



Karakterisasi Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Paduan Al-Mg-Si Hasil *Squeeze Casting* Setelah Perlakuan Homogenisasi

Venty Lestari

Jurusan Teknik Pertambangan, Universitas Sriwijaya, Indonesia

*Penulis Korespondensi: ventylestari@unsri.ac.id

Abstract. *Al–Mg–Si aluminum alloys are widely utilized in engineering applications due to their low density, excellent corrosion resistance, and mechanical properties that can be modified through heat treatment. This study investigates the effect of homogenization on the microstructure and hardness of Al–Mg–Si alloys produced by the squeeze casting process. The experimental procedure involved alloy melting, squeeze casting at 76 MPa using preheated metal molds, followed by homogenization at 400 °C for 4 hours. Microstructural characterization was performed using optical microscopy to examine the dendritic morphology and measure the secondary dendrite arm spacing (SDAS). Mechanical properties were evaluated through Vickers microhardness and Rockwell macrohardness testing. The results show that homogenization increases the SDAS from 32.59 μm to 36.88 μm and decreases the volume fraction of interdendritic phases from 15.51% to 13.57%. Furthermore, microhardness decreased from 50.22 VHN to 38.58 VHN, while macrohardness decreased from 54.60 HRE to 46.64 HRE. These reductions are attributed to the partial dissolution of Mg₂Si precipitates into the aluminum matrix during homogenization. Overall, this research provides valuable insight into the optimization of initial heat treatment parameters for Al–Mg–Si alloys produced by squeeze casting. The findings highlight the role of homogenization in improving microstructural uniformity and preparing the alloy for subsequent deformation processes such as cold rolling and extrusion, particularly for structural components used in mining and heavy transportation industries.*

Keywords: *Al-Mg-Si; Hardness; Homogenization; Microstructure; Squeeze Casting.*

Abstrak. Paduan aluminium Al-Mg-Si banyak digunakan dalam industri teknik karena ringan, tahan korosi, dan memiliki sifat mekanik yang dapat dimodifikasi melalui perlakuan panas. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh perlakuan homogenisasi terhadap struktur mikro dan kekerasan paduan Al-Mg-Si yang dibuat melalui metode *squeeze casting*. Metode yang digunakan meliputi peleburan paduan Al-Mg-Si, *squeeze casting* dengan tekanan 76 MPa menggunakan cetakan logam yang dipanaskan, dan perlakuan homogenisasi pada temperatur 400 °C selama 4 jam. Karakterisasi struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik untuk mengamati morfologi dendrit dan menghitung nilai *secondary dendrite arm spacing* (SDAS), sedangkan sifat mekanik diuji melalui pengukuran kekerasan mikro (Vickers) dan makro (Rockwell). Hasil penelitian menunjukkan bahwa homogenisasi meningkatkan nilai SDAS dari 32,59 μm menjadi 36,88 μm dan menurunkan volume fasa interdendritik dari 15,51% menjadi 13,57%. Selain itu, terjadi penurunan kekerasan mikro dari 50,22 VHN menjadi 38,58 VHN, serta kekerasan makro dari 54,60 HRE menjadi 46,64 HRE. Penurunan ini disebabkan oleh pelarutan sebagian presipitat Mg₂Si ke dalam matriks aluminium. Penelitian ini berguna untuk menginformasikan parameter optimal perlakuan panas awal pada paduan Al-Mg-Si hasil *squeeze casting*, untuk meningkatkan homogenitas mikrostruktur dan mempersiapkan material untuk proses deformasi plastis lanjutan seperti canai dingin dan ekstrusi pada aplikasi struktural di sektor pertambangan dan transportasi berat.

Kata kunci: Al-Mg-Si; Homogenisasi; Kekerasan; *Squeeze Casting*; Struktur Mikro.

1. LATAR BELAKANG

Paduan aluminium merupakan salah satu material teknik yang paling banyak digunakan dalam industri modern karena kombinasi unggul antara massa jenis yang rendah, ketahanan korosi tinggi, serta sifat mekanik yang dapat dimodifikasi melalui perlakuan panas dan deformasi (Vargel, 2020). Di antara berbagai jenis paduan aluminium, seri 6xxx yang mengandung magnesium (Mg) dan silikon (Si) sebagai unsur paduan utama, (sistem Al-Mg-Si), dikenal memiliki keseimbangan yang baik antara kekuatan tarik, ketahanan korosi, dan kemampuan formabilitasnya (Lenard, 2000 & Hennum et al., 2024). Keunggulan tersebut

menjadikan paduan ini banyak diaplikasikan pada struktur arsitektural, sistem rangka otomotif, struktur jembatan, hingga alat berat untuk sektor tambang, karena kemampuannya untuk diekstrusi menjadi berbagai bentuk geometri yang kompleks.

