

KARAKTERISASI SIFAT MEKANIK MATERIAL ALUMINIUM *RECYCLE* DENGAN VARIASI TEMPERATUR DAN TEKANAN MENGGUNAKAN METODE *SINTERING*

Surya Dicki Saputra¹, Ismi Choirotin^{2**}, Cepi Yazirin³

¹ Teknik Mesin, Universitas Islam Malang, 22101052009@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 AA6061 merupakan salah satu jenis limbah logam yang masih memiliki potensi untuk dimanfaatkan kembali melalui proses daur ulang. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah *sintering*, yaitu proses penyatuan partikel material menggunakan energi panas tanpa mencapai titik lebur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur *sintering* dan tekanan terhadap sifat mekanik, khususnya kuat tekan, aluminium *recycle* AA6061 serta menentukan kombinasi parameter yang menghasilkan karakteristik mekanik terbaik. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen dengan material berupa geram aluminium AA6061 *recycle*. Variasi temperatur *sintering* yang digunakan yaitu 525°C, 550°C, dan 575°C, sedangkan variasi tekanan terdiri atas 60 MPa, 80 MPa, dan 100 MPa dengan *holding time* selama 60 menit. *Spesimen* dibentuk sesuai standar ASTM E9 dan selanjutnya dilakukan pengujian kuat tekan menggunakan Compression Testing Machine (CTM). Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif untuk mengetahui hubungan antara temperatur, tekanan, dan nilai kuat tekan material. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa kombinasi temperatur *sintering* 575°C dan tekanan 100 MPa merupakan kondisi optimum untuk meningkatkan sifat mekanik aluminium *recycle* AA6061 hasil proses *sintering*. Semakin tinggi temperatur dan tekanan hingga mencapai kondisi optimum, semakin baik proses *densifikasi* yang terjadi sehingga menghasilkan material dengan kekuatan tekan yang lebih tinggi. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu referensi dalam pengembangan teknologi daur ulang aluminium berbasis metalurgi serbuk sebagai upaya mendukung efisiensi penggunaan material dan keberlanjutan di bidang manufaktur.

Kata Kunci: aluminium *recycle* AA6061, *sintering*, temperatur, tekanan, kuat tekan, *densifikasi*.

PENDAHULUAN

Aluminium merupakan salah satu jenis logam yang memiliki peranan penting dan banyak dimanfaatkan pada berbagai bidang industri, seperti industri otomotif, konstruksi, dan manufaktur. Penggunaan aluminium yang luas disebabkan oleh beberapa keunggulan yang dimilikinya, antara lain bobot yang ringan, ketahanan yang baik terhadap korosi, serta kemampuan menghantarkan panas dan listrik yang tinggi. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan dan pemanfaatan aluminium, jumlah limbah yang dihasilkan, baik berupa *scrap* maupun *machining chips*, juga mengalami peningkatan. Kondisi tersebut mendorong perlunya penerapan proses daur ulang (*recycle*) aluminium sebagai salah satu upaya untuk mengurangi ketergantungan terhadap penggunaan aluminium primer. Selain itu, proses daur ulang aluminium juga berperan dalam mendukung penerapan konsep keberlanjutan (*sustainability*) pada industri material melalui pengurangan limbah dan pemanfaatan kembali sumber daya yang masih memiliki nilai guna. [1]. Permintaan terhadap material aluminium daur ulang terus mengalami peningkatan seiring dengan perkembangan industri yang semakin menekankan pada efisiensi penggunaan sumber daya dan upaya pengurangan dampak lingkungan.

Pemanfaatan aluminium daur ulang memberikan berbagai keuntungan, baik dari aspek ekonomi maupun lingkungan, karena proses daur ulang memerlukan konsumsi energi yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan proses produksi aluminium primer. Selain itu, penggunaan aluminium daur ulang dapat mengurangi eksploitasi sumber daya alam, menekan emisi gas rumah kaca, serta mendukung penerapan konsep industri berkelanjutan yang berorientasi pada pemanfaatan sumber daya secara efisien dan ramah lingkungan [2]. Namun, kualitas mekanik produk dari aluminium daur ulang sering kali dipengaruhi oleh kondisi proses pemrosesan, khususnya pada tahap pemadatan dan *sintering* partikel aluminium.

