



Pengaruh Penambahan Fe dan Al-5TiB Terhadap Fluiditas, Kekerasan, dan Struktur Mikro Paduan Al-7Si

Ikhsan Pujadany^{1,*}, Is Prima Nanda¹, Tengku Jukdin Saktisadhan²

¹ Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Andalas, Padang, Indonesia

² Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Asahan, Asahan, Indonesia

Email: ^{1,*} ikhsanpujadany@gmail.com, ² isprimananda@yahoo.com, ³ jukdinsaktisadhan@yahoo.co.id

Email Penulis Korespondensi: ikhsanpujadany@gmail.com

Abstrak—Perkembangan industri otomotif sudah menjadi sektor strategis dalam perekonomian nasional terutama setelah pandemi COVID-19. Agar bisa bersaing, industri otomotif wajib secara terus menerus menemukan metode baru yang dapat meningkatkan kualitas produk mereka seperti pada paduan aluminium yang banyak dipakai pada kendaraan. Namun, selama ini penggunaan paduan aluminium sering kali menggunakan aluminium sekunder yang mana salah satu tantangan utama dalam produksi komponen otomotif berbasis paduan aluminium sekunder ini adalah pengontrolan cacat cetakan seperti porositas, retakan, dan ketidakseragaman struktur mikro yang umumnya disebabkan oleh kandungan besi (Fe) dan tidak sempurnanya proses pengecoran. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi kadar variasi percobaan Fe (1,2-1,8 %) dan penambahan *grain refiner* Al-5TiB (0,45%) pada paduan Al-7Si terhadap fluiditas, kekerasan, dan mikro struktur. Hasil penelitian menunjukkan Al-5TiB murni menghasilkan fluiditas tertinggi (106,5 cm). Penambahan Fe (1,2-1,4%) yang merupakan batas bawah rentang variasi percobaan ini menurunkan fluiditas secara drastis menjadi 53-57,5 cm, sedangkan pada batas tengah rentang variasi percobaan (1,6–1,8%) fluiditas pulih menjadi 86-98,5 cm. Kombinasi optimal Fe 1,6 % dengan Al-5TiB 0,45 % memberikan fluiditas 92,3 cm sekaligus kekerasan sinergis dengan rata-rata 78,22 VHN. Mikro struktur terbaik tercapai pada kondisi tersebut, dengan butir α -Al *equiaxed* berukuran 26-40 μm , batas butir jelas ($<0,5 \mu\text{m}$), dan dispersi partikel intermetalik (Fe_2AlB_2 , AlTi) serta TiB_2 kristalit 24 nm, yang meningkatkan penguatan permukaan tanpa mengorbankan kemampuan alir.

Kata Kunci: Al-7Si; Fe; *Grain Refiner*; Fasa Intermetalik

Abstract—The development of the automotive industry has become a strategic sector in the national economy, especially after the COVID-19 pandemic. To remain competitive, the automotive industry must continuously find new methods to improve product quality, such as in aluminum alloys which are widely used in vehicles. However, the use of secondary aluminum alloys is still common, and one of the main challenges in producing automotive components from these secondary alloys is controlling casting defects such as porosity, cracks, and non-uniform microstructures defects that are generally caused by iron (Fe) content and imperfect casting processes. This study aims to evaluate the effects of variations in experimental Fe content (1.2-1.8%) and the addition of the Al-5TiB grain refiner (0.45%) to an Al-7Si alloy on fluidity, hardness, and microstructure. The results show that the alloy treated only with Al-5TiB produced the highest fluidity (106.5 cm). Addition of Fe at the lower portion of the experimental range (1.2-1.4%) drastically reduced fluidity to 53-57.5 cm, whereas at the middle portion of the range (1.6-1.8%) fluidity recovered to 86-98.5 cm. The optimal combination Fe 1.6% with Al-5TiB 0.45% yielded a fluidity of 92.3 cm together with a synergistic hardness averaging 78.22 VHN. The best microstructure was achieved under these conditions, featuring equiaxed α -Al grains sized 26-40 μm , well-defined grain boundaries ($<0.5 \mu\text{m}$), and a dispersion of intermetallic particles (Fe_2AlB_2 , AlTi) as well as TiB_2 crystallites of $\sim 24 \text{ nm}$, which enhance surface strengthening without compromising flowability.

