

Optimisasi Sifat Mekanik Paduan Mg AZ91: Pengaruh Proses *Thixoforming* dan Homogenisasi terhadap Kekerasan, Kekuatan Tarik, dan Mikrostruktur

Adi Ganda Putra¹, Afrianto Sihalo², Mohamad Vicky¹, Pawawoi², dan Sony Sukmara³

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Manufaktur,
Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

² Program Studi Teknik Metalurgi, Fakultas Teknologi Manufaktur,
Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

³ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi dan Informatika,
Universitas Mathla ul Anwar, Banten, Indonesia

adi.ganda@lecture.unjani.ac.id, afriantosihalo@gmail.com, vickymohamad613@gmail.com,
sony_sukmana@yahoo.com, pawawoi@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Paduan Mg AZ91 merupakan material yang banyak digunakan dalam industri otomotif dan penerbangan karena rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi. Untuk aplikasi yang lebih luas, perlu dilakukan optimisasi sifat mekanik melalui berbagai proses perlakuan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh proses *thixoforming* dan homogenisasi terhadap kekerasan, kekuatan tarik, dan mikrostruktur paduan Mg AZ91. Pengujian dilakukan pada empat kondisi perlakuan, yaitu *as-cast*, *as-cast* dan *homogenizing*, *thixoforming*, dan *thixoforming* dan *homogenizing*. Hasil menunjukkan kondisi *thixoforming* diikuti oleh homogenisasi menghasilkan peningkatan kekerasan tertinggi (108,8 HB) dibandingkan dengan kondisi *as-cast* (65,1 HB). Kekuatan tarik mengalami peningkatan signifikan, dari 148,3 MPa pada kondisi *as-cast* menjadi 299,4 MPa pada kondisi *thixoforming* dan *homogenizing*. Selain itu, kekuatan luluh meningkat dari 82,6 MPa menjadi 277,2 MPa, sementara regangan meningkat dari 12,1% menjadi 14,475% pada kondisi yang sama. Mikrostruktur material menunjukkan perubahan dari struktur dendritik kasar pada kondisi *as-cast* menjadi struktur ekuiaxial dengan distribusi fasa α dan β yang lebih seragam setelah *thixoforming* dan homogenisasi. Porositas dan pengotor tetap terdeteksi pada kedua kondisi perlakuan, tetapi lebih terkendali setelah homogenisasi. Secara keseluruhan, *thixoforming* diikuti oleh homogenisasi memberikan optimisasi yang signifikan pada sifat mekanik dan mikrostruktur paduan Mg AZ91, menjadikannya lebih unggul untuk aplikasi teknik yang membutuhkan kekuatan tinggi dan keuletan.

Kata kunci: *homogenizing*, paduan Mg AZ91, *thixoforming*

Abstract

The Mg AZ91 alloy is commonly utilized in the automotive and aerospace sectors due to its excellent strength-to-weight ratio. However, to expand its usability, enhancements in its mechanical properties through specific treatments are required. This study investigates the impact of *thixoforming* and homogenization on the hardness, tensile strength, and microstructure of the Mg AZ91 alloy. Testing was carried out under four conditions: *as-cast*, *as-cast* with homogenization, *thixoforming*, and *thixoforming* combined with homogenization. Results revealed that the highest hardness value (108.8 HB) was achieved in the *thixoformed* and homogenized sample, compared to 65.1 HB in the *as-cast* condition. The tensile strength also increased significantly from 148.3 MPa to 299.4 MPa, with yield strength rising from 82.6 MPa to 277.2 MPa. Elongation improved slightly from 12.1% to 14.475%. Microstructural analysis showed a transition from coarse dendritic formations in the *as-cast* condition to a refined, equiaxed structure with uniform α and β phase distribution following *thixoforming* and homogenization. Although porosity and impurities were present in all samples, they were more effectively managed after homogenization. These findings indicate that combining *thixoforming* with homogenization effectively enhances the mechanical properties and microstructure of Mg AZ91 alloy, increasing its suitability for high-performance engineering applications.

Keywords: *homogenizing*, Mg AZ91 alloy, *thixoforming*

1. Pendahuluan

Info Makalah:

Dikirim : 10-09-24;
Revisi 1 : 03-14-25;
Diterima : 03-17-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-852-2164-8765
e-mail : adi.ganda@lecture.unjani.ac.id

Perkembangan material dalam beberapa tahun terakhir mengalami kemajuan yang signifikan sehingga memungkinkan untuk menemukan metode baru untuk memproduksi material berkualitas tinggi. Material ringan (*lightweight material*) seperti paduan Titanium, Aluminium dan Magnesium dapat menjadi pilihan yang menjanjikan untuk mengurangi beban pada struktur dan meningkatkan efisiensi energi (Kumar dkk., 2021). Salah satu material atau logam ringan yang ada di alam adalah Magnesium (Mg) memiliki densitas sebesar 1,7 gr/cm³ dengan rasio kekuatan terhadap berat

yang jauh lebih baik dibandingkan material baja dan Aluminium dan menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi di industri otomotif, dirgantara, dan elektronik (Shin dkk., 2023). Beberapa sifat lain yang dimiliki oleh Magnesium dan paduannya adalah konduktivitas termal yang baik, ketahanan terhadap korosi, kemampuan untuk dibentuk dan dilas yang baik serta kemampuan untuk menyerap getaran, yang membuatnya sangat cocok untuk berbagai aplikasi teknik (Annamalai dkk., 2019; T. Zhang dkk., 2022).

