



Karakterisasi Komposisi Kimia dan Homogenitas Paduan Al–Mg–Si Hasil *Squeeze Casting* untuk Aplikasi Pertambangan

(*Characterization of Chemical Composition and Homogeneity of Al–Mg–Si Alloy Produced by Squeeze Casting for Mining Applications*)

Venty Lestari¹

¹ Universitas Sriwijaya, Indonesia

¹ ventylestari@unsri.ac.id

Penulis Korespondensi: Venty Lestari | **Email:** ventylestari@unsri.ac.id

Diterima (*Received*): 23/11/2025 Direvisi (*Revised*): 01/12/2025 Diterima untuk Publikasi (*Accepted*): 02/12/2025

ABSTRAK

Paduan aluminium Al-Mg-Si dikenal sebagai material struktural ringan dengan ketahanan korosi yang tinggi dan kemampuan penguatan melalui mekanisme presipitasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis komposisi kimia aktual serta implikasi metalurgi dari paduan Al-Mg-Si yang diproduksi menggunakan metode *squeeze casting*. Proses pengecoran dilakukan pada temperatur peleburan 850 °C, temperatur cetakan 300 °C, dan tekanan 76 MPa selama 10 menit, kemudian dilakukan perlakuan homogenisasi. Pengujian komposisi kimia menggunakan metode *Optical Emission Spectroscopy* (OES) dilakukan pada dua titik sampel (atas dan bawah) untuk menilai keseragaman distribusi unsur. Hasil analisis menunjukkan bahwa kandungan Mg (1,06%) dan Si (0,63%) berada dalam rentang nilai yang ditargetkan, menandakan tingkat homogenitas yang baik. Kandungan unsur pengotor seperti Fe, Cu, dan Mn berada di bawah 0,1 %, yang mengindikasikan rendahnya risiko pembentukan fasa intermetalik getas seperti Al₅FeSi. Komposisi ini memungkinkan terbentuknya fasa Mg₂Si sebagai presipitat penguat utama dan memberikan stabilitas mikrostruktur yang diperlukan untuk aplikasi struktural. Dengan karakteristik tersebut, paduan ini berpotensi diterapkan pada aplikasi struktural di lingkungan ekstrem, seperti industri pertambangan, di mana dibutuhkan material yang ringan, tahan korosi, dan memiliki kestabilan mekanik jangka panjang. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan paduan aluminium melalui teknik *squeeze casting* untuk memenuhi kebutuhan material pada sistem monitoring tambang, casing instrumen, serta komponen ringan di lingkungan kerja yang ekstrem.

Kata Kunci: Al-Mg-Si, aluminium, fasa intermetalik, komposisi kimia, *squeeze casting*

ABSTRACT

Al-Mg-Si aluminum alloys are widely recognized as lightweight structural materials with excellent corrosion resistance and the potential for strengthening via precipitation mechanisms. This study aims to analyze the actual chemical composition and metallurgical implications of an Al-Mg-Si alloy fabricated using the *squeeze casting* method. The casting process was conducted at a melting temperature of 850 °C, a mold temperature of 300 °C, and a pressure of 76 MPa applied for 10 minutes, followed by a homogenization treatment. Chemical composition analysis using *Optical Emission Spectroscopy* (OES) was performed at two sampling points (top and bottom) to evaluate the uniformity of elemental distribution. The results show that Mg (1.06%) and Si (0.63%) contents fall within the targeted range, indicating a good level of homogeneity. Impurity elements such as Fe, Cu, and Mn were present at levels below 0.1%, suggesting a low risk of forming brittle intermetallic phases like Al₅FeSi. This composition supports the formation of Mg₂Si as the primary strengthening precipitate and contributes to the microstructural stability required for structural applications. With these characteristics, the alloy demonstrates strong potential for use in extreme environments, such as the mining industry, where lightweight, corrosion-resistant, and mechanically stable materials are essential. The findings from this study are expected to serve as a basis for further development of aluminum alloys via *squeeze casting* techniques to meet material demands for mining monitoring systems, instrument casings, and lightweight components in harsh operating conditions.