Keywords: Al-7Si; Fe; Grain Refiner; Intermetallic Phase

1. PENDAHULUAN

Aluminium sering kali digunakan dalam industri manufaktur dikarenakan sifatnya yang tahan akan adanya korosi dan juga sebagai konduktor panas yang baik khususnya pada paduan aluminium-silikon (Al-Si), dimana sangat penting dalam industri dirgantara, otomotif, dan kelautan selama beberapa dekade terakhir (Wang et al., 2020). Al-Si alloys digunakan secara luas pada industri *aerospace* dan otomotif karena sifat fisik dan mekaniknya yang baik. Dalam industri otomotif, paduan Al-7Si biasanya digunakan untuk membuat bagian mobil seperti piston, blok mesin, *cylinder liner*, dan lain lain (Abdus Shomad et al., 2022)(Biswas et al., 2020)(Choudhary et al., 2024). Paduan aluminium-silikon ini sering digunakan dalam proses pengecoran dikarenakan memiliki bobot yang ringan, kemampuan tuang yang sangat baik, kekuatan spesifik yang tinggi, serta ketahanan terhadap serangan korosif (AIT EL HAJ et al., 2023).

Permasalahan yang muncul pada paduan aluminium ini salah satunya adalah seringnya mengandung kontaminasi besi (Fe) akibat pencampuran material dan peralatan *ferrous* selama proses daur ulang. Dalam banyak paduan aluminium daur ulang, Fe hadir sebagai impuritas yang umumnya tidak diinginkan karena membentuk fasa intermetalik yang getas. Fe memicu pembentukan intermetalik berorientasi pelat (β - Al_3FeSi) yang memiliki morfologi pelat/*needle-like* pada penampang. Fase ini dan peningkatan porositas berkontribusi terhadap penurunan keuletan (*ductility*) dan ketangguhan (*toughness*) pada paduan Al-Si berkekuatan tinggi (Zhao et al., 2021)(Li et al., 2020).

Besi yang tidak larut dalam fasa padat Al membentuk berbagai intermetalik seperti α - $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ (*chinese-script*) dan β - Al_3FeSi (*needle-like*). Fraksi atau morfologi intermetalik yang tinggi meningkatkan kecenderungan terbentuknya cacat pengecoran seperti porositas, *cold-shuts*, serta menurunkan sifat mekanis dan kemampuan pengecoran. Salah satu upaya untuk mengurangi kerugian yang diakibatkan kandungan Fe berlebih ini adalah dengan menggunakan *modifier*. *Modifier* ini dapat memberikan pengaruh pada struktur dan distribusi partikel dengan baik (Suharno, Prima Nanda, & Evan, 2007). Unsur Fe juga dapat meningkatkan kekerasan, tetapi juga mempunyai kelemahan seperti kegetasan yang bisa meningkat (Nanda, 2014).



Untuk memperbaiki sifat mekanik yang dihasilkan oleh unsur pengotor (Fe), maka dibutuhkan *grain refiner* dalam unsur paduan. *Grain refiner* mempengaruhi morfologi mikro struktur yang nantinya akan berdampak pada peningkatan kekuatan mekanik, kehomogenan material, dan kemampuan pemesinan (Uludağ, 2020)(Sunitha & Gurusami, 2020)(Samuel et al., 2024). Pemurnian butir ini bukan hanya meningkatkan performa mekanis pada bahan logam hasil cor, tetapi juga memberikan cara efektif untuk mengontrol cacat pengecoran, termasuk makro-segregasi, porositas, dan partikel fasa kedua yang kasar (Xiao et al., 2022)(Fan et al., 2022). Peningkatan penghalusan butiran aluminium ini juga dapat meningkatkan sifat mekanis dan kemampuan alir pada paduan aluminium. Hal ini sudah menjadi fokus penelitian selama beberapa dekade terakhir (Gyarmati et al., 2022)(Vainik et al., 2021)(Martin et al., 2020). Ini dikarenakan banyaknya penelitian yang menunjukkan perubahan struktur mikro yang dapat dihasilkan oleh penambahan *grain refiner* Al-Ti-B pada paduan Al-Si (Kumar et al., 2020)(Suharno, Prima Nanda, Harjanto, et al., 2007)(Angeles, 2018).