Dalam proses *sintering*, dua parameter kunci temperatur pemanasan dan tekanan memainkan peran penting dalam pembentukan ikatan antar partikel, densifikasi, serta evolusi *mikrostruktur* seperti ukuran butir dan *porositas*. Proses *direct recycling* aluminium AA6061 merupakan salah satu metode daur ulang yang lebih ramah lingkungan karena mampu mengurangi konsumsi energi secara signifikan dibandingkan dengan proses peleburan ulang (*remelting*). Metode

ini memanfaatkan kembali material aluminium tanpa melalui tahap peleburan, sehingga kehilangan material akibat oksidasi dapat diminimalkan dan emisi yang dihasilkan menjadi lebih rendah. Selain itu, optimasi parameter proses, terutama temperatur dan tekanan selama proses daur ulang, memiliki peranan yang sangat penting dalam meningkatkan *densifikasi* material serta memperbaiki sifat mekaniknya. Pengaturan temperatur dan tekanan yang tepat mampu memperkuat ikatan antar partikel, mengurangi porositas, dan menghasilkan mikrostruktur yang lebih homogen, sehingga material aluminium daur ulang memiliki karakteristik mekanik yang mendekati aluminium primer dan layak digunakan untuk berbagai aplikasi teknik [3]. Peningkatan tekanan selama proses pembentukan material aluminium daur ulang mampu meningkatkan luas kontak antar partikel, sehingga proses *densifikasi* berlangsung lebih efektif. Kontak antar partikel yang semakin baik akan mempercepat terbentuknya ikatan yang kuat selama proses *sintering*, mengurangi tingkat porositas, serta menghasilkan struktur material yang lebih padat dan homogen. Kondisi tersebut berdampak pada peningkatan sifat mekanik material, seperti kekuatan tekan, kekerasan, dan ketahanan terhadap deformasi. Oleh karena itu, pengaturan tekanan yang tepat

menjadi salah satu faktor penting dalam memperoleh aluminium daur ulang dengan kualitas dan performa mekanik yang optimal [4].

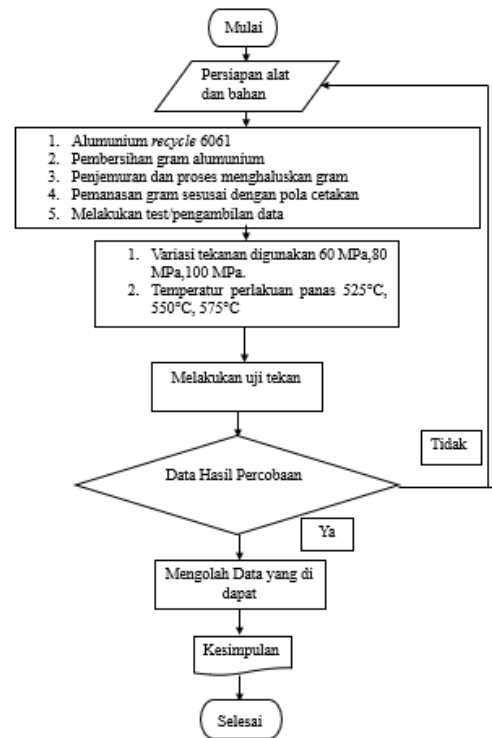
Pada aluminium daur ulang, pengaruh temperatur, variasi tekanan, dan waktu *sintering* cenderung lebih kompleks dibandingkan dengan aluminium primer. Kondisi ini disebabkan oleh material sekunder yang umumnya masih mengandung lapisan oksida pada permukaan serta berbagai jenis kontaminan yang terbentuk selama proses penggunaan dan pengolahan sebelumnya. Keberadaan oksida dan kontaminan tersebut dapat menghambat proses difusi antar partikel, sehingga menurunkan kualitas ikatan yang terbentuk selama proses *sintering*. Akibatnya, *densifikasi* material menjadi kurang optimal dan dapat berdampak pada penurunan sifat mekanik material yang dihasilkan. Oleh karena itu, pengaturan parameter proses seperti temperatur, variasi tekanan, dan waktu *sintering* yang tepat menjadi faktor penting untuk memperoleh karakteristik aluminium daur ulang yang optimal. [5] meneliti gram aluminium sekunder (*secondary aluminium powder*) dan menemukan bahwa variasi temperatur *sintering* (525–575 °C) sangat berpengaruh pada pembentukan *fase* serta sifat tekan material. Kualitas ikatan antar partikel aluminium hasil daur ulang sangat