Kekuatan mekanik paduan Al-Mg-Si dipengaruhi oleh presipitasi fasa penguat Mg_2Si yang terbentuk selama perlakuan panas (Beida et al., 2016). Namun demikian, proses pengecoran yang menjadi tahap awal dalam manufaktur paduan ini sering menghasilkan struktur mikro dendritik yang heterogen, mengandung segregasi unsur, dan membentuk fasa interdendritik seperti $AlFeSi$ dan Mg_2Si dalam bentuk lamelar atau *Chinese script*. Keberadaan struktur ini dapat mengurangi keseragaman sifat mekanik, menurunkan performa deformasi lanjutan, dan meningkatkan risiko inisiasi retak selama proses pembentukan (Baruah et al., 2020 & Liu, 1999).

Salah satu untuk mengatasi ketidakhomogenan struktur mikro adalah melalui proses homogenisasi, yaitu perlakuan panas pada temperatur antara 400–560 °C untuk mendorong difusi unsur dari daerah interdendritik menuju matriks aluminium (Osterreicher et al., 2017). Perlakuan ini mampu melarutkan fasa keras seperti Mg_2Si , mengubah morfologi fasa intermetalik, serta meningkatkan nilai *Secondary Dendrite Arm Spacing* (SDAS) sebagai indikator berlangsungnya difusi internal yang intensif (Redetic et al., 2022). Namun, meskipun homogenisasi meningkatkan homogenitas struktur mikro, sejumlah penelitian melaporkan penurunan nilai kekerasan akibat presipitat penguat selama perlakuan larut kembali (Li et al., 2022). Penurunan ini sering dianggap sebagai kelemahan, padahal dalam konteks proses deformasi lanjutan seperti canai dingin (*cold rolling*) atau ekstrusi, kondisi struktur mikro yang lebih lunak dan seragam justru dapat meningkatkan *formability* dan mengurangi risiko inisiasi retak.

Hingga saat ini, kajian eksperimental mengenai hubungan kuantitatif antara homogenisasi pada temperatur menengah dan perubahan nilai SDAS serta kekerasan pada paduan Al-Mg-Si hasil proses *squeeze casting* masih terbatas. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada paduan hasil ekstrusi atau *direct chill casting*, sementara karakterisasi struktur mikro terhadap produk *squeeze casting* yang mengalami tekanan saat solidifikasi masih minim, padahal proses ini berpotensi menghasilkan mikrostruktur yang lebih padat dan minim porositas.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh perlakuan homogenisasi pada temperatur 400 °C selama 4 jam terhadap perubahan struktur mikro (morfologi dendritik dan nilai SDAS) serta sifat mekanik berupa kekerasan mikro dan makro dari paduan Al-Mg-Si hasil *squeeze casting*. Penelitian ini mengintegrasikan

karakterisasi mikrostruktur melalui pengamatan optik dengan pengukuran kuantitatif, serta pengujian kekerasan berdasarkan standar ASTM untuk memperoleh gambaran komprehensif mengenai dampak perlakuan homogenisasi pada sampel.

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam optimalisasi parameter perlakuan panas awal pada proses manufaktur paduan aluminium untuk aplikasi teknik lanjutan. Secara praktis, temuan ini relevan untuk mendukung pengembangan komponen berbasis paduan Al-Mg-Si di sektor pertambangan dan transportasi berat, terutama untuk struktur ringan berkekuatan tinggi yang memerlukan stabilitas bentuk dan ketahanan terhadap beban dinamis selama operasi.

2. KAJIAN TEORITIS

Paduan Al-Mg-Si dan Aplikasinya

Paduan aluminium seri 6xxx, khususnya sistem Al-Mg-Si, dikenal memiliki kombinasi antara kekuatan mekanik, ketahanan korosi, kemampuan formabilitasnya yang tinggi, serta kemampuan ekstrusi (*extrudability*) yang baik (Lenard, 2000). Paduan ini banyak dimanfaatkan pada berbagai aplikasi arsitektur dan struktural, termasuk pintu, kusen, jendela, sistem rak, serta berbagai komponen pada industri otomotif (Vargel, 2020). Keunggulan ini berasal dari presipitasi Mg_2Si yang terbentuk selama proses perlakuan panas, yang berfungsi sebagai mekanisme penguatan melalui perlakuan *precipitation hardening*. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa presipitasi fasa β - Mg_2Si selama tahap pendinginan pasca-homogenisasi berpengaruh signifikan terhadap perubahan kekuatan dan nilai kekerasan akhir paduan cor (Hennum et al., 2024).