Beberapa penelitian sebelumnya paduan Magnesium memberikan informasi yang terbatas tentang perubahan mikrostruktur selama proses *thixoforming* dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik. Dengan hasil pengecoran (*as-cast*), paduan Magnesium memiliki mikrostruktur berbentuk dendrit yang akan berubah menjadi struktur globular yang halus setelah proses *thixoforming* (Chen dkk., 2014; Z. W. Huang dkk., 2013). Dengan struktur globular yang halus ini, sifat mekanik paduan Magnesium akan meningkat (Eroshenko dkk., 2022; Kubásek dkk., 2017). Kondisi semi-solid pada proses *thixoforming* menyebabkan energi antarmuka antara fasa cair dan fasa padat mengalami reduksi yang cukup signifikan sehingga dapat menjamin terjadinya transformasi fasa padat menjadi butir sferoidal yang halus (Jiang dkk., 2019). Pembentukan struktur globular pada paduan Magnesium sehingga menghasilkan butir yang globular porositas selama proses *thixoforming* belum bisa dihasilkan secara optimal sehingga masih diperlukan beberapa perlakuan yang berbeda sehingga menghadirkan peluang untuk penelitian lebih lanjut (Atay dkk., 2020).

Pada penelitian ini, paduan Magnesium AZ91 akan diproses *thixoforming* untuk memperoleh struktur butir globular yang halus. Paduan Magnesium tersebut kemudian menjalani proses perlakuan panas dengan variasi temperatur dan waktu untuk melihat perubahan ukuran dan bentuk pada struktur mikro serta kinematika dan evolusi bentuk butir akibat proses perlakuan panas ini. Hasil dari perlakuan panas ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru mengenai pengaruh parameter proses terhadap karakteristik mekanik dan sifat fisik paduan Magnesium AZ91, serta meningkatkan pemahaman tentang mekanisme pembentukan butir globular yang lebih efisien.

2. Metode

Proses penelitian ini akan menggunakan paduan Magnesium AZ91 sebagai bahan utama dengan komposisi yang terdiri dari 9% Aluminium dan 1% Seng. Kemudian paduan ini akan dilebur menggunakan tungku *Electric Resistance* pada temperatur 720 °C dengan *holding time* dan pengadukan selama 10 menit yang diikuti proses homogenisasi menggunakan *tube furnace* pada temperatur 415 °C selama 24 jam. Kemudian dilanjutkan dengan proses karakterisasi jumlah fraksi fasa cair dan padat pada temperatur *re-heating* dilakukan menggunakan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC). Setelah itu dilakukan proses *thixoforming* dengan memanaskan paduan pada temperatur 530 °C kemudian ditekan menggunakan gaya sebesar 100 kN dengan kecepatan injeksi 2,45 kN/s. Karakterisasi paduan Magnesium AZ91 ini meliputi uji kekerasan metode indentasi Brinell menggunakan beban 250 kg dan indentor bola baja yang berdiameter 5 mm sesuai ASTM E-10, dan uji tarik dilakukan berdasarkan standar ASTM E8/E8M dan ASTM B557 untuk mengetahui sifat mekaniknya dan pengujian metalografi untuk melihat struktur mikro serta analisis ukuran butir menggunakan metode Jeffries yang mengacu kepada ASTM E112-12.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengujian Spektrometri

Pengujian spektrometri dilakukan untuk menganalisis komposisi kimia paduan yang dihasilkan. Data yang diperoleh ditampilkan dalam Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Mg-Al-Zn

Uji ke-	Mg	Al	Zn	Cu	Mn	Fe	Si	Ni	Sn
1	86,458	11,273	1,816	0,144	0,037	>0,025	0,174	0,003	0,105
2	85,078	12,151	2,129	0,198	0,046	>0,025	0,2	0,002	0,099
3	92,564	5,399	1,559	0,127	0,025	>0,025	0,155	0,002	0,085
4	91,757	6,199	1,586	0,115	0,039	>0,025	0,142	0,002	0,08
5	83,7	13,449	2,217	0,214	0,043	>0,025	0,198	0,002	0,087
Rata-rata	87,911	9,674	1,861	0,162	0,038	>0,025	0,174	0,002	0,091