Penelitian ini dirancang untuk menjawab dua pertanyaan utama. Pertama, sejauh mana penambahan optimal Fe dan *grain refiner* Al-5TiB dapat berpengaruh dalam paduan Al-7Si. Dan yang kedua, apa dampak Fe dan *grain refiner* terhadap fluiditas, kekerasan, serta struktur mikro paduan Al-7Si. Keberlangsungan penelitian ini sangat penting karena dengan menerapkan suhu *superheat* tinggi dan penambahan Al-5TiB pada proses pengecoran metode spiral, diharapkan efek negatif Fe dapat diminimalkan membuka peluang untuk meningkatkan nilai fluiditas, kekerasan, dan pembentukan fasa intermetalik yang lebih baik pada paduan Al-7Si.

Untuk menjawab rumusan masalah diatas, maka perlu dilakukan pendekatan dengan penggunaan suhu *superheat* yang lebih tinggi hingga 720°C. Hal ini bermanfaat untuk meningkatkan laju fluiditas, kekerasan, struktur mikro paduan, dan fokus pada pembentukan fasa intermetalik. Perlakuan *superheat* ini juga dapat membuat paduan aluminium lebih homogen dan meningkatkan kekerasan material (Nanda et al., 2020). Selanjutnya, nantinya akan diuji menggunakan Mikro *Vickers* HMV untuk menganalisis kekerasan. Analisis difraksi sinarX (XRD) dan mikroskopi optik juga akan dibutuhkan untuk menganalisis struktur mikro fasa intermetalik, dan juga pengambilan nilai fluiditas dengan metode spiral untuk menganalisis fluiditas pada paduan coran.

Berdasarkan uraian latar belakang, dapat diidentifikasi adanya *research gap* yang cukup jelas pada kajian paduan Al-7Si. Penelitian sebelumnya umumnya berfokus secara terpisah pada pengaruh kandungan Fe sebagai impuritas terhadap pembentukan fasa intermetalik getas dan penurunan sifat mekanik, atau pada efektivitas *grain refiner* Al-Ti-B dalam memperhalus struktur butir dan meningkatkan sifat mekanik. Namun, masih terbatas penelitian yang secara simultan mengkaji interaksi antara penambahan Fe dan Al-5TiB terhadap tiga aspek penting secara terpadu, yaitu fluiditas pengecoran, kekerasan material, dan evolusi struktur mikro pada kondisi *superheat* tinggi. Selain itu, kajian terdahulu lebih banyak menekankan sifat mekanik tanpa mengeksplorasi hubungan komprehensif antara morfologi fasa intermetalik Fe, distribusi butir akibat *grain refiner*, serta implikasinya terhadap performa pengecoran seperti kemampuan alir logam cair.

