

TINJAUAN LITERATUR: PENGARUH TEMPERATUR PADA PROSES EKSTRUSI PANAS DAN DINGIN PADA MATERIAL ALUMINIUM AA6061 TERHADAP MEKANISME REKRISTALISASI

Pebri Akhrus Mahrun^{1,a*}, Sri Hastuti^{2,b*}, Aurellia Zaini Sya'bania Putri³,
Nova Ariska Kusuma Wardhani⁴, Annisa Putri Cahyaningtyas⁵, Azril Hanif Falah⁶

^{1,2,3,4,5,6}Program Studi SI Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Tidar

E-mail : ^apebri.akhrus.mahrun@students.untidar.ac.id, ^bhastutisrimetin@untidar.ac.id

Masuk : 2 September 2025

Direvisi : 21 September 2025

Disetujui : 4 Oktober 2025

Abstrak: Penelitian ini mengkaji pengaruh suhu proses ekstrusi terhadap evolusi mikrostruktur/rekristalisasi, serta sifat mekanik paduan aluminium AA6061 melalui telaah literatur, analisis mikrostruktur, dan simulasi numerik *Finite Element Method (FEM)*. Tiga sumber utama dianalisis, mencakup proses ekstrusi chip AA6061 komposit AA6061 RHA hasil *solid-state recycling*. Hasil studi menunjukkan bahwa ekstrusi pada suhu rendah didominasi oleh *strain hardening* yang meningkatkan kekuatan namun menurunkan keuletan dan menyebabkan ikatan antar-partikel kurang optimal. Sebaliknya, ekstrusi panas pada rentang 450-550°C memicu rekristalisasi dinamis yang menghasilkan butir halus, peningkatan fraksi batas butir sudut tinggi, serta distribusi mikrostruktur yang lebih homogen. Temuan ini diperkuat oleh simulasi *FEM* yang menunjukkan penurunan tegangan alir dan aliran logam yang lebih seragam pada suhu 500°C dengan kecepatan ram 1–2 mm/s, sehingga meningkatkan kualitas bonding antar-chip. Peningkatan sifat mekanik berupa kenaikan kekerasan, kekuatan tarik, ketahanan aus, dan umur lelah dilaporkan pada seluruh studi berbasis ekstrusi panas. Secara keseluruhan, ekstrusi panas terbukti memberikan performa mikrostruktural dan mekanik yang lebih unggul dibanding ekstrusi dingin, dan sangat efektif digunakan dalam proses daur ulang chip aluminium AA6061 secara metalurgi.

Kata kunci: Ekstrusi Panas, Ekstrusi Dingin, Rekristalisasi Dinamis, Mikrostruktur AA6061.

Abstract: This study investigates the influence of extrusion temperature on the deformation mechanisms, microstructural evolution, and mechanical properties of AA6061 aluminum alloy through a comprehensive literature review, microstructural analysis, and Finite Element Method (FEM) simulations. Three primary sources were examined, including hot-extruded recycled AA6061 chips, AA6061 RHA composites. The findings show that low-temperature extrusion is dominated by strain hardening, which increases strength but reduces ductility and results in weak particle bonding with high porosity. In contrast, hot extrusion at 450–550°C activates dynamic recrystallization, producing refined grains, higher fractions of high-angle grain boundaries, and a more homogeneous microstructure. FEM simulations further confirm that billet heating at 500°C combined with a ram speed of 1–2 mm/s decreases flow stress, promotes uniform metal flow, and improves metallurgical bonding between chips. These microstructural improvements correlate with enhanced hardness, tensile strength, wear resistance, and fatigue life across all hot-extruded materials. Overall, hot extrusion provides superior mechanical performance and microstructural quality compared to cold extrusion, making it an effective approach for structural applications and metallurgical recycling of AA6061 aluminum chips.

Keywords: Hot Extrusion, Cold Extrusion, Dynamic Recrystallization, AA6061 Microstructure.