Keywords: Al-Mg-Si, aluminum alloy, chemical composition, intermetallic phases, *squeeze casting*

1. Pendahuluan

Kebutuhan akan material teknik yang ringan, kuat, dan tahan korosi terus meningkat dan menjadi fokus utama di berbagai sektor industri, mulai dari transportasi, kedirgantaraan, konstruksi, hingga pertambangan. Dalam hal ini, paduan aluminium merupakan salah satu kandidat yang unggul karena memiliki densitas rendah dengan berat jenis $2,7 \text{ g/cm}^3$, sifat yang mudah dibentuk serta memiliki sifat fisik, sifat mekanik, dan ketahanan korosi yang baik (ASM Handbook Committee, 1992). Khususnya paduan aluminium seri 6xxx (Al-Mg-Si) memiliki sifat mampu ekstrusi yang memungkinkan paduan aluminium untuk membuat bentuk struktural yang kompleks (Fang et al., 2010), selain itu paduan ini dapat diperkuat melalui presipitasi fasa Mg_2Si yang dapat meningkatkan kekuatan tanpa mengurangi keuletan. Sifat-sifat ini menjadikan paduan Al-Mg-Si relevan tidak hanya dalam aplikasi konvensional seperti otomotif, tetapi juga untuk lingkungan ekstrem seperti industri pertambangan, di mana komponen tersebut sering terpapar kelembapan tinggi, abrasi mekanik, dan atmosfer korosif.

Komposisi kimia paduan logam memegang peran penting dalam menentukan mikrostruktur serta performa akhir material. Rasio antara unsur Mg dan Si dalam paduan Al-Mg-Si sangat menjadi faktor utama terbentuknya fasa Mg_2Si , sedangkan unsur pengotor seperti Fe, Mn, dan Cu dapat menyebabkan terjadinya presipitasi fasa intermetalik yang getas seperti Al_5FeSi atau $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$, yang dapat menurunkan ketahanan fatik serta memicu kegagalan prematur pada material (Liu, 1999).

Pada paduan aluminium seri 6xxx, unsur Mg meningkatkan kekuatan paduan melalui mekanisme penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*), serta berperan dalam pembentukan presipitat selama mekanisme perlakuan penuaan (*aging treatment*) bersama unsur Si (Rezaei et al., 2011). Penambahan unsur Si dapat meningkatkan sifat mampu cor paduan aluminium dengan cara meningkatkan fluiditasnya, sehingga lelehan logam dapat mengisi seluruh rongga cetakan secara merata (Kumar et al., 2015). Dengan penambahan Si, cacat pada proses pengecoran dapat berkurang. Saat Si dan Mg dipadukan, maka akan terbentuk fase pengerasan Mg_2Si yang dapat menyebabkan peningkatan kekuatan hingga batas kelarutan 0,70 % Mg, lebih dari itu tidak ada penambahan kekuatan secara signifikan. Umumnya, paduan Al-Si berkekuatan tinggi menggunakan Mg antara 0,40-0,70 %. Kelebihan Mg dapat mengurangi kelebihan Mg_2Si dan memperlambat proses reaksi katodik (Vargel, 2020). Oleh karena itu, pengendalian yang ketat terhadap komposisi menjadi sangat penting dalam pengembangan paduan struktural modern, terutama jika material tersebut ditujukan untuk aplikasi berat yang menuntut keandalan jangka panjang.

Jiang et al. (2019) meneliti pengaruh penambahan unsur Mg terhadap sifat mekanik paduan Al-Si-Cu-Fe yang diproses melalui metode *squeeze casting*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar Mg sebanding dengan peningkatan kekerasan paduan dan penyusutan ukuran butir, yang mengindikasikan bahwa unsur Mg juga mempengaruhi ukuran dan distribusi butir kristal. Kehalusan butir akibat penambahan unsur Si, sebagaimana diteliti oleh Nikanorov et al. (2005), terbukti memberikan kontribusi pada peningkatan sifat mekanik paduan aluminium. Satriani et al. (2016) mengevaluasi pengaruh penambahan unsur Si terhadap paduan Al 6063, di mana peningkatan kandungan Si sebesar 3,25 % berat menghasilkan penurunan porositas serta peningkatan nilai kekerasan dan kekuatan tarik paduan secara signifikan.