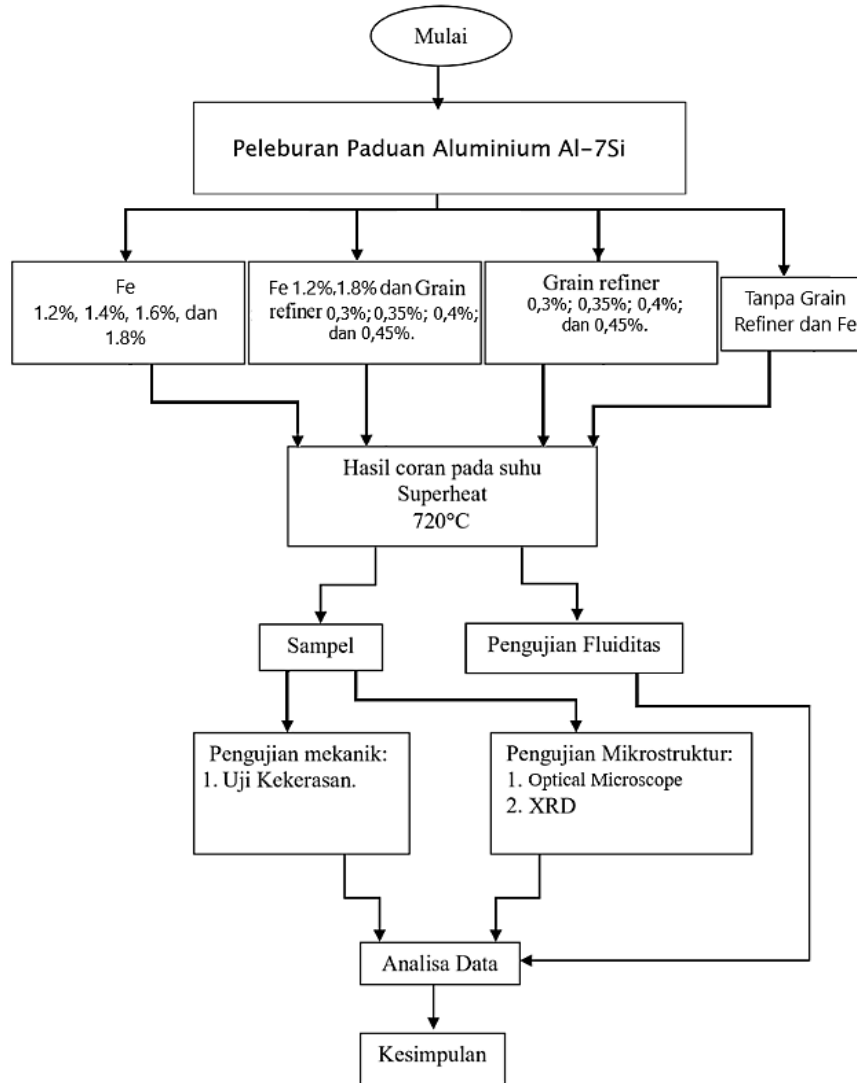
Kontribusi penelitian ini terletak pada penyediaan bukti empiris mengenai mekanisme sinergis antara unsur Fe dan penambahan Al-5TiB dalam memodifikasi struktur mikro paduan Al-7Si pada kondisi *superheat* tinggi. Studi ini tidak hanya memberikan pemahaman baru mengenai perubahan morfologi fasa intermetalik Fe dan efek penghalusan butir terhadap kekerasan, tetapi juga mengaitkannya secara langsung dengan peningkatan fluiditas melalui metode spiral casting. Secara praktis, hasil penelitian diharapkan memberikan dasar ilmiah untuk optimasi komposisi dan parameter proses pengecoran paduan Al-Si daur ulang, sehingga dapat meminimalkan dampak negatif kontaminasi Fe sekaligus meningkatkan kualitas dan performa material pada aplikasi industri.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian ini dimulai dengan perencanaan serta persiapan komprehensif bahan dan peralatan yang akan digunakan. Bahan utama penelitian ini terdiri atas paduan Al-7Si dengan beberapa variasi penambahan besi (Fe) antara 1,2 % hingga 1,8 %, serta *grain refiner* Al-5TiB dalam rentang 0,30 % hingga 0,45 % seperti pada matriks penelitian Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3. Peralatan yang digunakan meliputi tungku listrik dengan kapasitas menampung 3 kg dan daya terpasang 1,76 kW, *thermocouple* digital untuk pengukuran suhu, cetakan spiral untuk uji fluiditas, alat uji kekerasan mikro *Vickers*, mikroskop optik dengan pembesaran lebih dari 500×, dan XRD.

Proses dimulai seperti terlihat pada Gambar 1, yaitu pemanasan tungku hingga suhu *superheating* 720 °C. Setelah suhu target tercapai, 300g lelehan dipindahkan ke kowi bersih untuk meminimalkan kontaminasi oksida. Selanjutnya Al-5TiB atau Fe ditambahkan dan waktu *holdback* selama 15 menit dimulai segera setelah penambahan untuk memungkinkan pembasahan dan pembentukan partikel TiB₂. Selama periode ini dilakukan pengadukan kontinu untuk mempertahankan homogenitas suspensi dan mengurangi risiko pengendapan partikel.