Tabel 1 menunjukkan adanya unsur-unsur lain yang terdeteksi dalam paduan AZ91 diluar unsur Magnesium (Mg), Aluminium (Al) dan Seng (Zn). Unsur-unsur tersebut seperti tembaga (Cu) dan silikon (Si) dengan komposisi yang cukup tinggi sebesar 0,16% dan 0,17%. Keberadaan unsur tembaga dan silikon dalam paduan AZ91 dapat mempengaruhi sifat mekanik dan ketahanan korosi paduan tersebut (WANG dkk., 2013). Hal ini juga berdampak pada struktur mikro serta ukuran butir yang dihasilkan (Zhao dkk., 2009). Komposisi utama paduan AZ91 seperti Magnesium, Aluminium dan Seng memiliki komposisi sebesar 87,91%, 9,67% dan 1,86%. Jika dibandingkan dengan standar JIS untuk paduan Magnesium AZ91, komposisi paduan ini tidak sesuai standar dengan persentase unsur Magnesium yang seharusnya minimal 90%.

Ketidaksesuaian ini terjadi karena unsur Magnesium memiliki titik leleh yang rendah sehingga mudah menguap selama proses peleburan (Quan dkk., 2011). Untuk mengurangi proses penguapan ini, unsur Magnesium pada proses peleburan dapat ditambahkan berlebih sehingga komposisi paduan dapat tercapai. Hal lain yang bisa dilakukan selain

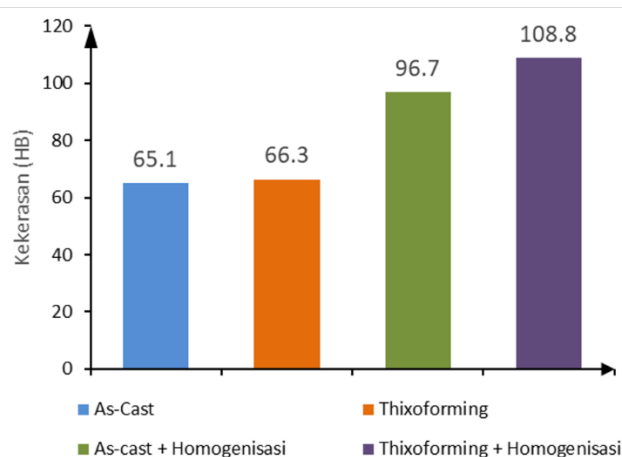
hal di atas adalah menambahkan Magnesium dalam bentuk senyawa seperti Magnesium Ferrosilikon atau Magnesium Klorida yang memiliki titik didih yang lebih tinggi sehingga dapat mengurangi kehilangan Magnesium selama proses peleburan (M. Kamal dkk., 2020). Pengendalian temperatur, waktu, dan atmosfer tungku selama proses peleburan juga memiliki pengaruh dalam mencegah penguapan Magnesium (Chalay-Amoly dkk., 2018). Walaupun demikian perlu diketahui bahwa penambahan Magnesium yang berlebih dapat menyebabkan pembentukan inklusi dan dapat menurunkan kekuatan mekanik Paduan (Zhou dkk., 2023). Penambahan Magnesium dalam bentuk senyawa juga tidak selalu efektif, karena dapat menghasilkan reaksi samping yang bisa merubah komposisi Paduan (SALVETR dkk., 2018). Hal yang paling utama dilakukan untuk mencapai komposisi yang sesuai adalah pendekatan yang lebih seimbang dan memperhatikan semua variabel proses peleburan untuk komposisi paduan AZ91 yang sesuai.

3.2 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk menentukan kemampuan paduan dalam menahan deformasi plastis dan memberikan ketahanan terhadap aus. Pada pengujian kekerasan ini dilakukan dengan menggunakan metode Brinell dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 1.

Pada kondisi *as-cast*, paduan Mg AZ91 menunjukkan kekerasan yang relatif rendah. Hal ini terjadi karena mikrostruktur yang terbentuk saat pengecoran umumnya terdiri dari butiran yang kasar dan distribusi fasa yang tidak merata, terutama fasa β ($Mg_{17}Al_{12}$) yang melimpah di batas butir (Shastri dkk., 2020). Struktur yang kasar ini mengurangi kekerasan dan sifat mekanik lainnya karena batas butir yang lemah dan tidak homogen (G. R. & Barik, 2021). Perlakuan homogenisasi setelah pengecoran meningkatkan kekerasan sedikit menjadi 66,3 HB. Proses ini mengurangi segregasi elemen paduan di sepanjang batas butir dan memperhalus distribusi fasa β (Ng dkk., 2022).