dipengaruhi oleh homogenitas distribusi partikel selama proses *sintering*. Ikatan yang belum sempurna dapat menyebabkan penurunan sifat mekanik material [6].

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh variasi temperatur pemanasan, dan variasi tekanan terhadap sifat tekan aluminium *recycle* dengan metode *sintering*. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap optimalisasi parameter proses daur ulang aluminium, khususnya dalam menghasilkan material dengan sifat mekanik yang kompetitif.

METODOLOGI PENELITIAN

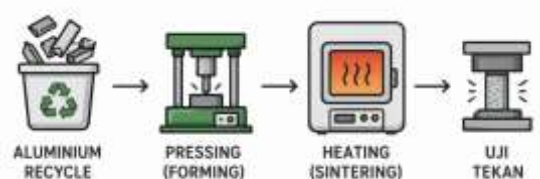
Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen nyata. Data hasil penelitian dianalisis dengan cara mengamati secara langsung hasil *eksperimen* proses aluminium *recycle* yang dilakukan oleh peneliti, kemudian menyimpulkan dan menentukan hasil penelitian yang telah dilakukan dengan menggunakan teknik analisis menggunakan pendekatan *statistik* tempat dan waktu penelitian. Parameter yang diamati dalam penelitian ini adalah perlakuan variasi temperatur pemanasan dan variasi tekanan terhadap aluminium hasil daur ulang, kemudian dianalisis pengaruhnya terhadap kekuatan tekan melalui pengujian laboratorium.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Dalam penelitian ini, beberapa alat dan bahan digunakan untuk proses pengujian. Alat-alat tersebut harus memenuhi kriteria kelayakan untuk digunakan :

1. *Furnace*
2. Cetakan Silinder (*dies/mold*)
3. *Compressive Strength* (Kuat Tekan)
4. *Thermogun*
5. *Stopwatch*
6. Nampan
7. Jangka Sorong
8. Alat Pres *Universal Testing Machine*
9. Dial (*dial indicator* atau *dial gauge*)
10. Sarung Tangan
11. Timbangan



Gambar 2 . Skema Penelitian

Teknik tahapan penelitian:

- a. Persiapan material Aluminium AA6061 *recycle* dicuci menggunakan air bersih kemudian geram dikeringkan dibawah sinar matahari dan dipotong menjadi ukuran yang seragam sebelum dilakukan pemanasan dan pencetakan awal.
- b. Geram aluminium kemudian ditimbang sebanyak 14 gram dimasukkan dicetakan silinder kemudian dibentuk dengan metode *sintering* menggunakan parameter temperatur, variasi tekanan dan *holding time* yang telah ditentukan.
- c. Geram aluminium yang telah dipersiapkan dimasukkan ke dalam cetakan (*die*) berbentuk silinder. Selanjutnya dilakukan proses pemadatan menggunakan mesin press dengan variasi tekanan 60 MPa, 80 MPa, dan 100 MPa hingga terbentuk *green compact* yang memiliki bentuk dan dimensi sesuai cetakan. Setelah proses penempaan, *spesimen* didinginkan menggunakan media udara sesuai rancangan penelitian untuk mencegah *deformasi* tambahan dan mengunci *struktur mikro* hasil perlakuan panas.
- d. *Green compact* kemudian disinter menggunakan furnace pada temperatur 525°C, 550°C, dan 575°C dengan *holding time* selama 60 menit. Proses *sintering* bertujuan untuk meningkatkan ikatan antar partikel melalui mekanisme difusi atom sehingga densitas material meningkat, porositas berkurang, dan sifat mekanik menjadi lebih baik.
- e. Uji tekan dilakukan menggunakan mesin *Compression Testing Machine (CTM)* sesuai standar ASTM E9, dimana standar pengujian tekan untuk aluminium yang paling umum digunakan secara internasional. *Spesimen* ditempatkan pada permukaan mesin *Compression Testing Machine (CTM)*
- f. Validasi Data - Memastikan data yang diperoleh mencakup seluruh kombinasi variabel. Jika data belum lengkap, pengujian diulang hingga semua variabel terpenuhi.
- g. Analisis Data - Melakukan analisis data secara grafis dan menafsirkan hasil untuk memahami pengaruh temperatur dan tekanan.
- h. Kesimpulan - Merumuskan kesimpulan dari hasil penelitian untuk menjawab rumusan masalah dan memberikan kontribusi pengetahuan pada topik penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

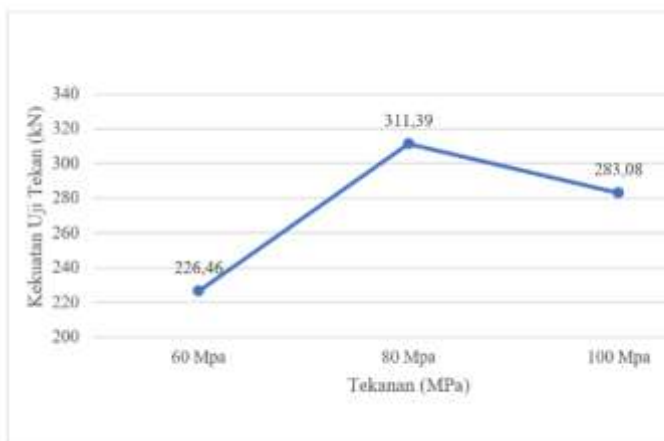
Seperti yang diuraikan pada bab III, penelitian ini merupakan penelitian eksperimen yang melibatkan 3 faktor utama. Faktor A pengaruh suhu terhadap sifat mekanik aluminium *sintering* jenis AA6061 dengan variasi temperatur 525,550,575°C . Faktor B yaitu variasi tekanan 60,80,100 MPa. Faktor C adalah kekuatan tekan material sebagai variabel terikat yang diamati akibat pengaruh variasi temperatur dan tekanan pada proses *sintering* aluminium *recycle* AA6061. Hasil pengujian

ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana variasi temperatur dan tekanan mempengaruhi kekerasan permukaan material pada proses *sintering* alumunium AA6061.

Tabel 1. Nilai hasil akhir yang digunakan pada variabel temperatur dan tekanan pada proses

Tekanan Temperatur	60 MPa	80 MPa	100 MPa
525°C	226,46	311,39	283,08
550°C	226,46	226,46	254,77
575°C	254,77	311,39	339,70