Pemilihan durasi 15 menit dipilih sebagai kompromi antara kebutuhan kinetika reaksi pembentukan TiB₂ dan risiko *fading* (pengendapan) apabila waktu tinggal terlalu lama. Pada pencampuran paduan Al-7Si yang mengandung Fe dan Al-5TiB, Fe dimasukkan terlebih dahulu hingga larut sempurna. Al-5TiB sebagai *grain refiner* kemudian ditambahkan sesaat sebelum penuangan untuk mencegah efek *fading*.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Tabel 1. Matriks penelitian Fe terhadap Al-7Si.

Temperatur (°C)	Kandungan Fe (%)	Panjang Fluiditas (cm)	Nilai Kekerasan (VHN)
720 °C	1,2 %;		
	1,4 %;		
	1,6 %;		
	1,8 %;		

Tabel 2. Matriks Penelitian Al-5TiB terhadap Al-7Si.

Temperatur (°C)	Kandungan Al-5TiB (%)	Panjang Fluiditas (cm)	Nilai Kekerasan (VHN)
720 °C	0,3 %		
	0,35 %		
	0,4 %		
	0,45 %		

Tabel 3. Matriks Penelitian Fe dan Al-5TiB terhadap Al-7Si

Temperatur (°C)	Kandungan Fe (%)	Kandungan Al-5TiB (%)	Panjang Fluiditas (cm)	Nilai Kekerasan (VHN)
720 °C	1.2 %	0,3 %		
		0,35 %		
		0,4 %		

Temperatur (°C)	Kandungan Fe (%)	Kandungan Al-5TiB (%)	Panjang Fluiditas (cm)	Nilai Kekerasan (VHN)
		0,45 %		
		0,3 %		
	1,6 %	0,35 %		
		0,4 %		
		0,45 %		

Variasi kandungan Fe dan Al-5TiB sebelumnya telah melakukan proses *material balance* untuk mengukur berat per variasi, nantinya akan dicampurkan dengan paduan Al-7Si untuk diujikan pada setiap *batch* dengan minimal dua kali pengulangan agar menjamin konsistensi data.

2.1 Pengujian Fluiditas Metode Spiral

Pengujian fluiditas dilakukan dengan menuangkan lelehan ke dalam cetakan spiral seperti pada Gambar 2, yang telah dipanaskan terlebih dahulu hingga suhu tuang, kemudian diukur panjang alir rata-rata setelah pendinginan. Suhu penuangan dilakukan tepat pada suhu 720 °C yang dikontrol di dalam tungku listrik sebelum dilakukan penuangan ke cetakan. Selain itu, suhu cetakan dipanaskan terlebih dahulu hingga 200 °C sebelum proses terjadinya penuangan. Prosedur ini nantinya memungkinkan perbandingan langsung kemampuan alir logam cair pada tiap kombinasi komposisi, sekaligus mendeteksi adanya efek sinergis antara peningkatan kadar Fe dan juga kehadiran *grain refiner* terhadap viskositas dan *wettability* logam pada dinding cetakan.



Gambar 2. Tungku Listrik dan Kowi

2.2 Pengujian Kekerasan Vickers

Pada Gambar 3, Uji kekerasan Mikro *Vickers* diuji pada permukaan yang telah dipersiapkan dengan beban 100 gf selama 15 detik sesuai rentang beban yang mampu merefleksikan variasi sifat mekanik pada paduan tersebut. Masing-masing sampel diuji sebanyak lima titik secara acak untuk mengurangi kesalahan pengukuran, dan nantinya nilai HV dirata-ratakan.