Pada umumnya, metode pengecoran konvensional menghasilkan struktur berpori dan distribusi unsur yang tidak merata, yang dapat berdampak negatif dan menurunkan sifat mekanik material. Untuk mengatasi hal ini, metode *squeeze casting* menjadi solusi yang menggabungkan proses penempaan dan pengecoran dalam satu tahap untuk menghasilkan struktur mikro yang homogen dan sifat mekanik yang baik pada produk cor (Smith, 1993). Hal ini terjadi karena proses pemadatan logam cair dilakukan di dalam cetakan yang diberikan tekanan hidrolik. Tekanan ini mempercepat laju perpindahan panas selama solidifikasi, sehingga mampu menurunkan tingkat porositas produk cor.

Metode *squeeze casting* memiliki sejumlah keuntungan, seperti kemampuan menghasilkan produk tanpa cacat porositas dan cacat penyusutan, tingkat efisiensi material hingga 100%, serta kualitas permukaan dan presisi dimensi yang tinggi. Metode ini juga mampu meningkatkan rasio kekuatan-terhadap-berat dan berbagai sifat mekanis seperti ketahanan aus, stabilitas pada temperatur tinggi, ketahanan korosi, kekerasan, ketahanan fatik, serta deformasi. Selain itu, metode ini dinilai lebih ekonomis pada produksi tertentu. Namun demikian, metode *squeeze casting* ini memiliki keterbatasan karena memerlukan temperatur pemrosesan yang lebih tinggi dibandingkan metode pengecoran lainnya dan sulit digunakan untuk pembuatan komponen dengan geometri yang sangat kompleks (ASM Handbook Committee, 1992). Metode ini memiliki sejumlah parameter utama yang dapat mempengaruhi hasil akhir produk cor, antara lain *volume* dan temperatur logam cair, temperatur cetakan, waktu jeda sebelum penekanan, besar gaya penekanan, durasi penekanan, dan kondisi pelumasan cetakan (ASM Handbook Committee, 1992).

Penelitian sebelumnya menyatakan bahwa metode *squeeze casting* efektif menekan pertumbuhan fasa intermetalik Fe-rich berukuran besar dan meningkatkan nilai kekerasan serta kekuatan tarik paduan (Zhang et al., 2025). Namun demikian, penelitian yang secara khusus

mengevaluasi pengaruh komposisi aktual paduan Al–Mg–Si hasil *squeeze casting* terhadap pembentukan fasa dan potensi aplikatifnya, khususnya di lingkungan tambang, masih sangat terbatas.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis secara eksperimental komposisi kimia paduan Al–Mg–Si yang diproses melalui teknik *squeeze casting*, dengan fokus pada identifikasi fasa yang terbentuk serta evaluasi kestabilan dan relevansinya terhadap performa aplikatif. Komposisi aktual dibandingkan dengan nilai target dan literatur relevan, dan dikaitkan dengan potensi pembentukan fasa penguat Mg₂Si serta fasa intermetalik Fe-rich dalam jumlah terkendali. Melalui pendekatan ini, studi ini diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi terhadap pemahaman ilmiah mikrokomporsi dan mikrostruktur paduan Al–Mg–Si hasil *squeeze casting*, tetapi juga membuka peluang penerapannya pada kebutuhan teknik berat di industri pertambangan.

2. Data dan Metodologi

Berikut data dan metodologi yang digunakan dalam penelitian ini.