PENDAHULUAN

Paduan aluminium AA6061 banyak digunakan pada industri transportasi, konstruksi, dan komponen struktural karena memiliki kekuatan spesifik tinggi, ketahanan korosi yang baik, serta kemampuan untuk ditingkatkan performanya melalui perlakuan panas berbasis presipitasi Mg_2Si [1]. Selain itu, sifatnya yang mudah dibentuk, ringan, dan memiliki kestabilan termal yang baik menjadikan AA6061 sebagai salah satu paduan yang paling banyak dipilih dalam aplikasi rekayasa material [2]. Salah satu proses manufaktur yang umum digunakan untuk menghasilkan komponen berbasis AA6061 adalah ekstrusi, yaitu proses deformasi plastis di mana material dipaksa mengalir melalui cetakan untuk memperoleh profil tertentu [3].

Ekstrusi dapat dilakukan dalam dua kondisi, yaitu ekstrusi dingin dan ekstrusi panas yang dibedakan berdasarkan suhu proses terhadap suhu rekristalisasi material [2]. Pada ekstrusi dingin, deformasi terjadi di bawah suhu rekristalisasi sehingga pemulihan termal tidak terjadi. Kondisi ini menyebabkan peningkatan densitas dislokasi, pembentukan *sub-grain*, serta dominasi mekanisme pengerasan regangan (*strain hardening*). Meskipun dapat meningkatkan kekuatan, proses ini memiliki keterbatasan berupa kebutuhan gaya dorong tinggi, keuletan rendah, serta kurang efektif untuk penyatuan chip aluminium karena ikatan yang terbentuk cenderung bersifat mekanis [4].

Sebaliknya, ekstrusi panas dilakukan pada rentang suhu 450–550°C, di mana energi termal cukup untuk memicu proses rekristalisasi dinamis (*Dynamic Recrystallization/DRX*). Mekanisme ini menurunkan tegangan alir, menghaluskan struktur mikro, dan menghasilkan ikatan metalurgi antar-partikel yang lebih kuat [5]. Beberapa studi melaporkan bahwa peningkatan suhu ekstrusi secara signifikan mempengaruhi fraksi batas butir sudut tinggi (*High Angle Grain Boundaries/HAGBs*) hingga lebih dari 80%, menandakan pertumbuhan butir baru yang bebas regangan serta peningkatan homogenitas mikrostruktur. Perubahan mikrostruktur ini pada akhirnya berdampak langsung terhadap sifat mekanik seperti kekuatan tarik, ketangguhan, ketahanan aus serta umur lelah material [6].

Dengan demikian, suhu proses menjadi parameter kunci yang menentukan mikrostruktur, mekanisme deformasi serta performa mekanik akhir paduan AA6061. Oleh sebab itu, kajian ini meninjau secara kritis hubungan antara suhu ekstrusi, mekanisme rekristalisasi, dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik paduan AA6061 berdasarkan hasil simulasi numerik dan temuan eksperimental pada literatur yang tersedia.

METODOLOGI

Kajian ini dilakukan menggunakan metode studi literatur terhadap tiga sumber utama yang memuat data simulasi proses ekstrusi, analisis mikrostruktur, serta hasil pengujian mekanik pada paduan aluminium AA6061. Informasi mengenai karakter dasar ekstrusi panas dan dingin dianalisis untuk memahami hubungan antara suhu proses, mekanisme deformasi, dan perubahan struktur mikro.

Analisis numerik menggunakan data simulasi *Finite Element Method (FEM)* digunakan untuk mengevaluasi pengaruh suhu billet dan kecepatan ram terhadap distribusi panas, tegangan alir, dan deformasi selama ekstrusi [4]. Selanjutnya, karakterisasi mikrostruktur melalui *Electron Backscatter Diffraction (EBSD)* dianalisis untuk menilai evolusi batas butir, densitas dislokasi, serta indikasi rekristalisasi dinamis [7]. Akhirnya, perubahan struktur mikro dikaitkan dengan data uji kekerasan, kekuatan tarik, ketahanan aus (*wear*), dan umur lelah untuk menilai dampak langsung parameter proses terhadap sifat mekanik hasil ekstrusi AA6061 [8].