Meskipun ada peningkatan kekerasan, efeknya relatif kecil karena homogenisasi tidak sepenuhnya memodifikasi ukuran butir atau meningkatkan kekuatan batas butir secara signifikan (Lin dkk., 2020). Namun, struktur yang lebih homogen membuat material lebih konsisten dalam sifat-sifat mekanisnya. Pada proses *thixoforming*, terjadi perubahan signifikan dalam mikrostruktur, yang tercermin dalam peningkatan kekerasan menjadi 96,7 HB. *Thixoforming* adalah proses *semisolid* yang memungkinkan pengendalian mikrostruktur dengan butiran globular yang lebih halus serta distribusi fasa β yang lebih merata (Husain dkk., 2017).



Gambar 1. Kekerasan Paduan Mg AZ91 dengan Berbagai Proses Perlakuan

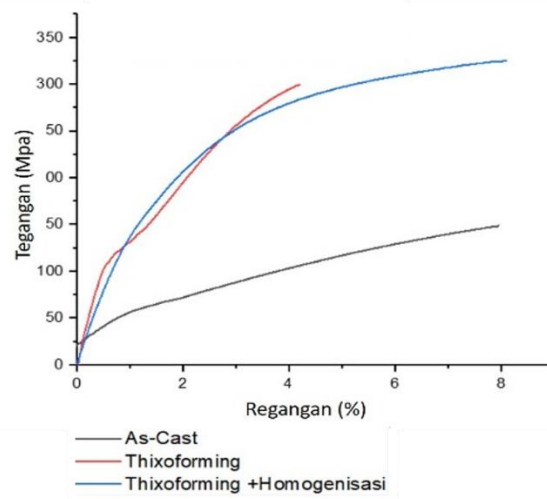
Proses ini meningkatkan kekerasan karena ukuran butir yang lebih kecil dan peningkatan kohesi di sepanjang batas butir, sehingga meningkatkan kekuatan keseluruhan material (Chokshi, 2020). Gabungan antara *thixoforming* dan homogenisasi menghasilkan kekerasan tertinggi, yaitu 108,8 HB. Ini disebabkan oleh optimalisasi mikrostruktur material: butiran menjadi lebih halus, distribusi fasa β lebih merata, dan segregasi elemen paduan berkurang secara signifikan. Proses ini juga meningkatkan stabilitas termal dan ketahanan material terhadap deformasi, menjadikan kekerasan dan sifat mekanik lainnya berada pada level yang optimal (Abdelgnei dkk., 2019).

3.3. Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik memberikan gambaran penting tentang kekuatan dan keuletan suatu material, termasuk paduan Mg AZ91, melalui tiga parameter utama: kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan regangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Pada kondisi *as-cast*, paduan Mg AZ91 menunjukkan kekuatan tarik dan kekuatan luluh yang relatif rendah. Hal ini disebabkan oleh mikrostruktur kasar yang terbentuk selama proses pengecoran, terutama adanya segregasi fasa β ($Mg_{17}Al_{12}$) di batas butir. Fasa β ini bersifat getas dan cenderung menurunkan kekuatan material (Sarvesha dkk., 2021). Meskipun regangan mencapai 12,1%, yang mengindikasikan material ini cukup ulet, kelemahan material di

sepanjang batas butir membatasi kekuatan mekanisnya secara keseluruhan (Qi dkk., 2021). Proses *thixoforming* paduan Mg AZ91 secara signifikan meningkatkan kekuatan tarik dan kekuatan luluh material, masing-masing menjadi 296,3 MPa dan 165,3 MPa. Proses ini mengubah mikrostruktur material dari butiran kasar menjadi butiran yang lebih halus dan berbentuk globular. Distribusi fasa β menjadi lebih seragam di dalam matriks, sehingga meningkatkan kohesi di sepanjang batas butir dan menurunkan kecenderungan material untuk retak (Xu dkk., 2017).



Gambar 2. Kekuatan Tarik, Kekuatan Luluh dan Regangan Paduan Mg AZ91 dengan Berbagai Proses Perlakuan

Namun, regangan menurun menjadi 8,9%, yang menunjukkan peningkatan kekuatan diikuti dengan sedikit pengurangan keuletan. Ini adalah kompromi umum antara kekuatan dan keuletan saat ukuran butir berkurang dan struktur material menjadi lebih kompak (Okayasu & Fukui, 2021). Gabungan proses *thixoforming* dan homogenizing menghasilkan performa mekanik terbaik. Kekuatan tarik meningkat sedikit menjadi 299,4 MPa, sementara kekuatan luluh mengalami peningkatan signifikan hingga mencapai 277,2 MPa. Peningkatan kekuatan luluh ini menunjukkan bahwa material memiliki kemampuan yang jauh lebih baik dalam menahan deformasi permanen sebelum mencapai titik luluh (S. Zhang dkk., 2018). Lebih penting lagi, regangan juga meningkat menjadi 14,475%, yang berarti material ini tidak hanya kuat, tetapi juga lebih ulet dibandingkan dengan kondisi *as-cast* maupun *thixoforming* tanpa homogenisasi. Homogenisasi setelah *thixoforming* menghilangkan segregasi elemen paduan yang tersisa, memperhalus distribusi fasa β , dan meningkatkan stabilitas butir sehingga material mampu menahan deformasi lebih besar sebelum gagal (Kusharjanto dkk., 2019; Nithin dkk., 2020).