2.1. Tahapan Penelitian

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

2.2. Alat dan Bahan

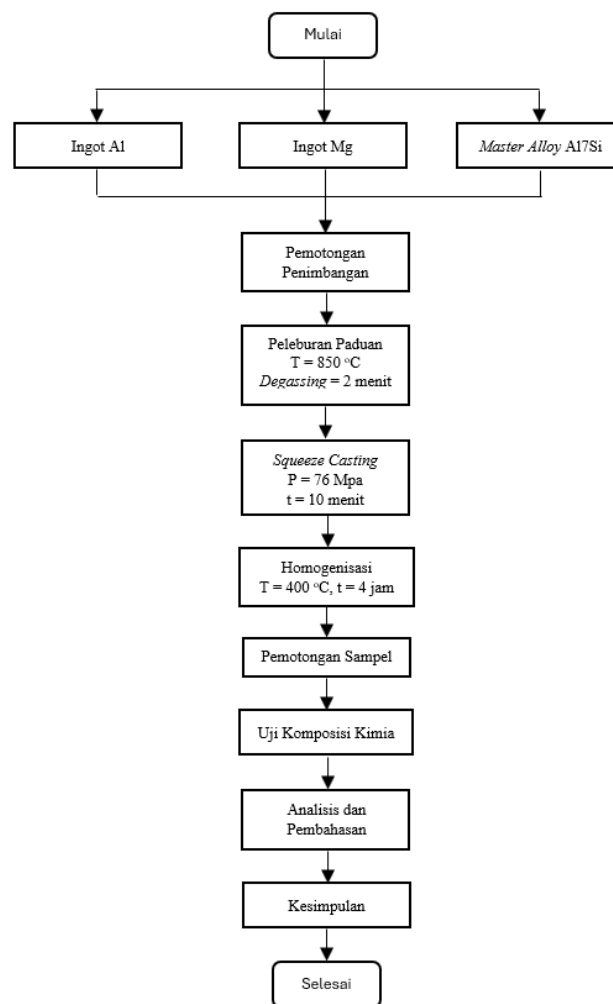
2.2.1. Alat

Pada tahap preparasi material, proses pembuatan produk cor paduan Al–Mg–Si diawali dengan pemotongan ingot aluminium (Al), magnesium (Mg), dan *master alloy* Al7Si menggunakan mesin potong logam dan gerinda tangan. Semua ingot ditimbang secara presisi menggunakan timbangan digital untuk memastikan kesesuaian komposisi sebelum tahap peleburan.

Pada tahap peleburan dan pengecoran dengan metode *squeeze casting*, peralatan metalurgi yang digunakan meliputi krusibel sebagai tempat peleburan logam, *melting furnace* sebagai tungku pemanas, *thermocouple* dan *thermometer gun* untuk memantau temperatur secara *real-time*, penjepit logam, alat pengaduk (*stirrer*) dan ladle sebagai alat pemindah logam cair. Peralatan keselamatan seperti sarung tangan tahan panas, baju pelindung, dan wadah penampung pengotor yang digunakan untuk menjaga keselamatan operator dan kebersihan proses. Cetakan logam dengan dimensi 17 cm x 17 cm x 1,5 cm, mesin tekan hidrolik, dan *muffle furnace* untuk perlakuan homogenisasi.

Untuk karakterisasi komposisi kimia, alat yang digunakan adalah *Foundry Master Pro*, pengujian yang dilakukan adalah *Optical Emission Spectroscopy* (OES).

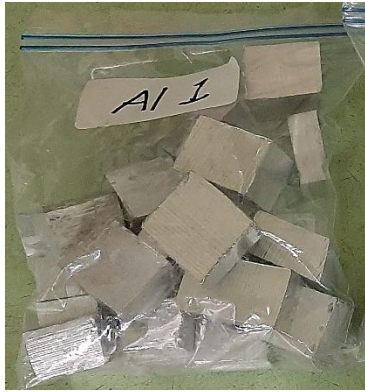
Instrumen ini bekerja dengan memancarkan energi pada permukaan sampel sehingga atom-atom dalam material tereksitasi dan menghasilkan spektrum emisi yang kemudian dianalisis untuk menentukan konsentrasi unsur secara kuantitatif. Pengujian dilakukan pada beberapa titik permukaan sampel untuk memastikan representativitas dan konsistensi hasil.



Gambar 1 Diagram alir penelitian

2.2.2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi: ingot Al, ingot Mg, *master alloy* Al7Si, alkohol, pasir zirkonia, *thinner*, gas oksigen, gas asitilen, dan gas argon. Gambar 2 menunjukkan ingot aluminium yang telah dipotong dengan ukuran kecil agar proses peleburan lebih mudah. Target komposisi paduan pada penelitian ini adalah Al-1Mg-0,5Si.