Studi-studi tersebut dianalisis secara komparatif untuk mengidentifikasi pola keterkaitan antara suhu proses, mekanisme rekristalisasi, dan perubahan sifat mekanik AA6061. Pendekatan ini memungkinkan penyusunan kesimpulan yang konsisten berdasarkan bukti kuat dari hasil eksperimen dan simulasi yang tersedia.

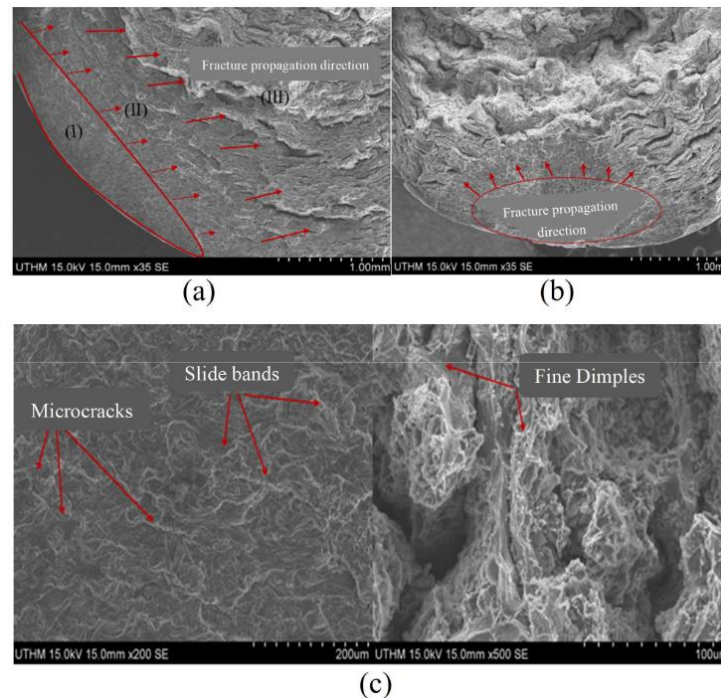
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil literatur disajikan pada Tabel 1 yang memuat perbedaan rentang suhu ekstrusi, karakteristik mikrostruktur, serta dampaknya terhadap performa mekanik material.