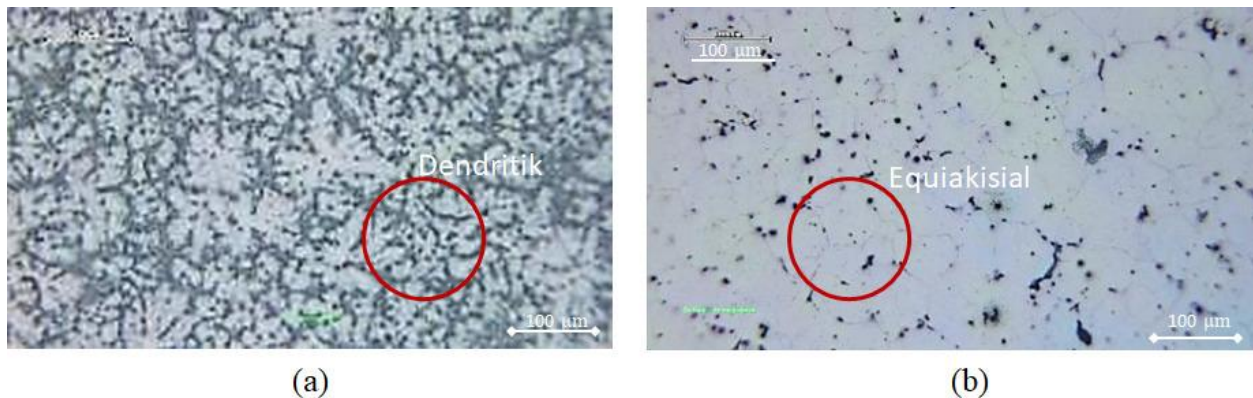
Berdasarkan hasil pengujian tarik, kombinasi antara *thixoforming* dan homogenisasi menghasilkan peningkatan signifikan dalam kekuatan dan keuletan paduan Mg AZ91 dibandingkan dengan kondisi *as-cast*. *Thixoforming* sendiri memberikan perbaikan besar dalam kekuatan mekanik dengan mikrostruktur yang lebih halus, tetapi homogenisasi selanjutnya memaksimalkan manfaatnya dengan menghilangkan sisa-sisa segregasi dan meningkatkan distribusi fasa (Campo & Zoqui, 2016). Hasilnya adalah material dengan kekuatan tarik dan kekuatan luluh yang jauh lebih tinggi serta peningkatan regangan, menjadikannya lebih kuat dan lebih tahan terhadap deformasi. Secara keseluruhan, perlakuan *thixoforming* dan *homogenizing* adalah solusi yang optimal untuk meningkatkan performa paduan Mg AZ91, karena memberikan kombinasi kekuatan dan keuletan yang terbaik.

3.4. Hasil Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro paduan Mg AZ91 memberikan informasi penting tentang mikrostruktur material setelah melalui berbagai proses perlakuan, termasuk *as-cast* dan *as-cast* and *homogenizing*. Mikrostruktur mempengaruhi sifat mekanik dan performa material secara signifikan, karena berbagai fasa dan fitur mikro seperti fasa α , fasa β , struktur butir, serta adanya porositas dan pengotor dapat mempengaruhi kekuatan, kekerasan, dan ketahanan terhadap deformasi. Hasil pengujian struktur mikro untuk paduan Mg AZ91 dengan proses *as-cast* dan homogenisasi ditunjukkan pada gambar 3. berikut ini.

Pada kondisi *as-cast*, mikrostruktur paduan Mg AZ91 umumnya ditandai oleh adanya struktur dendritik yang terbentuk selama pendinginan cepat dalam proses pengecoran. Struktur ini merupakan pola cabang seperti pohon yang terbentuk ketika fasa padat tumbuh dari fasa cair. Butiran dendritik biasanya kasar dan tidak seragam, yang bisa melemahkan material karena ketidakrataan komposisi di sepanjang butir (M. Huang dkk., 2019). Selanjutnya ada fasa α sebagai matriks (fase utama Mg) dan fasa β ($Mg_{17}Al_{12}$). Fasa α adalah fase matriks utama yang terdiri dari Magnesium *solid solution*. Pada kondisi *as-cast*, fasa α memiliki distribusi yang tidak merata dan sering dikelilingi oleh fasa β (Barbui dkk., 2022) dan fasa β terbentuk terutama di sepanjang batas butir dendritik. Fasa ini berperan

penting dalam meningkatkan kekerasan material, namun memiliki sifat yang getas. Fasa β yang berlebih atau distribusinya yang tidak optimal di sepanjang batas butir cenderung mengurangi kekuatan dan ketangguhan material (Liu dkk., 2014).