Struktur Mikro dan SDAS

Struktur mikro hasil pengecoran logam umumnya menunjukkan morfologi dendritik yang kompleks, di mana parameter *secondary dendrite arm spacing* (SDAS) menjadi salah satu indikator penting untuk menilai tingkat kehalusan struktur tersebut. SDAS merepresentasikan jarak antara lengan dendrit sekunder yang mempengaruhi mekanisme difusi unsur saat perlakuan homogenisasi. Penurunan nilai SDAS umumnya terkait dengan peningkatan laju pendinginan, sehingga menghasilkan ukuran butir lebih yang lebih halus dan sifat mekanik paduan yang lebih baik (Ram et al., 2024 & Zhu et al., 2019).

Pengaruh Homogenisasi

Perlakuan homogenisasi pada temperatur antara 450–560 °C berperan dalam melarutkan fasa interdendritik, seperti Mg_2Si , ke dalam matriks aluminium melalui proses difusi. Proses ini bertujuan untuk mengurangi segregasi kimia dan meningkatkan homogenitas

mikrostruktur. Osterreicher et al. (2017) menyatakan bahwa ketidakseimbangan presipitasi sekunder selama homogenisasi dapat mempengaruhi tegangan alir pada temperatur tinggi.

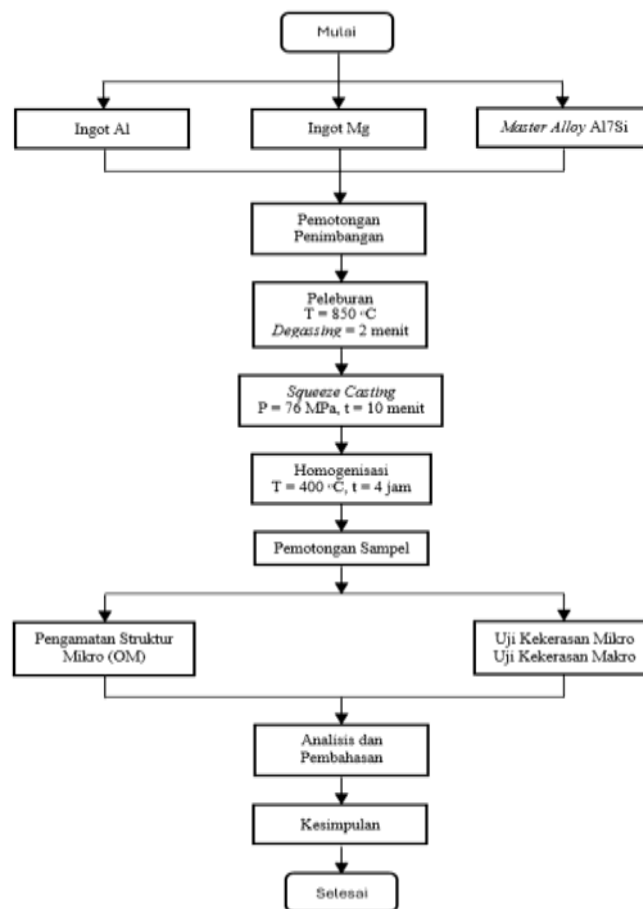
Studi Sebelumnya

Penelitian oleh Arnoldt et al. (2022) telah menunjukkan bahwa durasi homogenisasi selama 4–6 jam pada temperatur optimal mampu memodifikasi morfologi dendrit dan mendistribusikan presipitat Mg_2Si secara merata. Temuan itu juga diperkuat oleh penelitian Wimmer (2011), yang melaporkan bahwa perlakuan homogenisasi tidak hanya berpengaruh pada pelarutan fasa interdendritik, tetapi juga memberikan dampak signifikan terhadap sifat ekstrudabilitas material.