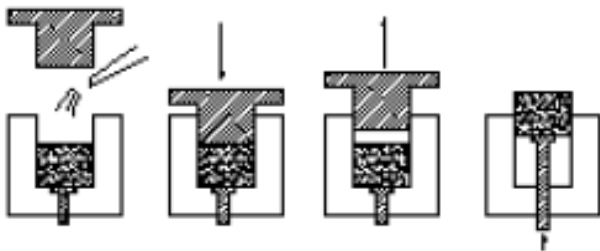


Gambar 2 Potongan ingot aluminium

2.3. Metodologi

2.3.1. Metode *Squeeze Casting*

Metode *squeeze casting* dapat dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan mekanisme pengisian logam cair ke dalam cetakan, yaitu *Direct Squeeze Casting* (DSC) dan *Indirect Squeeze Casting* (IDC). Pada *Direct Squeeze Casting* (DSC), tekanan diberikan secara langsung pada permukaan logam cair selama tahap solidifikasi. Pemberian tekanan secara langsung akan mempercepat perpindahan panas sehingga produk cor memiliki struktur butir yang halus. Gambar 3 menunjukkan mekanisme *Direct Squeeze Casting* (DSC).



Gambar 3 Mekanisme *Direct Squeeze Casting* (DSC) (Tjitro & Firdaus, 2000)

Penelitian ini menggunakan metode *Direct Squeeze Casting* (DSC), yang diawali dengan tahap peleburan (Gambar 4a) yang dilakukan dengan memasukkan ingot Al dan master alloy Al7Si ke dalam krusibel, lalu dipanaskan secara bertahap hingga 850 °C menggunakan *melting furnace*. Pada temperatur 750 °C logam mulai mencair, kemudian temperatur dicek dengan *thermometer gun*. Ingot Mg ditambahkan dan dilakukan *degassing* selama 2 menit menggunakan gas argon untuk menghilangkan gas dan pengotor (Al_2O_3).

Setelah seluruh ingot mencair dan diaduk selama 1 menit, logam cair dituangkan ke dalam cetakan logam yang telah dipanaskan hingga 300 °C (Gambar 4b). Cetakan kemudian diberi tekanan 76 Mpa selama 10 menit pada mesin tekan hidrolik hingga logam tersolidifikasi. Setelah

itu cetakan dibuka dan hasil produk coran diperiksa secara visual.



Gambar 4 (a) Proses peleburan (b) Proses *squeeze casting*

2.3.2. Homogenisasi

Perlakuan homogenisasi dilakukan untuk mendapatkan struktur butir yang seragam dan menghilangkan segregasi pada hasil pengecoran. Sampel hasil proses pengecoran kemudian dipanaskan dalam *muffle furnace* (Gambar 5) pada 400 °C selama 4 jam, sehingga terjadi difusi atom secara merata ke seluruh matriks. Setelah perlakuan homogenisasi selesai, sampel didinginkan selama 4 jam untuk menstabilkan mikrostruktur yang terbentuk.



Gambar 5 *Muffle Furnace*

2.3.3. Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk memastikan bahwa komposisi kimia dari sampel yang diuji telah sesuai dengan standar material dan target komposisinya. Pengujian ini dilakukan menggunakan *Foundry Master Pro* (Gambar 6), pengujian yang dilakukan adalah *Optical Emission Spectroscopy* (OES). Metode ini membaca spektrum emisi dari atom logam yang tereksitasi akibat pembakaran pada permukaan sampel, di mana intensitas spektrum menunjukkan konsentrasi unsur yang kemudian diidentifikasi oleh detektor. Sebelum pengujian, permukaan sampel diampas hingga grit #600 untuk memastikan pembacaan yang akurat. Setiap sampel diuji pada tiga titik untuk meningkatkan representativitas data.



Gambar 6 *Foundry Master Pro*

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dan pembahasan dari penelitian ini berisi data komposisi kimia aktual, analisis komposisi kimia, implikasi metalurgi serta relevansi terhadap aplikasi pertambangan.