Gambar 3. Hasil Analisa Mikrostruktur Paduan Mg AZ91, (a) Struktur Dendritik pada As-Cast, dan (b) Struktur Ekuiaksial pada As-Cast + Homogenisasi

Setelah proses homogenisasi, terjadi beberapa perubahan dalam struktur mikro yang signifikan. Pertama, perubahan struktur dendritik menjadi struktur ekuiaksial, yaitu butiran yang lebih seragam dan berbentuk bulat. Struktur ekuiaksial lebih diinginkan dalam banyak aplikasi karena memberikan peningkatan kekuatan dan kekerasan melalui pengurangan ukuran butir dan distribusi yang lebih merata (Ohno dkk., 2023). Kedua, fasa α menjadi lebih homogen dan seragam, menghilangkan segregasi elemen paduan di dalam butir dan distribusi fasa β juga menjadi lebih halus dan merata, tidak lagi terkonsentrasi hanya di batas butir seperti pada kondisi *as-cast*. Pengurangan segregasi fasa β di sepanjang batas butir meningkatkan kohesi antar butir, yang secara langsung meningkatkan kekuatan luluh dan kekuatan Tarik (Zhuang dkk., 2020).

Perbedaan utama antara kondisi *as-cast* dan *as-cast and homogenizing* adalah perubahan struktur mikro dari dendritik menjadi ekuiaksial serta distribusi fasa yang lebih seragam. Pada kondisi *as-cast*, struktur dendritik dan fasa β yang terkonsentrasi di batas butir menciptakan kelemahan mekanik, seperti kekuatan tarik dan kekuatan luluh yang lebih rendah. Homogenisasi memperbaiki kelemahan tersebut dengan menciptakan butir yang lebih halus dan distribusi fasa yang lebih merata, yang secara signifikan meningkatkan kekuatan dan ketahanan terhadap deformasi.

Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi proses *thixoforming* dan homogenisasi secara signifikan meningkatkan sifat mekanik paduan Mg AZ91, baik dalam hal kekerasan, kekuatan tarik, kekuatan luluh, maupun regangan. Proses *thixoforming* mengubah mikrostruktur dari bentuk dendritik menjadi butiran ekuiaksial yang lebih halus, sementara homogenisasi memperbaiki distribusi fasa α dan β , mengurangi segregasi di batas butir, serta meningkatkan stabilitas mikrostruktur. Kekuatan tarik meningkat hampir dua kali lipat, sementara kekuatan luluh meningkat lebih dari tiga kali lipat dibandingkan dengan kondisi *as-cast*. Peningkatan kekerasan juga tercatat secara signifikan setelah *thixoforming* dan homogenisasi. Oleh karena itu, kombinasi perlakuan *thixoforming* dan homogenisasi menawarkan potensi besar untuk meningkatkan performa paduan Mg AZ91 dalam aplikasi industri yang memerlukan kombinasi antara kekuatan, kekerasan, dan keuletan yang tinggi.

Daftar Pustaka

- Abdelgnei, M. A., Omar, M. Z., & Ghazali, M. J. (2019). Wear Properties of Thixoformed Al-5.7Si-2Cu-0.3Mg Aluminium Alloy. *Solid State Phenomena*, 285, 63–68. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.285.63>
- Annamalai, S., Periyakoundar, S., & Gunasekaran, S. (2019). Magnesium alloys: a review of applications. *Materiali in Tehnologije*, 53(6), 881–890. <https://doi.org/10.17222/mit.2019.065>
- Atay, H. Y., Aışman, D., Jirková, H., Behulova, M., & Mašek, B. (2020). Use of Thixoforming as a Manufacturing Method for Metallic Composites. *Metals and Materials International*, 26(9), 1420–1429. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00373-5>
- Barbui, M., Volya, A., Aboud, E., Ahn, S., Bishop, J., Goldberg, V. Z., Hooker, J., Hunt, C. H., Jayatissa, H., Kokalova, Tz., Koshchiy, E., Pirrie, S., Pollacco, E., Roeder, B. T., Saastamoinen, A., Upadhyayula, S., Wheldon, C., & Rogachev, G. V. (2022). α -cluster structure of $\langle \text{Ne} \rangle$. *Physical Review C*, 106(5), 054310. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.106.054310>