3. METODE PENELITIAN

Tahapan Penelitian

Diagram alir penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 1. menggambarkan secara keseluruhan tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya mesin potong logam, gerinda, dan timbangan digital untuk proses pemotongan ingot. Krusibel, *melting furnace*, *thermometer gun*, *thermocouple*, penjepit logam, pengaduk, ladel, sarung tangan anti panas, cetakan logam, mesin tekan hidrolik, dan *muffle furnace* untuk proses *squeeze casting* dan perlakuan homogenisasi. Untuk pengujian karakterisasi digunakan mikroskop optik *Zeiss Pritomech*, mesin uji keras *Rockwell E*, dan mesin uji keras *Vickers*.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah ingot aluminium, ingot magnesium, *master alloy Al7Si*, alkohol, pasir zirkonia, *thinner*, gas oksigen, gas argon, dan gas asitilen. Untuk pengujian karakterisasi bahan yang digunakan adalah kertas amplas #120 sampai #2000, zat poles alumina, dan zat etsa *Kellers Reagent*.

Metodologi

Pembuatan Sampel

Proses peleburan diawali dengan memasukkan ingot aluminium dan *master alloy Al7Si* ke dalam krusibel dan memanaskannya di dalam *melting furnace* hingga temperatur 850 °C secara bertahap. Logam mulai mencair di temperatur 750 °C, temperatur diukur menggunakan *thermometer gun*. Setelah aluminium cair terbentuk, ingot magnesium ditambahkan dan dilakukan proses *degassing* menggunakan gas argon selama 2 menit untuk menghilangkan gas yang terperangkap dan mengangkat pengotor seperti lapisan Al_2O_3 .

Setelah seluruh komponen paduan mencair secara homogen, logam cair dituangkan ke dalam cetakan logam yang telah dipanaskan hingga 300 °C. Kemudian cetakan ditempatkan pada mesin tekan hidrolik dan diberi tekanan 76 MPa selama 10 menit hingga terjadi solidifikasi. Selanjutnya cetakan dibuka dan dilakukan pemeriksaan visual terhadap produk cor. Gambar 2 menunjukkan proses *squeeze casting* yang dilakukan pada penelitian ini.



Gambar 2. *Squeeze casting.*

Homogenisasi

Homogenisasi dilakukan untuk memperoleh struktur butir yang seragam dan meminimalkan terjadinya segregasi pada seluruh bagian sampel produk cor. Pertama sampel produk cor dimasukkan ke dalam *muffle furnace*, kemudian sampel harus diletakkan di atas batu refraktori yang ada di dalam *muffle furnace*, selanjutnya panaskan *muffle furnace* pada temperatur 400 °C selama 4 jam. Terakhir, tahapan pendinginan produk cor dilakukan selama 4 jam.

Pengamatan Struktur Mikro

Sebelum pengujian dilakukan, permukaan sampel diampelas secara bertahap menggunakan kertas amplas dari grit #120 hingga #2000. Selanjutnya, sampel dipoles dengan bubuk alumina AP-A berukuran 0,3 µm dengan kain beludru untuk memperoleh permukaan halus dan bebas goresan sehingga hasil pengamatan lebih jelas. Setelah pemolesan, sampel diberi perlakuan etsa menggunakan larutan Keller selama 60 – 120 detik, kemudian dibilas dengan air, direndam dalam alkohol, dan dikeringkan. Selanjutnya dilakukan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik *Zeiss Pritomech* (Gambar 3) untuk mengamati struktur mikro pada sampel.

Pengamatan struktur mikro pada sampel dilakukan perhitungan nilai *Secondary Dendrite Arm Spacing* (SDAS). Perhitungan nilai SDAS dilakukan menggunakan aplikasi Labscope dengan menarik sepuluh garis pengukuran pada setiap gambar.



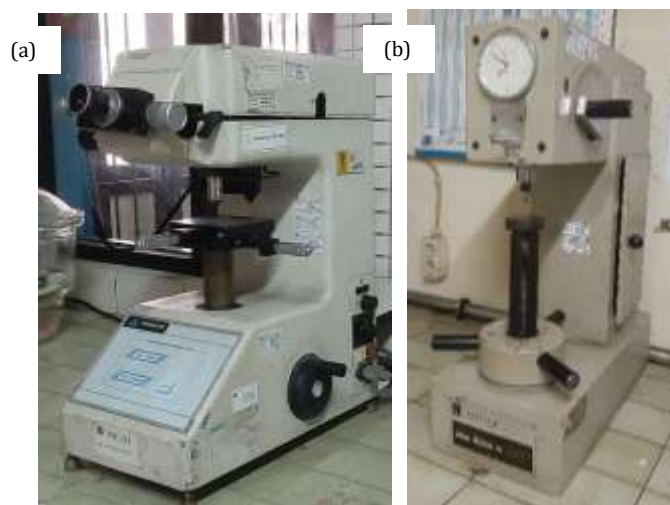
Gambar 3. Mikroskop optik *Zeiss Pritomech*.