3.1. Komposisi Kimia Aktual

Komposisi kimia paduan Al-Mg-Si hasil *squeeze casting* yang diperoleh melalui pengujian OES, pengujian dilakukan pada dua sampel (posisi atas dan bawah sampel paduan) untuk menilai keseragaman komposisi di seluruh bagian pelat. Hasil pengujian komposisi kimia paduan Al-Mg-Si ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Hasil pengujian komposisi kimia paduan Al-Mg-Si

Unsur	Komposisi (% berat)
Mg	1,06
Si	0,63
Fe	0,06
Cu, Mn, Zn	< 0,01
Al	Balance

Hasil pengujian OES pada Tabel 1 menunjukkan bahwa komposisi aktual paduan mendekati nilai target, dengan kandungan Mg sebesar 1,06 % berat dan Si 0,63 % berat. Kandungan unsur besi tercatat sebesar 0,06 % sedangkan unsur Cu, Mn, Zn, Cr, Ni, Ti, Ca, dan Pb dengan komposisi (% berat) terdeteksi dibawah 0,01. Keberadaan kandungan pengotor yang rendah (<0,1 % Fe dan <0,01 % Cu/Mn) sangat penting karena bisa menghindari degradasi mekanik akibat presipitasi fasa tidak diinginkan (Seth et al., 2020). Pengujian dilakukan pada dua lokasi berbeda pada sampel (atas dan bawah) untuk mengamati homogenitas distribusi unsur dalam produk cor. Tidak ditemukannya variasi signifikan antara kedua posisi menunjukkan bahwa tahap pengadukan saat proses peleburan dan pencampuran ingot dan *master alloy* berlangsung secara efektif, menghasilkan paduan yang seragam secara kimia. Paduan aluminium yang diteliti pada penelitian ini mengandung unsur utama magnesium (Mg) dan silikon (Si).

Kehadiran unsur pengotor minor (Cr, Ni, Ti, Ca, Pb) yang terdeteksi pada level <0,01% menunjukkan bahwa kontaminasi dari peralatan pengecoran seperti krusibel, pengaduk, dan batang *degassing* berbahan baja masih dalam batas aman dan tidak berisiko tinggi terhadap pembentukan fasa intermetalik getas. Kandungan Fe yang rendah (<0,1%) menjadi aspek krusial karena dapat mencegah terbentuknya fasa intermetalik getas seperti Al_5FeSi yang umumnya berkontribusi terhadap penurunan keuletan material (Zou et al., 2023).

3.2. Analisis Komposisi Kimia

Komposisi Mg ditargetkan sebesar 1 % berat, dan hasil uji OES menunjukkan nilai aktual 1,06 % berat dengan deviasi 0,06 dimana masih dalam rentang toleransi yang dapat diterima secara praktis, sehingga kandungan Mg sudah sesuai dengan spesifikasi yang ditargetkan. Penentuan komposisi Mg didasarkan pada asumsi kehilangan material sebesar 10 % berat untuk mengantisipasi penguapan Mg akibat densitas yang menurun ketika menguap dan menjadi pengotor. Penguapan ini terjadi karena Mg memiliki tekanan uap sekitar 4×10^{-3} atm pada 650 °C (Bell et al., 2006), dimana semakin tinggi tekanan uap semakin mudah material menguap dan dapat memengaruhi komposisi akhir paduan. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Kurnia (2016), yang juga menggunakan asumsi kehilangan material 10% berat dengan hasil Mg sebesar 1,71 - 1,87 % berat. Karena hasil komposisi Mg pada penelitian ini mendekati nilai target, asumsi kehilangan material 10% berat dapat diterapkan untuk proses pengecoran berikutnya.

Komposisi Si mengalami deviasi 0,13 dari hasil pengecoran dengan nilai rata-rata 0,63 % berat dari target 0,5 % berat. Perbedaan ini dipengaruhi oleh keberadaan pengotor yang berasal dari ingot Al dan Mg dan kebersihan

krusibel dari sisa pengecoran sebelumnya. Walaupun demikian, kelebihan Si masih dalam batas yang tidak mengganggu kestabilan fasa. Bahkan, peningkatan unsur Si dapat memperbaiki efek positif berupa fluiditas logam cair selama pengisian cetakan dan membantu mengurangi cacat pengecoran seperti porositas (Kumar et al., 2015).

Dari hasil pengujian OES juga terdeteksi unsur lain seperti Fe, Cu, Mn, dan unsur minor lainnya. Unsur-unsur tersebut merupakan pengotor dengan kadar kecil yang berasal dari ingot material, pengaduk serta batang degassing berbahan baja yang mengalami deformasi pada suhu pengecoran 850 °C (Agustianingrum, 2016). Kehadiran unsur-unsur tersebut berpotensi membentuk fasa intermetalik, seperti Al_3Fe_4 pada produk cor (Mondolfo, 1976).