- Campo, K. N., & Zoqui, E. J. (2016). Thixoforming of an ECAPed Aluminum A356 Alloy: Microstructure Evolution, Rheological Behavior, and Mechanical Properties. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(4), 1792–1802. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3339-4>
- Chalay-Amoly, A., Fatemi, S. M., & Zarei-Hanzaki, A. (2018). MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF AN AZ91 MAGNESIUM ALLOY PROCESSED THROUGH BACKWARD EXTRUSION. *Archives of Metallurgy and Materials*. <https://doi.org/10.24425/118922>
- Chen, Q., Yuan, B., Lin, J., Xia, X., Zhao, Z., & Shu, D. (2014). Comparisons of microstructure, thixoformability and mechanical properties of high performance wrought Magnesium alloys reheated from the as-cast and extruded states. *Journal of Alloys and Compounds*, 584, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.08.218>
- Chokshi, A. H. (2020). Grain Boundary Processes in Strengthening, Weakening, and Superplasticity. *Advanced Engineering Materials*, 22(1). <https://doi.org/10.1002/adem.201900748>
- Eroshenko, A., Luginin, N., Legostaeva, E., Tolmachev, A., Glukhov, I., Uvarkin, P., Sharkeev, Y., & Schmidt, J. (2022). Effect of severe plastic deformation on structure and mechanical properties of Magnesium alloy Mg–Ca. 020068. <https://doi.org/10.1063/5.0085470>
- G. R., A., & Barik, D. (2021). Roughness in the periodic potential enhances transport in a driven inertial ratchet. *Physical Review E*, 104(2), 024103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.104.024103>
- Gupta, M., & Wong, W. L. E. (2015). An Introduction to Lightweight, Energy Saving, Environment Friendly Magnesium Based Nanocomposites: Materials of Upcoming Generation. *Advanced Materials Research*, 1125, 3–7. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1125.3>
- Huang, M., Zhang, G., Wang, D., Ge, Z., Lu, Y., Jiang, X., & Lou, L. (2019). Dendritic branching patterns in platforms of complex Ni-based single crystal castings. *China Foundry*, 16(2), 110–117. <https://doi.org/10.1007/s41230-019-8080-3>
- Huang, Z. W., Huang, J., Deng, T. Q., Huang, X. X., Sun, C. J., Xiao, Y. L., Zhang, R. C., Su, Z. Q., & Hua, Z. H. (2013). Globular structure generation and mechanical properties of thixoformed Magnesium alloy. *Materials Research Innovations*, 17(sup1), 156–161. <https://doi.org/10.1179/1432891713Z.000000000237>
- Husain, N. H., Ahmad, A. H., & Rashidi, M. M. (2017). An overview of thixoforming process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 257, 012053. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/257/1/012053>
- Jiang, J. F., Liu, Y. Z., Xiao, G. F., & Wang, Y. (2019). Thixoforming of Semisolid Slurry with High Fraction Solid Fabricated by Partial Melting of Commercial Wrought Aluminum Alloys. *Solid State Phenomena*, 285, 210–218. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.285.210>
- Kubásek, J., Vojtěch, D., & Dvorský, D. (2017). The effect of thermo-mechanical processing on the structure, static mechanical properties and fatigue behaviour of pure Mg. *Materiali in Tehnologije*, 51(2), 289–296. <https://doi.org/10.17222/mit.2016.029>
- Kumar, D., Phanden, R. K., & Thakur, L. (2021). A review on environment friendly and lightweight Magnesium-Based metal matrix composites and alloys. *Materials Today: Proceedings*, 38, 359–364. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.424>
- Kusharjanto, K., Soepriyanto, S., Korda, A. A., & Dwiwanto, S. A. (2019). Effect of ZnO Nanoparticles on Grain Refinement of Mg-Al-Zn Alloy by Thixoforming Process. *Key Engineering Materials*, 811, 170–178. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.811.170>
- Lin, Y., Zhu, J., Han, J., Ma, X., & Wang, G. (2020). Effect of strains in grain boundary modification on plasticity and plasticizing mechanism of commercial-purity nickel. *Materials Today Communications*, 24, 101177. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101177>
- Liu, H., Gao, Y., Zhu, Y. M., Wang, Y., & Nie, J. F. (2014). A simulation study of β 1 precipitation on dislocations in an Mg–rare earth alloy. *Acta Materialia*, 77, 133–150. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.04.054>
- M. Kamal, M. R., Bazilah, N. F., Idris, M. H., Salleh, M. S., & W. Ali, W. F. F. (2020). Effect of semi-solid forming temperature and heat treatment on mechanical properties and microstructure of Mg-Al-Zn Alloy (AZ91D) for automotive light application. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 14(4), 7319–7327. <https://doi.org/10.15282/jmes.14.4.2020.01.0575>
- Ng, C. H., Bermingham, M. J., Yuan, L., & Dargusch, M. S. (2022). Towards β -fleck defect free additively manufactured titanium alloys by promoting the columnar to equiaxed transition and grain refinement. *Acta Materialia*, 224, 117511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117511>
- Nithin, A. M., Davidson, M. J., & Rao, C. S. P. (2020). Mechanical and Metallurgical Studies on Thixoextruded Al-Si Alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(10), 6378–6389. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05143-8>
- Ohno, M., Kudo, M., Kim, G., Yamada, R., Shibuta, Y., & Takaki, T. (2023). Time evolution of interface shape distribution of equiaxed dendrite: A phase-field study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1274(1), 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1274/1/012042>