Pengujian Kekerasan

Penelitian ini menggunakan dua jenis pengujian kekerasan, yaitu pengujian kekerasan mikro dan pengujian kekerasan makro. Pengujian kekerasan mikro dilakukan dengan menggunakan mesin Micro Vickers Buehler (Gambar 4a) yang bertujuan untuk mengetahui sifat mekanis sampel hasil pengecoran dan sampel hasil homogenisasi. Pengujian ini

menggunakan beban 300 gF dengan waktu indentasi 10 detik. Pada sampel uji, keenam sisi sampel di amplas dan di poles sebelum dilakukan indentasi. Permukaan sampel harus rata karena kemiringan permukaan dapat mempengaruhi akurasi hasil pengukuran.

Pengujian kekerasan makro dilakukan untuk mendapatkan nilai kekerasan pada sampel hasil pengecoran dan sampel hasil homogenisasi. Pengujian ini menggunakan mesin dengan standar ASTM E-18, dilengkapi indenter bola baja berdiameter 1/8 inch dan beban uji sebesar 100 kgf. Pengambilan data dilakukan pada lima titik pengukuran untuk menganalisa keseragaman nilai kekerasan pada tiap sampel. Mesin Hoytom Minor 69 yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4b.



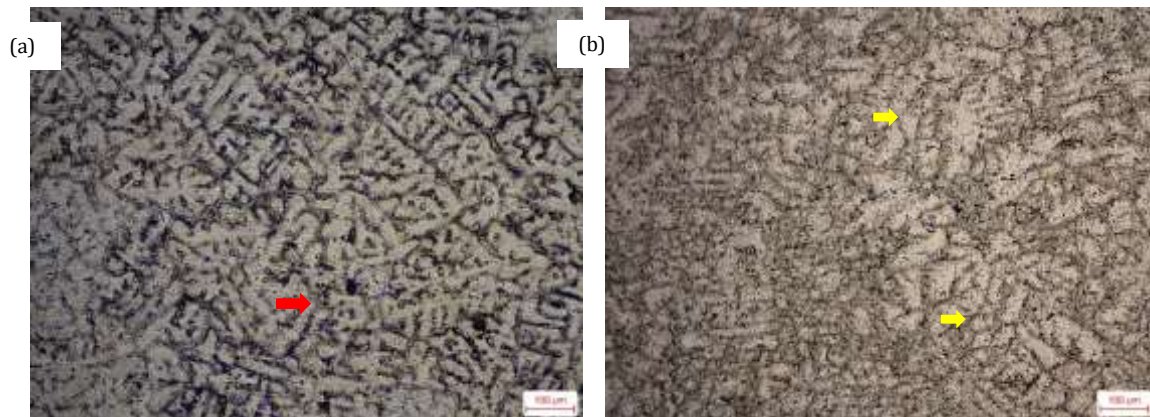
Gambar 4. (a) Mesin pengujian kekerasan *Micro Vickers Buehlers*, (b) Mesin pengujian kekerasan *Hoytom Minor 69*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Mikrostruktur

Pada Gambar 5 dapat dilihat struktur mikro paduan Al-Mg-Si setelah proses pengecoran dan homogenisasi. Pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa struktur mikro produk cor berbentuk dendritik dan di dalam dendrit terlihat kehadiran fasa intermetalik yang ditunjukkan oleh panah merah. Fasa yang muncul menunjukkan bentuk lamelar atau *Chinese script*. Intermetalik seperti Mg_2Si , β (Al_3FeSi), dan $Al_5Si_2(FeMn)$ umumnya terbentuk selama proses solidifikasi pada aluminium seri 6xxx (Baruah et al., 2020 & Liu, 1999). Kehadiran fasa-fasa ini pada struktur dendritik paduan Al-Mg-Si berkaitan dengan unsur Fe yang memiliki kelarutan rendah dalam aluminium (Rivas et al., 1999). Fasa intermetalik tersebut relatif sulit larut selama proses homogenisasi dan keberadaannya diketahui dapat

meningkatkan sifat mekanis paduan. Identifikasi fasa pada paduan Al-Mg-Si ini dapat dikonfirmasi melalui pengujian SEM-EDS dan XRD.



Gambar 5. Struktur mikro paduan Al-Mg-Si pada kondisi (a) pengecoran dan (b) homogenisasi pada temperatur 400 °C selama 4 jam. Panah merah menunjukkan penyusutan porositas (*shrinkage*) dan panah kuning menunjukkan fasa intermetalik.