Tabel 1. Hasil Review

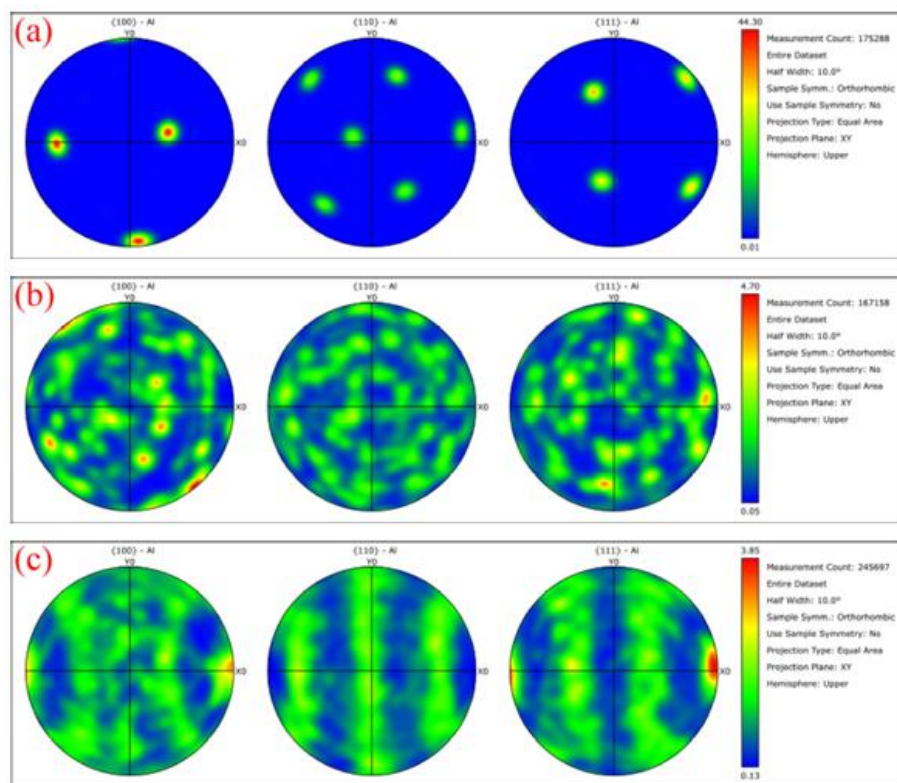
Sumber	Suhu	Hasil Rekristalisasi	Dampak pada Sifat Mekanik
[9]	450–500 °C	Distribusi panas meningkat, zona deformasi homogen, prediksi terjadinya rekristalisasi dinamis (<i>DRX</i>) pada temperatur tinggi, bonding antar-chip lebih baik	Penurunan gaya ekstrusi, peningkatan kualitas aliran logam, densifikasi lebih baik, kekuatan hasil ekstrusi meningkat
[10]	300–550 °C	Presipitasi Mg_2Si meningkat, porositas menurun, butir tumbuh namun lebih homogen, partikel RHA menghambat pertumbuhan butir berlebih	Kenaikan UTS (+45.7%), kekerasan naik (+26%), peningkatan umur lelah/ <i>fatigue life</i> dibanding sampel <i>non-HT</i>
[4]	400–760 °C	Fase eutektik Si, Fe-rich, dan Yb-phase terfragmentasi; <i>DRX</i> terbentuk; HAGBs meningkat; grain menjadi sangat halus dan orientasi <111> sejajar arah ekstrusi	Peningkatan kekerasan, penurunan laju aus hingga –53.8%, koefisien gesek turun –42.6%, ketahanan aus meningkat signifikan

Hasil *machining* aluminium AA6061 dengan memanfaatkan teknik *solid-state recycling* melalui proses ekstrusi panas. Komposit berbasis AA6061 dengan penambahan 5% *Rice Husk Ash (RHA)* diproses melalui rangkaian perlakuan termal bertingkat, mulai dari pemanasan awal pada 550°C untuk meningkatkan ikatan antar-chip (*chip welding*), ekstrusi panas pada 300°C, hingga dilanjutkan dengan proses *solution heat treatment* pada 530°C dan *aging* pada 175°C. Rangkaian perlakuan panas ini bertujuan memicu rekristalisasi, menghaluskan struktur mikro, serta memperbanyak terbentuknya presipitasi penguat Mg_2Si yang menjadi mekanisme utama dalam peningkatan kekerasan dan kekuatan tarik paduan aluminium seri 6xxx [9].



Gambar 1. Mikrostruktur SEM permukaan: (a) inisiasi retakan lelah, (b) wilayah perambatan rekahan, (c) topologi rekahan lelah [9]

Pada rujukan pertama, hasil pengamatan mikrostruktur menunjukkan bahwa proses pemanasan tinggi dan ekstrusi mampu mengurangi porositas secara signifikan sehingga densifikasi meningkat. Partikel RHA yang terdistribusi homogen berfungsi sebagai penghambat pertumbuhan butir sehingga mencegah terjadinya *grain coarsening* berlebih setelah ekstrusi. Sementara itu, proses *aging* menghasilkan presipitasi Mg_2Si yang terdistribusi halus di dalam matriks memperkuat paduan melalui mekanisme *precipitation hardening*. Rekristalisasi yang terjadi pada temperatur tinggi memungkinkan pembentukan butir baru yang lebih seragam dengan tingkat cacat dislokasi lebih rendah, sehingga struktur komposit menjadi lebih stabil secara termal dan mekanik. Dampaknya sangat signifikan terhadap sifat mekanik dimana kekuatan tarik meningkat sekitar 45.7% dibandingkan kondisi tanpa perlakuan panas, dan kekerasan meningkat hingga 26%. Selain itu, umur lelah material meningkat karena berkurangnya porositas yang biasanya menjadi titik inisiasi retak [9]. Dengan demikian, jurnal ini menegaskan bahwa kombinasi suhu tinggi, ekstrusi, dan perlakuan panas mampu menghasilkan komposit *recycled* AA6061 yang memiliki sifat mekanik mendekati material *billet* konvensional.