Gambar 3. Alat Uji Kekerasan Vickers

2.3 Pengamatan Mikro Struktur

Setelah pengujian kekerasan, sampel disiapkan untuk pengamatan struktur mikro melalui tahapan metalografi seperti pemotongan, *mounting* dalam resin, *grinding* pengamplasan abrasif hingga #1500 grit, *polishing* dengan suspensi alumina, dan terakhir *etching* menggunakan larutan HF 0,5 %. Pengamatan dilakukan pada mikroskop optik seperti pada Gambar 4 dengan pembesaran lebih dari 500× dan dokumentasi citra menggunakan kamera digital. Kuantifikasi ukuran butir dan morfologi fasa intermetalik serta fase eutektik dituangkan dalam persentase area menggunakan perangkat lunak analisis citra.



Gambar 4. Mikroskop Optik

Selanjutnya, identifikasi fasa dilakukan menggunakan XRD, di mana spektrum 2θ dibandingkan dengan *database* standar untuk menentukan jenis dan proporsi fasa intermetalik (seperti FeSiAl) serta kristal primer Al. Analisis kuantitatif nantinya dilakukan dengan menghitung luas puncak difraksi menggunakan *software PowderX*, sehingga dapat diperoleh perbandingan kandungan fasa dalam tiap sampel.

Data hasil pengujian fluiditas, kekerasan, pengamatan mikro struktur, dan identifikasi fasa, nantinya akan dikumpulkan dalam format matriks eksperimen yang mencakup variabel temperatur peleburan, persen berat Fe, persen berat Al-5TiB, panjang fluiditas, luas area fase, dan nilai kekerasan. Analisis statistik meliputi analisis varian (ANOVA) akan digunakan untuk menguji signifikansi perbedaan antar level variabel. Hasil akhirnya penelitian ini akan membahas kondisi optimum paduan Al-7Si-Fe-TiB dalam hal keseimbangan fluiditas, mikro struktur halus, serta kekerasan yang memadai untuk aplikasi struktural.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil

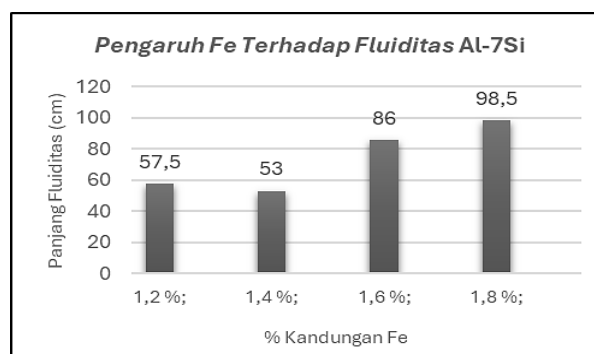
3.1.1 Analisa Pengujian Fluiditas Metode Spiral

Pengujian fluiditas dilakukan menggunakan metode spiral pada suhu tuang $720\text{ }^{\circ}\text{C}$, dengan variasi kandungan Fe (1,2 %–1,8 %), Al-5TiB (0,30 %–0,45 %), dan kombinasi keduanya. Hasil produk dapat diamati pada Gambar 5.



Gambar 5. Produk Hasil Pengujian Fluiditas Metode Spiral

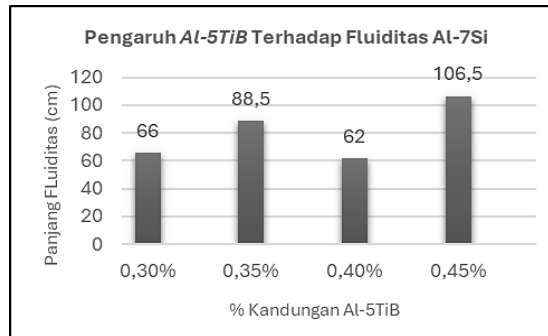
Penambahan unsur besi (Fe) ke dalam paduan Al-7Si memberikan efek non linier terhadap sifat fluiditas logam cair. Pada konsentrasi Fe yang rendah (1,2 % dan 1,4 %), fluiditas menurun signifikan dibanding paduan Al-7Si murni, dengan panjang aliran spiral turun menjadi 57,5 cm dan 53,0 cm. Penurunan ini disebabkan oleh terbentuknya fasa intermetalik $\beta\text{-AlFeSi}$ berbentuk jarum yang tersebar sporadis di saluran alir, menyumbat jalur *hypoeutectic* dan meningkatkan viskositas lelehan. Namun, pada konsentrasi Fe lebih tinggi (1,6 % dan 1,8 %), fluiditas justru meningkat, bahkan melebihi nilai awal (hingga 98,5 cm) seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Pengaruh Fe terhadap Fluiditas Al-7Si