3.3. Implikasi Metalurgi

Dalam paduan aluminium seri 6xxx, fasa intermetalik seperti Mg_2Si , β (Al_5FeSi), dan $Al_5Si_2(FeMn)$ terbentuk selama proses solidifikasi (Baruah et al., 2020 & Liu, 1999). Pada mikrostruktur produk cor Al-Mg-Si, fasa ini berbentuk dendritik karena unsur Fe memiliki batas kelarutan yang rendah dalam aluminium (Rivas et al., 1999). Fasa Mg_2Si terbentuk saat rasio Mg:Si seimbang. Fasa ini memperkuat logam melalui mekanisme presipitasi dan meningkatkan ketahanan fatik dan kekerasan (Seth et al., 2020). Fasa Al_5FeSi atau Al_8Fe_2Si dapat terbentuk walaupun dengan kandungan Fe rendah. Namun, distribusi yang merata dan ukuran partikel yang halus sangat dapat memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan kekerasan permukaan (Zou et al., 2023). Selama homogenisasi fasa intermetalik ini sulit terlarut, namun keberadaannya dapat meningkatkan sifat mekanis paduan cor.

3.4. Relevansi terhadap Aplikasi Pertambangan

Kombinasi unsur Al-Mg-Si membentuk lapisan oksida yang stabil dan memiliki ketahanan korosi yang baik pada kondisi asam maupun basa ringan. Karakteristik ini sangat penting untuk aplikasi peralatan pertambangan yang beroperasi di lingkungan lembap, air tanah mineral, maupun atmosfer yang mengandung sulfur (Samuel et al., 2025). Oleh karena itu, paduan ini potensi kuat untuk diaplikasikan pada industri pertambangan, seperti casing instrumen geofisika bawah tanah, *bracket* penyangga ringan, komponen pelindung perangkat pemantauan vibrasi, serta struktur pendukung *drone* untuk eksplorasi tambang. Ketahanan terhadap korosi dan densitas yang rendah pada paduan ini berkontribusi pada efisiensi energi serta umur pakai material yang lebih panjang, terutama pada sistem pertambangan terpencil, di mana akses untuk melakukan pemeliharaan rutin sangat terbatas (Zhang et al., 2025).

4. Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan menganalisis komposisi kimia dan implikasi metalurgi dari paduan Al-Mg-Si yang diproduksi menggunakan metode *squeeze casting*, dengan fokus pada evaluasi kestabilan fasa serta potensi aplikasinya pada lingkungan ekstrem, terutama industri pertambangan. Meskipun penelitian ini berhasil memperoleh komposisi kimia mendekati nilai target dengan tingkat homogenitas unsur yang baik, namun ruang lingkup pengujian masih memiliki keterbatasan, antara lain belum dilakukan karakterisasi mikrostruktur secara mikroskopis (SEM/EDS) maupun pengujian mekanik seperti uji kekerasan, tarik, dan ketahanan korosi.

Hasil pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES) menunjukkan bahwa kandungan Mg dan Si berada pada rentang yang memungkinkan terbentuknya fasa penguat Mg_2Si , sedangkan kadar Fe yang rendah (<0,1%) cukup efektif dalam menekan pembentukan fasa intermetalik getas seperti Al_5FeSi . Kandungan unsur pengotor lain (Cu, Mn, Zn) yang berada di bawah 0,01% turut berkontribusi dalam mempertahankan kestabilan fasa dan mencegah degradasi mikrostruktur. Metode *squeeze casting* juga terbukti mampu menghasilkan struktur mikro yang lebih padat, sehingga berpotensi meningkatkan sifat mekanik seperti kekerasan dan ketahanan aus.