Gambar 5 (a) menampilkan struktur mikro paduan setelah proses pengecoran, yang menunjukkan morfologi dendritik dengan bentuk lengan yang memanjang. Pada Gambar 5 (a), tampak adanya porositas penyusutan (*shrinkage*), yang ditandai dengan panah berwarna merah. Penyusutan ini terbentuk akibat ketidaksempurnaan laju perpindahan panas dalam cetakan serta adanya atom hidrogen yang terperangkap selama proses solidifikasi. Pada penelitian ini, pengecoran dilakukan pada temperatur 850 °C, sedangkan kelarutan hidrogen dalam aluminium pada temperatur tersebut mencapai 1,23 cc/100 g (Mayer et al., 2003). Semakin tinggi temperatur pengecoran, semakin besar kelarutan hidrogen dalam logam cair. Penyusutan tersebut dapat diminimalkan dengan melakukan pemanasan awal (*preheating*) cetakan secara lebih homogen sehingga gradien temperatur selama solidifikasi dapat dikendalikan dengan lebih baik.

Selanjutnya produk cor diberikan perlakuan homogenisasi pada temperatur 400 °C selama 4 jam. Perlakuan ini bertujuan untuk menyeragamkan struktur butir, mengurangi segregasi pada seluruh bagian produk cor, serta meningkatkan sifat mampu bentuknya (Zolotarevsky et al., 2007). Gambar 5 (b) menunjukkan struktur mikro setelah homogenisasi berbentuk dendrit yang lebih membulat dibandingkan kondisi setelah pengecoran dimana memiliki bentuk dendrit yang memanjang. Perubahan morfologi ini disebabkan oleh proses difusi fasa interdendritik ke dalam matriks aluminium, sehingga volume fasa interdendritik berkurang dari nilai 15,51% menjadi 13,57%. Selain itu, perubahan ini juga dibuktikan dari

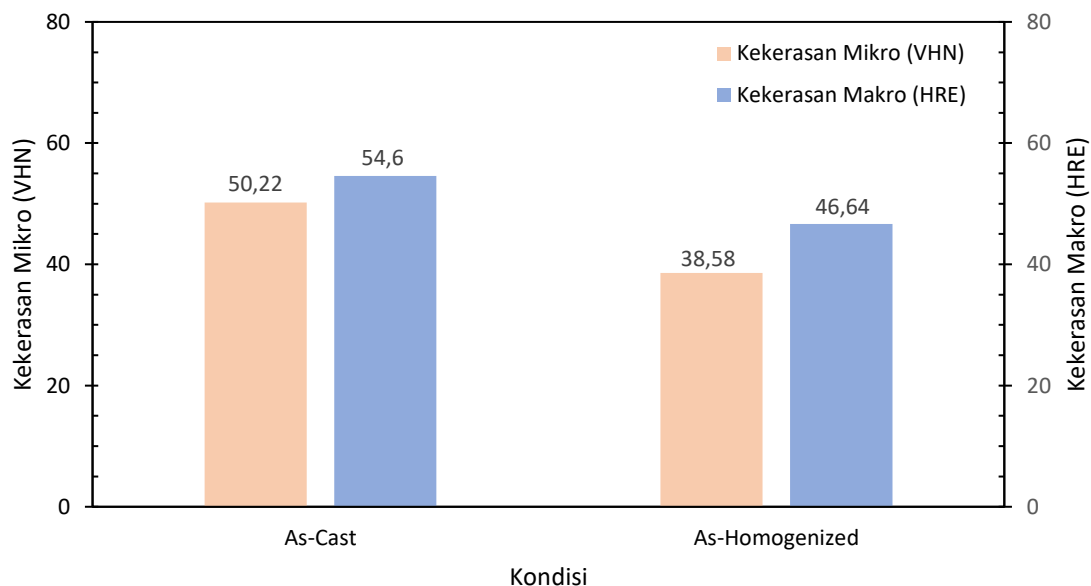
terjadinya peningkatan nilai SDAS dari 32,59 μm menjadi 36,88 μm yang dihitung dengan aplikasi Labscope.

Kehadiran fasa interdendritik dalam paduan tidak diinginkan karena fasa tersebut memiliki nilai kekerasan lebih tinggi dibandingkan matriks aluminium, sehingga menyebabkan ketidakteraturan distribusi kekerasan pada material (Kurnia, 2006). Oleh karena itu, perlakuan homogenisasi diperlukan untuk mengurangi keberadaan fasa interdendritik tersebut.