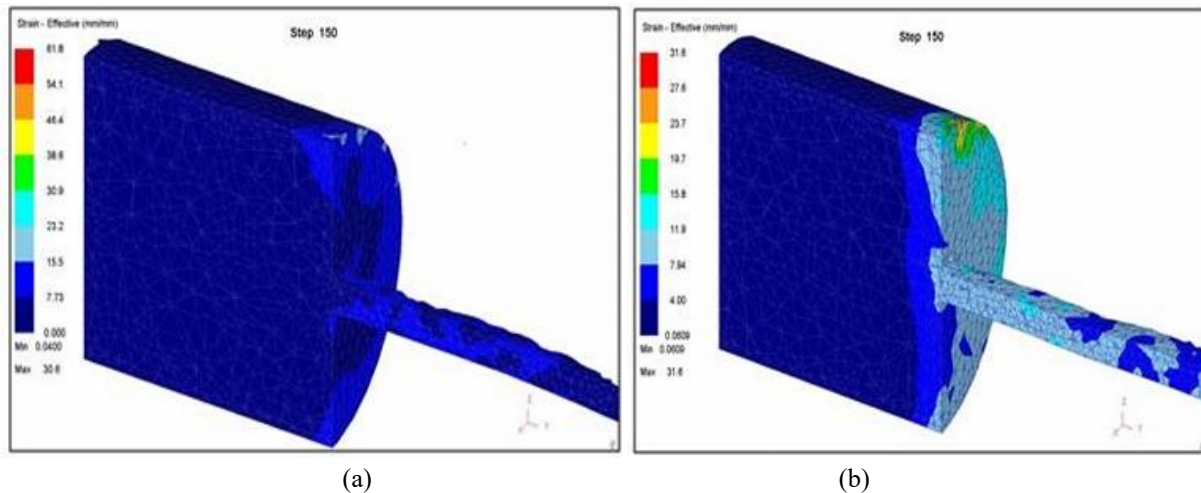


Gambar 2. Paduan aluminium [10]

Pada rujukan kedua, analisis mikrostruktur menggunakan *SEM* dan *EBSD* mengungkap bahwa Gambar 2. penambahan Yb menghasilkan fase Al-Yb yang menyebar merata di dalam matriks, sekaligus berperan sebagai *nucleation site* yang menghaluskan partikel eutektik Si. Fase Fe yang biasanya berbentuk jarum atau plat yang keras dan getas, berubah menjadi partikel-partikel kecil yang lebih bulat akibat tingginya energi deformasi selama ekstrusi. Selain itu, rekristalisasi dinamis selama ekstrusi pada 400°C menghasilkan peningkatan signifikan pada fraksi batas butir sudut tinggi (*High Angle Grain Boundaries, HAGBs*) hingga mencapai ~87.8%, yang menandakan terbentuknya butir halus baru dengan orientasi kristal dominan $\langle 111 \rangle$ dan $\langle 001 \rangle$ searah arah ekstrusi. Hal ini menyebabkan struktur mikro menjadi jauh lebih halus dan homogen dibandingkan kondisi *as-cast* [10].