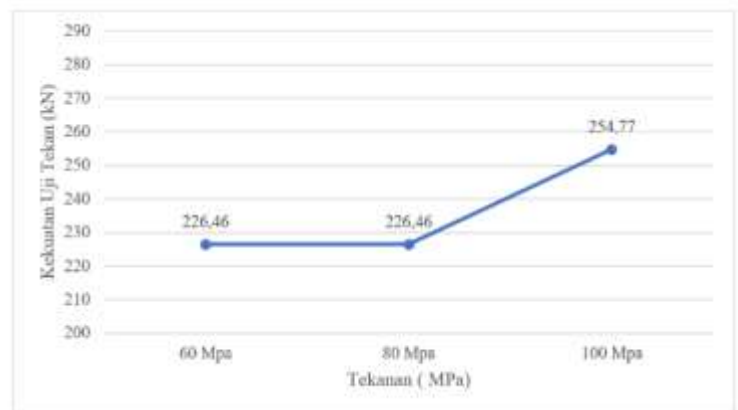
sintering



Gambar 3. Grafik pengaruh tekanan terhadap kekuatan tekan pada temperatur 525°C.

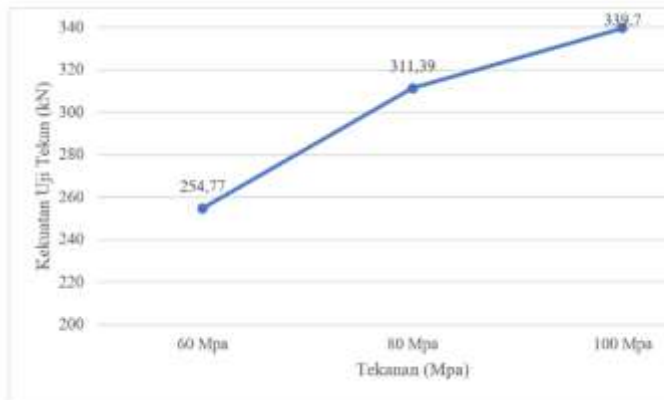
Berdasarkan Gambar 13, diketahui bahwa pada temperatur *sintering* 525°C nilai hasil uji tekan mengalami peningkatan dari 226,46 MPa pada tekanan 60 MPa menjadi 311,39 MPa pada tekanan 80 MPa. Namun, ketika tekanan ditingkatkan menjadi 100 MPa, nilai hasil uji tekan mengalami penurunan menjadi 283,08 MPa. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada temperatur 525°C, tekanan 80 MPa merupakan kondisi yang paling efektif dalam menghasilkan pemadatan partikel yang lebih

baik dibandingkan variasi tekanan lainnya. Penurunan nilai kuat tekan pada tekanan 100 MPa tidak disebabkan oleh besarnya tekanan yang diberikan, melainkan karena temperatur 525°C belum cukup tinggi untuk mendukung proses difusi antarpartikel secara optimal.



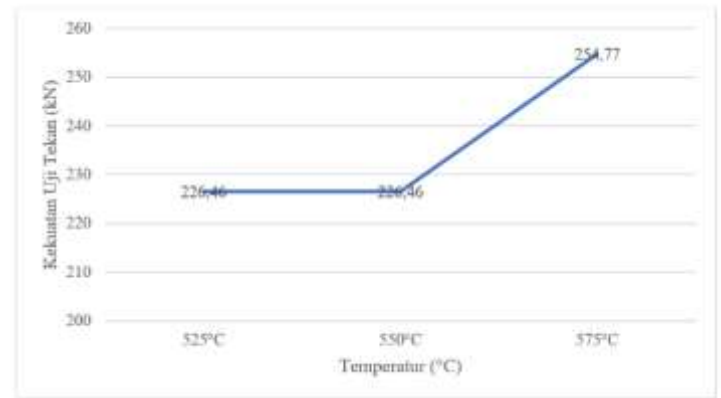
Gambar 4. Grafik pengaruh tekanan terhadap kekuatan tekan pada temperatur 550°C.