- Okayasu, M., & Fukui, T. (2021). A study of the mechanical properties of a Mg-Al-Zn alloy (AZ91) produced via Thixomolding. *International Journal of Material Forming*, 14(2), 271–280. <https://doi.org/10.1007/s12289-020-01589-2>
- Qi, Y. L., Zhao, L., Sun, X., Zong, H. X., Ding, X. D., Jiang, F., Zhang, H. L., Wu, Y. K., He, L., Liu, F., Jin, S. B., Sha, G., & Sun, J. (2021). Enhanced mechanical performance of grain boundary precipitation-hardened high-entropy alloys via a phase transformation at grain boundaries. *Journal of Materials Science & Technology*, 86, 271–284. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.01.061>
- Quan, G.-Z., Kang, B.-S., Ku, T.-W., & Song, W.-J. (2011). Identification for the optimal working parameters of Al–Zn–Mg–Cu alloy with the processing maps based on DMM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(9–12), 1069–1078. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3241-6>
- SALVETR, P., ŠKOLÁKOVÁ, A., & NOVÁK, P. (2018). Effect of Magnesium addition on the structural homogeneity of NiTi alloy produced by self-propagating high-temperature synthesis. *Metallic Materials*, 55(06), 379–383. https://doi.org/10.4149/km_2017_6_379
- Sarvesha, R., Chalapathi, D., Yadava, M., Jain, J., & Singh, S. S. (2021). In-situ studies on deformation and fracture characteristics of AZ91 Mg alloy. *Materialia*, 18, 101177. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101177>
- Shastri, H., Mondal, A. K., Dutta, K., Dieringa, H., & Kumar, S. (2020). Microstructural correlation with tensile and creep properties of AZ91 alloy in three casting techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 566–573. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.010>
- Shin, C.-H., Lee, H.-Y., Gyan-Barimah, C., Yu, J.-H., & Yu, J.-S. (2023). Magnesium: properties and rich chemistry for new material synthesis and energy applications. *Chemical Society Reviews*, 52(6), 2145–2192. <https://doi.org/10.1039/D2CS00810F>
- WANG, L., CHEN, T., JIANG, W., FENG, Y., DONG, W., WANG, Z., LIANG, Z., & ZHU, Y. (2013). Grain coarsening in semi-solid state and tensile mechanical properties of thixoformed AZ91D-RE. *Journal of Rare Earths*, 31(3), 319–326. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(12\)60279-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(12)60279-8)
- Xu, Y., Jia, J., Chen, C., Liu, W., Luo, S., Yang, Y., & Hu, L. (2017). Thixoforming of semi-solid AZ91D alloy with high solid fraction prepared by the RUE-based SIMA process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(9–12), 4317–4328. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0874-0>
- Zhang, S., Chen, T., Zhou, J., Xiu, D., Li, T., & Cheng, K. (2018). Mechanical Properties of Thixoforged In Situ Mg2Si/AM60B Composite at Elevated Temperatures. *Metals*, 8(2), 106. <https://doi.org/10.3390/met8020106>
- Zhang, T., Wang, W., Liu, J., Wang, L., Tang, Y., & Wang, K. (2022). A review on Magnesium alloys for biomedical applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.953344>
- Zhao, Z., Chen, Q., Kang, F., & Shu, D. (2009). Microstructural evolution and tensile mechanical properties of thixoformed AZ91D Magnesium alloy with the addition of yttrium. *Journal of Alloys and Compounds*, 482(1–2), 455–467. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.04.059>
- Zhou, S., Liu, T., Tang, A., Huang, Y., Peng, P., Zhang, J., Hort, N., Willumeit-Römer, R., & Pan, F. (2023). Designing Mg alloys with high strength and ductility by reducing the strength difference between the basal and non-basal slips. *Materials & Design*, 225, 111476. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111476>
- Zhuang, Y., Wang, H., Li, H., Zheng, L., Li, J., & Zhou, P. (2020). Synergistic Effect of Grain Size, β -Mg₁₇Al₁₂, and Texture on Mechanical Properties of Mg-15Al (wt.%) Magnesium Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(7), 4360–4369. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04991-8>