Penghalusan struktur eutektik dan peningkatan HAGBs ini berdampak langsung pada peningkatan sifat mekanik, khususnya ketahanan aus. Jurnal ini melaporkan bahwa laju keausan menurun hingga 53.8%, dan koefisien gesek menurun

42.6% dibandingkan material tanpa penambahan Yb. Kekerasan material juga meningkat karena efek gabungan antara butir halus (*hall-petch strengthening*), distribusi fase keras Si dan Fe yang lebih halus, serta pembentukan fase Al-Yb yang stabil [9]. Dengan demikian, jurnal ini menegaskan bahwa modifikasi unsur dan suhu ekstrusi yang tepat dapat menghasilkan peningkatan sifat tribologi yang sangat signifikan, menjadikan paduan aluminium A380-Yb sangat potensial untuk aplikasi otomotif yang menuntut ketahanan aus tinggi.



Gambar 3. Kontur regangan kecepatan ram: (a) 1 mm/s; (b) 2 mm/s [4]

Hasil simulasi pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa pada suhu 500°C terjadi penurunan yang cukup besar pada tegangan alir material, yang menunjukkan bahwa aluminium menjadi lebih mudah mengalami deformasi plastis. Menurunnya tegangan alir ini membuat pola aliran logam menjadi lebih seragam dan mengurangi kemungkinan terbentuknya zona stagnan yang sering menjadi penyebab cacat dalam proses ekstrusi berbasis chip [4]. Selain itu, temperatur yang tinggi mampu menghasilkan distribusi panas yang lebih konsisten di seluruh billet, sehingga energi deformasi yang diterima material cukup untuk memicu terjadinya rekristalisasi dinamis pada daerah dengan intensitas deformasi tertinggi. Dalam kondisi tersebut, penggunaan kecepatan ram yang relatif rendah (1–2 mm/s) memberi waktu yang cukup bagi terjadinya difusi atom, sehingga ikatan antar-chip dapat terbentuk dengan lebih kuat. Sebaliknya, apabila kecepatan ram terlalu tinggi, aliran logam menjadi kurang stabil dan berpotensi menghasilkan cacat seperti antarmuka yang tidak menyatu (*unbonded interface*) atau ketidakteraturan aliran.

Secara keseluruhan simulasi menunjukkan bahwa penggunaan suhu pemanasan 500°C dengan kecepatan ram 1–2 mm/s merupakan kombinasi paling ideal untuk proses ekstrusi chip AA6061 [4]. Regangan efektif yang ditunjukkan pada Gambar 3(a) kecepatan ram 1 mm/s adalah 7,3 mm/mm dan Gambar 3(b), kecepatan ram 2 mm/s adalah 11,9 mm/mm. Kondisi ini tidak hanya meningkatkan kekuatan ikatan antar-chip dan menurunkan kebutuhan gaya ekstrusi, tetapi juga mendorong terbentuknya struktur butir baru melalui rekristalisasi dinamis. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian eksperimental pada jurnal pertama, sehingga mempertegas bahwa temperatur tinggi merupakan faktor kunci dalam meningkatkan kualitas hasil ekstrusi dari material berbasis chip aluminium.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil telaah literatur, simulasi FEM, dan analisis mikrostruktur dari ketiga studi, dapat disimpulkan bahwa suhu proses merupakan faktor paling berpengaruh dalam mengendalikan mekanisme deformasi, evolusi mikrostruktur, dan sifat mekanik akhir paduan aluminium AA6061 selama ekstrusi. Pada suhu rendah, seperti pada ekstrusi dingin, deformasi terjadi tanpa dukungan pemulihan termal sehingga material mengalami *strain hardening* yang meningkatkan kekuatan tetapi menurunkan keuletan, memperbesar tegangan sisa, serta membuat ikatan antar-partikel rentan terhadap porositas dan kegagalan

