recycled Secondary SiCp/AlSi7Mg Composites," *Crystals*, vol. 13, no. 5, 2023.
- [4] N. K. Yusuf, M. A. Lajis, dan A. Ahmad, "Life Cycle Assessment on the Direct Recycling Aluminium Alloy

- AA6061 Chips and Metal Matrix Composite (MMC-AIR)," *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 13, no. 5, hal. 95–100, 2021.
- [5] K. C. Nayak, K. K. Rane, P. P. Date, dan T. S. Srivatsan, "applied sciences Synthesis of an Aluminum Alloy Metal Matrix Composite Using Powder Metallurgy : Role of Sintering Parameters," 2022.
- [6] K. Luo *et al.*, "Effects of sintering temperature on the microstructure and mechanical properties of Ni-based alloy," *Mater. Charact.*, vol. 213, 2024.
- [7] A. Cañadilla, J. P. Sanhueza, C. Montalba, dan E. M. Ruiz-Navas, "Cañadilla, A., Sanhueza, J. P., Montalba, C., & Ruiz-Navas, E. M. (2024). Effect of Sintering Temperature on Phase Formation and Mechanical Properties of Al–Cu–Li Alloy Prepared from Secondary Aluminum Powders. *Metals*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/met14>," *Metals (Basel)*, vol. 14, no. 1, 2024.
- [8] C. Y. Lee, S. Lee, J. H. Ha, J. Lee, I. H. Song, dan K. S. Moon, "Effect of the sintering temperature on the compressive strengths of reticulated porous Zirconia," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 12, 2021.
- [9] G. Han *et al.*, "Novel Ring Compression Test Method to Determine the Stress - Strain Relations and Mechanical Properties of Metallic Materials," *Chinese J. Mech. Eng.*, 2021.
- [10] S. Salifu dan P. Apata, "Field - assisted sintering of high - entropy alloy - reinforced aluminium matrix composites : phase identification and microstructural properties," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 132, no. 11, hal. 6019–6031, 2024.
- [11] Gabrian International LTD, "6061 Aluminum Alloy: Properties General," vol. 1, no. 603, hal. 6061, 2020.
- [12] C. Yazirin, P. Puspitasari, M. I. N. Sasongko, D. I. Tsamroh, dan P. Risdanareni, "Phase identification and morphology study of hematite (Fe₂O₃) with sintering time variations," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1887, no. September 2021, 2017.
- [13] A. Pambudi dan dkk, "Pengaruh Variasi Waktu Tahan terhadap Kekuatan Tekan Aluminium Hasil Kompaksi," *J. Tek. Mesin Indones.*, 2022.
- [14] M. Nafi dan E. Santoso, "Analisa Pengaruh Variasi Temperatur Pemanasan Dan Holding Time Pada Perlakuan Panas Baja St 42 Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro," *Mek. J. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 1, hal. 8, 2023.