Komposisi dan teknik pemrosesan yang digunakan dinilai relevan untuk aplikasi komponen teknik yang ringan, tahan korosi, serta mampu bertahan di lingkungan operasi ekstrem, seperti pada sistem pendukung eksplorasi tambang dan instrumen geofisika. Untuk memperkuat temuan ini, penelitian lanjutan disarankan mencakup analisis mikrostruktur yang lebih mendalam, pengujian sifat mekanik serta ketahanan korosi, dan optimasi parameter pengecoran untuk memperoleh performa paduan yang lebih komprehensif. Selain itu, pengembangan paduan dengan penambahan unsur *microalloying* seperti Ti atau Zr dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan kekuatan serta stabilitas termal paduan pada kondisi ekstrem.

5. Referensi

- Agustianingrum, M. P. (2016). *Studi pengaruh temperatur anil dan persen deformasi terhadap sifat mekanik dan struktur mikro paduan Al-4.5Zn-1.5Mg-0.9Cr (% berat) hasil squeeze casting dan canai dingin*. Skripsi. Depok: Universitas Indonesia.
- ASM Handbook Committee. (1992). *Metals handbook, Casting* (10th ed., Vol. 1). Ohio: ASM International. ISBN 0-87170-007-7
- 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>
- Bell, S., David, B., Javaid, A., & Essadiqi, E. (2006). *Final report on refining technologies of magnesium: [Technical Report]*. Canada.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25060.17285>
- Fang, X., Song, M., Li, K., & Du, Y. (2010). Precipitation sequence of an aged Al-Mg-Si alloy. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 46(2), 171-180. <https://doi.org/10.2298/JMMB1002171F>
- Jiang, B., Xu, S., Xu, H. Y., Hu, M. L., He, Y. J., & Ji, Z. S. (2019). Effect of Mg addition on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu-Fe alloy with squeeze casting. *Materials Research Express*, 7(1). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5cc6>
- Kumar, V., Mehdi, H., & Kumar, A. (2015). Effect of Silicon content on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2(4), 1326-1330. e-ISSN: 2395-0056.
- 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. Depok: Universitas Indonesia.
- 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)
- Mondolfo, L. (1976). *Aluminium alloys: Structure and properties*. Boston: Butterworth & Co Ltd. ISBN: 0-408-70680-5.
- Nikanorov, S. P., Volkov, M. P., Gurin, V. N., Burenkov, Y. A., Derkachenko, L. I., & Kardashev, B. K. (2005). Structural and mechanical properties of Al-Si alloys obtained by fast cooling of a levitated melt. *Material Science and Engineering A*, 390, 63-69. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.07.037>
- Rezaei, M. R., Toroghinejad, M. R., & Ashrafizadeh, F. (2011). Effects of ARB and ageing processes on mechanical properties and microstructure of 6061 aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(6), 1184-1190. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.023>
- Rivas, A. L., Munoz, 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. *Adv. Mat. Sci. & Tech*, 2(1), 15-23. ISSN: 1316-2012.
- Satriani, A. F., & Bayuseno, A. P. (2016). Pengaruh penambahan unsur silikon (si) pada shaft propeller berbahan dasar Al-Mg-Si. *Jurnal Teknik Mesin*, 4(2), 170-177.
- Seth, P. P., Parkash, O., & Kumar, D. (2020). Structure and mechanical behavior of in situ developed Mg₂Si phase in magnesium and aluminum alloys – A review. *RSC Advances*, 10, 37327-37345. <https://doi.org/10.1039/d0ra02744h>
- Smith, F. W. (1993). *Structure and properties of engineering alloys* (2nd ed.). USA: Mc. Graw-Hill Inc. ISBN: 0-07-059172-5.
- Tjitro, S., & Firdaus. (2000). Pengecoran squeeze. *Jurnal Teknik Mesin*, 2(2), 109-113.
- Vargel, C. (2020). Chapter G.5 – 6xxx series alloys. *Corrosion of aluminium*, 485-495.
- Zhang, Z., Qi, W., Ning, Y., Gao, M., & Pang, H. (2025). Microstructural evolution and mechanical properties during heat treatment in a squeeze casting Al-Si-Mg-Fe-Cu alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 1200-1212. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.11.033>
- Zou, J., Zhang, H., Yu, C., Wu, Z., Guo, C., Nagaumi, H., Zhu, K., Li, B., & Cui, J. (2023). Investigating the influences of Fe, Mn and Mo additions on the evolution of microstructure and mechanical performances of Al-Si-Mg cast alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 319-332. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.234>