Berdasarkan Gambar 14, hasil uji tekan pada temperatur *sintering* 550 °C menunjukkan bahwa tekanan 60 MPa dan 80 MPa menghasilkan nilai kuat tekan yang sama, yaitu sebesar 226,46 MPa, sedangkan pada tekanan 100 MPa nilai kuat tekan meningkat menjadi 254,77 MPa. Nilai kuat tekan yang sama pada tekanan 60 MPa dan 80 MPa menunjukkan bahwa peningkatan tekanan pada rentang tersebut belum mampu menghasilkan perubahan yang berarti terhadap kualitas ikatan antar partikel. Peningkatan sifat mekanik baru terlihat pada tekanan 100 MPa, di mana kontak antarpartikel menjadi lebih rapat dan tingkat porositas mulai berkurang.



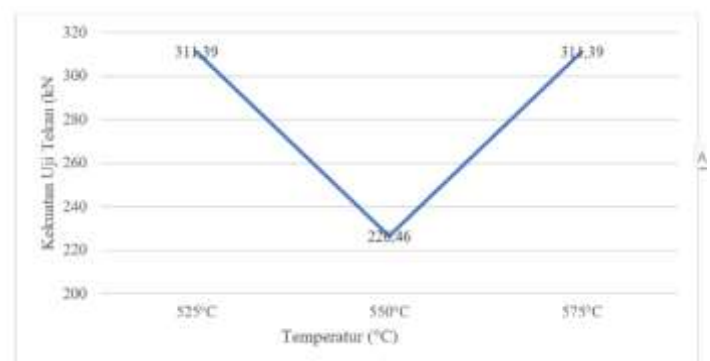
Gambar 5. Grafik pengaruh tekanan terhadap kekuatan tekan pada temperature 575°C

Berdasarkan Gambar 15, nilai hasil uji tekan menunjukkan peningkatan secara bertahap seiring dengan bertambahnya tekanan yang diberikan selama proses *sintering*. Pada tekanan 60 MPa diperoleh nilai kuat tekan sebesar 254,77 MPa, kemudian meningkat menjadi 311,39 MPa pada tekanan 80 MPa, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 339,70 MPa pada tekanan 100 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa temperatur 575°C merupakan kondisi yang paling efektif dalam mendukung proses *sintering*, karena energi panas yang diberikan telah cukup untuk mempercepat proses difusi dan memperkuat kontak antarpartikel. Dengan demikian, kombinasi temperatur 575°C dan tekanan 100 MPa menghasilkan karakteristik mekanik yang paling baik dibandingkan variasi perlakuan lainnya pada penelitian ini.



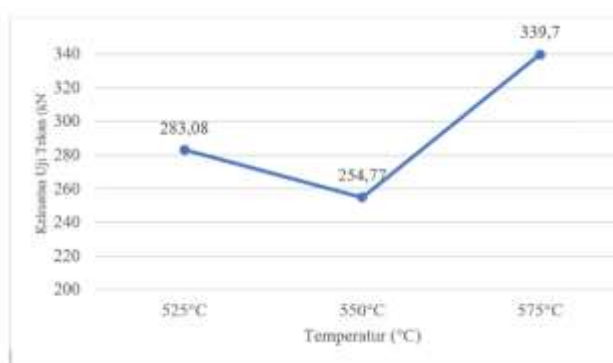
Gambar 6. Grafik pengaruh temperatur terhadap kekuatan tekan pada tekanan 60 MPa.

Berdasarkan Gambar 16, pada tekanan 60 MPa nilai hasil uji tekan cenderung mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan temperatur *sintering*. Nilai kuat tekan sebesar 226,46 MPa diperoleh pada temperatur 525°C dan 550°C, kemudian meningkat menjadi 254,77 MPa pada temperatur 575°C. Dengan demikian, temperatur 575°C dapat dikatakan sebagai temperatur yang lebih efektif dalam mendukung proses *sintering* pada tekanan 60 MPa dibandingkan temperatur yang lebih rendah.