Analisis Nilai Kekerasan Paduan

Pengaruh perlakuan homogenisasi terhadap nilai kekerasan mikro dan makro paduan ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan Gambar 6, terlihat bahwa setelah homogenisasi terjadi penurunan nilai kekerasan mikro dari 50,22 VHN menjadi 38,58 VHN, serta penurunan kekerasan makro dari 54,60 HRE menjadi 46,64 HRE.

Penurunan ini berkaitan dengan proses difusi fasa interdendritik ke dalam matriks aluminium selama homogenisasi. Difusi tersebut mengurangi volume fasa interdendritik sehingga menyebabkan nilai kekerasan paduan menurun. Temuan ini sejalan dengan penelitian Redetic et al. (2022) yang melaporkan bahwa homogenisasi pada paduan Al-Mg-Si menghasilkan transformasi hampir sempurna dari fasa AlFeSi menjadi AlFe(Mn)Si, serta pelarutan fasa Mg_2Si (Couto et al., 2005).



Gambar 6. Kekerasan mikro dan makro paduan Al-Mg-Si pada kondisi pengecoran dan setelah perlakuan homogenisasi pada temperatur 400 °C selama 4 jam.

Analisis Nilai Kekerasan Paduan

Penurunan nilai kekerasan yang terjadi meskipun disertai dengan peningkatan homogenitas mikrostruktur menunjukkan bahwa proses homogenisasi berperan dalam memperhalus variasi struktur internal, namun secara bersamaan dapat menurunkan kekuatan lokal material. Fenomena ini umumnya dikaitkan dengan larut kembalinya presipitat penguat seperti Mg_2Si ke dalam matriks aluminium, yang menyebabkan berkurangnya hambatan dislokasi dan melemahnya mekanisme pengerasan presipitasi. Liu et al. (2017) mengkonfirmasi bahwa tahap awal homogenisasi menyebabkan *softening* pada paduan Al-Mg-Si karena sebagian besar presipitat mengalami pelarutan selama pemanasan, yang kemudian menyebabkan penurunan nilai kekerasan sebelum proses aging. Namun, efek softening material tersebut dapat dimanfaatkan untuk mempermudah proses deformasi selanjutnya, seperti pencanaian dingin, karena mikrostruktur yang lebih lunak dan homogen mampu mengurangi kemungkinan inisiasi retak pada tahap awal deformasi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh perlakuan homogenisasi pada temperatur 400 °C selama 4 jam terhadap perubahan struktur mikro, terutama morfologi dendritik dan nilai *Secondary Dendrite Arm Spacing* (SDAS), serta sifat mekanik berupa kekerasan mikro dan makro pada paduan Al-Mg-Si hasil proses *squeeze casting*. Fokus penelitian ini pada kondisi awal pasca-pengecoran melalui kombinasi observasi mikrostruktur dan pengujian kekerasan untuk menilai efektivitas perlakuan homogenisasi.

Namun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, perlakuan homogenisasi hanya dilakukan pada satu parameter, yaitu 400 °C selama 4 jam, sehingga belum mencakup variasi temperatur, waktu tahan, maupun metode pendinginan lain yang berpotensi memengaruhi hasil. Kedua, karakterisasi presipitat masih bersifat kualitatif melalui mikroskop optik, tanpa didukung oleh uji lanjutan seperti SEM-EDS atau XRD yang dapat mengidentifikasi perubahan fasa secara detail.

Dari hasil pengamatan, diketahui bahwa homogenisasi mampu meningkatkan homogenitas struktur mikro melalui peningkatan nilai SDAS (32,59 μm menjadi 36,88 μm) dan penurunan volume fasa interdendritik (dari 15,51% menjadi 13,57%). Perlakuan ini juga menurunkan kekerasan mikro dan makro akibat pelarutan sebagian presipitat Mg_2Si ke dalam matriks aluminium. Meskipun demikian, mikrostruktur yang lebih lunak dan homogen berpotensi meningkatkan formabilitas paduan dan mengurangi risiko keretakan pada proses deformasi lanjutan, seperti pencanaian atau ekstrusi.

Implikasi praktis dari hasil ini sangat relevan dalam aplikasi industri pertambangan, terutama pada pengembangan struktur ringan untuk alat angkut, sistem penopang, serta peralatan pendukung tambang yang membutuhkan kombinasi kekuatan, ketahanan korosi, dan massa rendah. Homogenisasi menjadi tahapan penting dalam siklus manufaktur material teknik berbasis aluminium untuk sektor tersebut.