pada pembebanan siklik. Sebaliknya, pada suhu tinggi 450–550°C, energi termal cukup untuk memicu *Dynamic Recrystallization* yang menghasilkan butir halus, meningkatkan fraksi batas butir sudut tinggi (*HAGBs*), menyempurnakan homogenitas mikrostruktur, serta menurunkan tegangan alir sehingga deformasi menjadi lebih stabil dan ikatan metalurgi antar-chip lebih kuat. Kondisi ini terbukti meningkatkan kekerasan, kekuatan tarik, ketahanan aus, dan umur lelah hingga lebih dari 10^7 siklus setelah aging T6. Simulasi FEM semakin menegaskan bahwa peningkatan suhu billet dan pengaturan ram *speed* mendukung homogenisasi deformasi melalui pemanasan adiabatik, sementara distribusi panas yang tidak seragam dapat menyebabkan variasi ukuran butir sehingga kontrol parameter proses sangat krusial. Secara keseluruhan, ekstrusi panas menawarkan kombinasi sifat mekanik yang lebih unggul dibanding ekstrusi dingin, sehingga menjadi pilihan yang lebih efektif baik untuk aplikasi struktural maupun untuk proses daur ulang chip AA6061 secara metalurgi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Dewi, A. Alhamidi, and M. Fitrullah, “Studi mikrostruktur dan sifat mekanik Aluminium 6061 melalui proses canai dingin dan aging,” *J. Furn.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, 2016.
- [2] A. Alhamidi, M. Fitrullah, and M. Dewi, “Evolusi Mikrostruktur Paduan Al 6061 Hasil Proses Canai Dingin Terhadap Sifat Mekanik,” *Tek. J. Sains dan Teknol.*, vol. 12, no. 1, pp. 25–34, 2016.
- [3] R. A. Pratama, W. Saputro, A. Nurmawati, A. R. Y. Sunarti, and E. A. Saputro, “Efficiency of Curing Oven in Increasing Powder Maturity in Powder Coating Process in Aluminum Extrusion Plant,” *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur)*, vol. 9, no. 2, pp. 103–110, 2024.
- [4] S. N. A. Rahim, M. A. Lajis, and S. Ariffin, “Effect of extrusion speed and temperature on hot extrusion process of 6061 aluminum alloy chip,” *ARPJ. Eng. Appl. Sci.*, vol. 11, no. 4, pp. 2272–2277, 2016.
- [5] K. Remsak *et al.*, “Effects of Zn, Mg, and Cu Content on the Properties and Microstructure of Extrusion-Welded Al–Zn–Mg–Cu Alloys,” *Materials*, vol. 16, no. 19, p. 6429, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/ma16196429>.
- [6] S. Yunika, S. Aritionang, and R. K. Helmy, “Pengaruh Dissimilar Welding (MIL-DTL-46100 dan ISO-15608 1.2) Terhadap Sifat Mekanik Sambungan Las pada Kendaraan Tempur,” *J. Rekayasa Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 7, no. 1, pp. 44–55, 2024.
- [7] F. Gagliardi, G. Ambrogio, and L. Filice, “On the die design in AA6082 porthole extrusion,” *CIRP Ann.*, vol. 61, no. 1, pp. 231–234, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.122>.
- [8] L. Li, J. Zhou, and J. Duszczek, “Prediction of temperature evolution during the extrusion of 7075 aluminium alloy at various ram speeds by means of 3D FEM simulation,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 145, no. 3, pp. 360–370, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.09.003>.
- [9] A. S. Omar, S. Shamsudin, Y. M. Altharan, M. A. Lajis, and N. K. Yusuf, “The effect of solid-state process and heat treatment on the fatigue life of RHA-reinforced AA6061 chip-based recycled composite,” *AIMS Mater. Sci.*, vol. 12, no. 2, pp. 203–223, 2025, doi: <https://doi.org/10.3934/matersci.2025011>.
- [10] X. Ji, J. Xiong, W. Guan, Y. Qi, L. Zhou, and H. Li, “Effects of Hot Extrusion on the Microstructure and Wear Properties of A380-Yb Alloy,” *Metals*, vol. 14, no. 12, p. 1343, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/met14121343>.