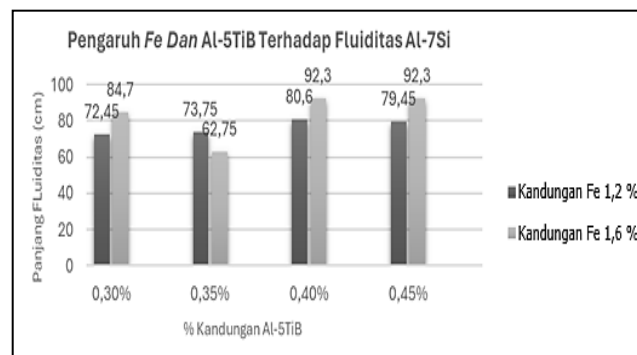
Penambahan Fe ke paduan Al-7Si pada suhu penuangan sekitar 720 °C berlangsung melalui mekanisme difusi dan pembentukan fasa intermetalik dalam lelehan Al-Si, bukan oleh pelelehan Fe murni. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan kandungan Fe cenderung meningkatkan fluiditas dimana fasa-fasa pengikat Fe yang memiliki titik leleh relatif tinggi berperan sebagai reservoir panas lokal selama pengecoran sehingga menunda pembekuan dan memperpanjang waktu aliran. Pada kadar rendah (1,2–1,4 %) terbentuk β -AlFeSi berbentuk jarum yang cenderung menyumbat jalur aliran sehingga mengurangi fluiditas, sedangkan pada kadar lebih tinggi ($\geq 1,6$ %) terbentuk α -AlFeSi bermorfologi “*chinese-script*” yang lebih bulat dan kurang menghambat aliran. Selain itu, pada konsentrasi Fe yang tinggi sebagian besar Fe dan Si bereaksi lebih awal membentuk padatan intermetalik, meninggalkan lelehan relatif lebih murni dengan rentang pembekuan lokal yang menyempit kondisi yang memperlancar aliran dan meningkatkan panjang fluiditas meskipun rentang pembekuan keseluruhan menjadi lebih panjang.

Sementara itu, penambahan *grain refiner* Al-5TiB ke dalam paduan Al-7Si menunjukkan pengaruh yang bergantung pada konsentrasinya terhadap fluiditas logam cair. Pada kadar rendah (0,30 % dan 0,40 %), fluiditas justru menurun menjadi 66,0 cm dan 62,0 cm akibat belum meratanya pembentukan partikel TiB₂, sehingga terjadi penumpukan partikel penghalang yang menghambat aliran lelehan. Namun, ketika konsentrasi Al-5TiB meningkat ke rentang 0,35 %–0,45 %, fluiditas membaik secara signifikan hingga mencapai 106,5 cm. Pada kadar ini, partikel TiB₂ halus terbentuk merata dan memecah struktur *hypoeutectic* menjadi fragmen kecil, sekaligus menurunkan tegangan permukaan lelehan. Hal ini membuat aliran logam cair menjadi lebih lancar dan mampu menjangkau jarak yang lebih jauh dibandingkan paduan tanpa penambahan *grain refiner* seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Pengaruh Al-5TiB terhadap Fluiditas Al-7Si