Penelitian selanjutnya diharapkan untuk mengkaji parameter homogenisasi yang lebih luas, seperti temperatur yang lebih tinggi (450–560 °C), variasi waktu tahan, dan metode pendinginan yang berbeda. Penggunaan teknik karakterisasi lanjutan seperti SEM-EDS dan XRD juga diperlukan untuk memahami evolusi fasa secara kuantitatif. Pendekatan tersebut akan memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara mikrostruktur, mekanisme difusi, dan performa mekanik paduan Al-Mg-Si, serta mendukung perancangan perlakuan termomekanik yang optimal untuk aplikasi struktural dan teknik berat.

DAFTAR REFERENSI

- Arnoldt, A. R., Schiffl, A., Hoppel, H. W., & Osterreicher, J. A. (2022). Influence of different homogenization heat treatments on the microstructure and hot flow stress of the aluminum alloy AA6082. *Materials Characterization*, 191, 112129. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112129>
- Baruah, M., & Borah, A. (2020). Processing and precipitation strengthening of 6xxx series aluminium alloys: A review. *International Journal of Materials Science*, 1(1), 40–48. <https://doi.org/10.22271/27078221.2020.v1.i1a.10>
- Beida, M., & Jarzebska, A. (2016). Characterization of precipitates in aluminium alloy 6013 after cold-rolling and annealing. *Acta Physica Polonica A*, 130(4), 988–990. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.130.988>
- Couto, K. B. S., Claves, S. R., Van Geertruyden, W. H., Misiolek, W. Z., & Goncalves, M. (2005). Effects of homogenisation treatment on microstructure and hot ductility of aluminium alloy 6063. *Materials Science and Technology*, 21(2), 263–268. <https://doi.org/10.1179/174328405X18584>
- Kurnia, R. (2016). *Studi pengaruh canai dingin dan temperatur anil terhadap rekristalisasi serta sifat mekanik paduan Al-4.7Zn-1.8Mg (% berat) hasil squeeze casting* (Skripsi). Universitas Indonesia.
- Lenard, J. (2000). *Introduction to aluminum alloys and tempers*. ASM International.
- Liu, C. L., Azizi-Alizamini, H., Parson, N. C., Poole, W. J., & Du, Q. (2017). Microstructure evolution during homogenization of Al–Mg–Si–Mn–Fe alloys: Modelling and experimental results. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(3), 747–753. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60085-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60085-2)
- Liu, Y. L. (1999). The complex microstructure in an as-cast Al-Mg-Si alloy. *Materials Letters*, 41, 267–272. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(99\)00141-X](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(99)00141-X)

- Mayer, H., Papakyriaciou, M., Zettl, B., & Stanz-Tschegg, S. E. (2003). Influence of porosity on the fatigue limit of die cast magnesium and aluminium alloys. *International Journal of Fatigue*, 25, 245–256. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(02\)00054-3](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(02)00054-3)
- Österreicher, J. A., Kumar, M., Schiffl, A., & Schwarz, S. (2017). Secondary precipitation during homogenization of Al-Mg-Si alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 690, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.005>
- Ram, S. C., Bhushan, A., & Kumar, M. R. (2024). Influences of centrifugal force on the microstructure and mechanical behavior of centrifugally cast Al-Mg₂Si. *Silicon*. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02724-9>
- Redetic, T., Popovic, M., Alil, A., Markoli, B., Naglic, I., & Romhanji, E. (2022). Effect of homogenization temperature on microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Si alloy containing low-melting point elements. *Journal of Alloys and Compounds*, 902, 163719. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.163719>
- Rivas, A. L., Muñoz, P., Camero, S., & Quintero-Sayago, O. (1999). Effect of the microstructure on the mechanical properties and surface finish of an extruded AA-6063 aluminum alloy. *Advances in Materials Science and Technology*, 2(1), 15–23.
- Vargel, C. (2020). Chapter G.5 – 6xxx series alloys. In *Corrosion of aluminium* (pp. 485–495). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099925-8.00034-X>
- Wimmer, A. C. (2011). *Influence of the homogenization treatment on the precipitation and dissolution of intermetallic phases in Al-Mg-Si alloys* (Master's thesis, Montanuniversität Leoben). <https://pure.unileoben.ac.at/files/2202927/AC08702867n01vt.pdf>
- Zhu, X., Yang, H., Dong, X., & Ji, S. (2019). Effects of Mg and Si levels on microstructural inhomogeneity in die-cast Al-Mg-Si alloys. *Journal of Materials Science*, 54, 908–920. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03198-6>
- Zolotarevsky, V., Nikolai, A., & Glazoff, M. (2007). *Casting aluminium alloy*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008045370-5.50007-9>