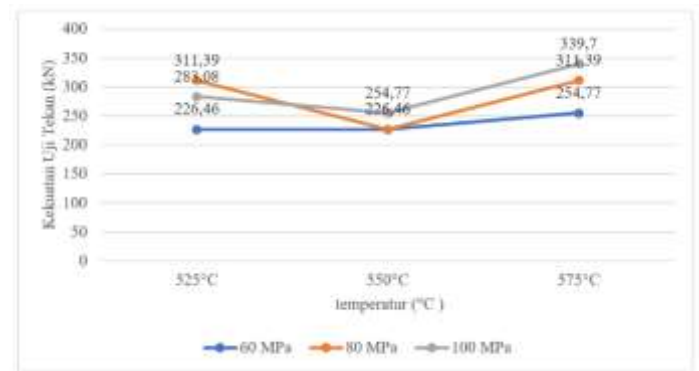
Gambar 7 : Grafik pengaruh temperatur terhadap kekuatan tekan pada tekanan 80 MPa.

Berdasarkan gambar 17 pada tekanan 80 MPa nilai hasil uji tekan tertinggi diperoleh pada temperatur 525°C dan 575°C, yaitu sebesar 311,39 MPa, sedangkan pada temperatur 550 °C diperoleh nilai yang lebih rendah, yaitu sebesar 226,46 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa temperatur 550°C belum mampu menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan temperatur lainnya pada tekanan 80 MPa.



Gambar 8 : Grafik pengaruh temperatur terhadap kekuatan tekan pada tekanan 100 MPa.

Pada tekanan 100 MPa nilai hasil uji tekan menunjukkan kecenderungan yang berfluktuasi terhadap peningkatan temperatur *sintering*. Nilai kuat tekan sebesar 283,08 MPa diperoleh pada temperatur 525°C, kemudian menurun menjadi 254,77 MPa pada temperatur 550°C, dan selanjutnya meningkat hingga mencapai nilai tertinggi sebesar 339,70 MPa pada temperatur 575°C.



Gambar 9. Grafik pengaruh temperature dan tekanan terhadap kekuatan tekan pada hasil *sintering*.

Terlihat bahwa setiap kombinasi temperatur dan tekanan menghasilkan nilai kuat tekan yang berbeda pada masing-masing *spesimen*. Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh pada kombinasi temperatur 575°C dan tekanan 100MPa, yaitu sebesar 339,70 MPa, sedangkan nilai terendah diperoleh pada kombinasi temperatur 525°C dengan tekanan 60 MPa dan temperatur 550°C dengan tekanan 60 MPa, yaitu sebesar 226,46 MPa.

KESIMPULAN

Kombinasi parameter optimum diperoleh pada temperatur 575°C dan tekanan 100 MPa, karena mampu menghasilkan densifikasi yang paling baik, mengurangi porositas, memperkuat ikatan antarpartikel, serta menghasilkan struktur material yang lebih homogen sehingga memberikan nilai kekuatan tekan tertinggi pada aluminium *recycle* AA6061 hasil *sintering*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. M. Altharan, S. Shamsudin, S. Al-Alimi, Y. Saif, and 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, p. e34433, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e34433.
- [2] X. Chen, M. Ben, S. Bruno, and L. Amine, “Recent advances in the remelting process for recycling aluminium alloy chips : a critical review,” 2025.
- [3] N. K. Yusuf, M. A. Lajis, and A. Ahmad, “Multiresponse Optimization and Environmental Analysis in Direct Recycling Hot Press Forging of,” 2019.
- [4] S. Al-alimi *et al.*, “Recycling Aluminium AA6061 Chips with Reinforced Boron,” 2022.
- [5] A. Cañadilla, J. P. Sanhueza, and E. Mar, “Effect of Sintering Temperature on Phase Formation and Mechanical Properties of Al – Cu – Li Alloy Prepared from Secondary Aluminum Powders,” 2025.
- [6] M. Irfan, A. Kadir, M. Sukri, and N. Abdul, “Microstructural Analysis and Mechanical Properties of Direct Recycling Aluminium Chips AA6061 / Al Powder Fabricated by Uniaxial Cold Compaction Technique,” *Procedia Eng.*, vol. 184, pp. 687–694, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.141.