Penggabungan Fe dan Al-5TiB dalam paduan Al-7Si menghasilkan interaksi kompleks yang memengaruhi fluiditas secara bervariasi tergantung proporsinya. Pada kombinasi Fe 1,2 % dengan Al-5TiB (0,30–0,45 %), fluiditas berada di kisaran 72,5–80,6 cm, lebih rendah dari Al-5TiB 0,45 % tunggal, namun masih mendekati nilai *baseline*. Ini menunjukkan bahwa *grain refiner* mampu mengurangi sebagian hambatan akibat fasa intermetalik dari Fe rendah. Sementara itu, kombinasi Fe 1,6 % dengan Al-5TiB menghasilkan fluiditas yang bervariasi, dengan puncak tertinggi 92,3 cm pada Al-5TiB 0,45 %. Namun, pada kadar Al-5TiB 0,35 %, fluiditas menurun drastis hingga 62,8 cm akibat interaksi negatif antara partikel TiB₂ dan fasa intermetalik yang saling mengganggu jalur alir. Pada kombinasi optimal (Fe 1,6 % + Al-5TiB 0,45 %), terjadi sinkronisasi efek mikro struktur yang menciptakan jalur aliran lelehan yang relatif bebas hambatan, sehingga fluiditas meningkat signifikan meski belum melampaui kondisi Al-5TiB 0,45 % tunggal seperti pada Gambar 8.



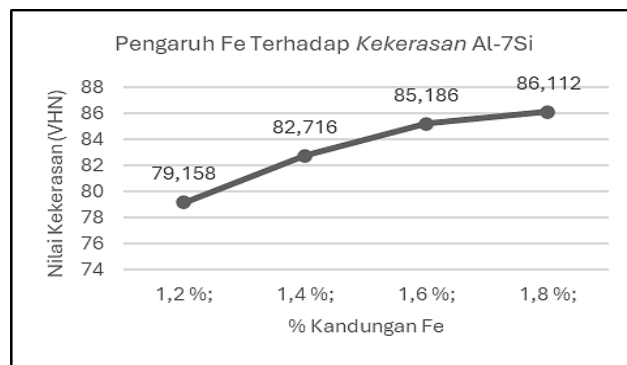
Gambar 8. Grafik Pengaruh Fe dan Al-5TiB terhadap Fluiditas Al-7Si

Fluiditas paduan Al-7Si murni tercatat sebesar 77 cm dan menjadi acuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan Fe dan Al-5TiB. Penambahan Fe pada kadar rendah menurunkan fluiditas, sedangkan pada kadar tinggi meningkatkan fluiditas melebihi *baseline*. Sementara itu, *grain refiner* Al-5TiB menunjukkan peningkatan fluiditas signifikan pada kadar $\geq 0,35$ %, dengan hasil terbaik pada 0,45 % yang mencapai 106,5 cm. Kombinasi Fe dan Al-5TiB mampu meningkatkan fluiditas hingga 92,3 cm, namun belum melampaui hasil optimal Al-5TiB tunggal. Oleh karena itu, untuk aplikasi yang membutuhkan fluiditas tinggi, formulasi paling efektif adalah Al-7Si dengan penambahan Al-

5TiB 0,45 % tanpa unsur Fe. Analisis ANOVA menunjukkan bahwa pengaruh masing-masing unsur terhadap fluiditas tidak berpengaruh signifikan secara statistik ($p > 0,05$), kemungkinan akibat keterbatasan jumlah ulangan.

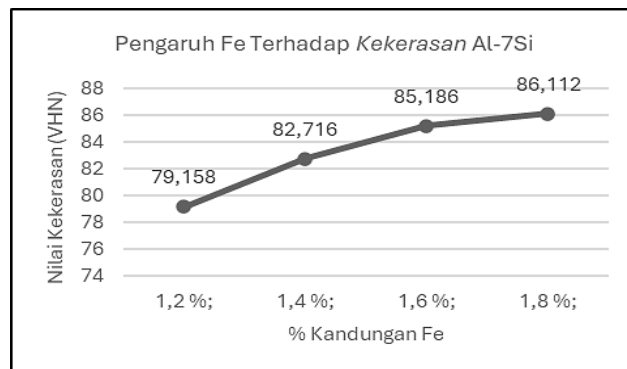
3.1.2 Analisa Pengujian Kekerasan *Vickers*

Pengujian kekerasan menggunakan metode *Vickers* menunjukkan bahwa baik Fe maupun Al-5TiB secara individu maupun kombinasi mampu meningkatkan nilai kekerasan Al-7Si. Tanpa penambahan unsur apa pun, kekerasan rata-rata paduan tercatat 70,93 VHN. Pengujian kekerasan *Vickers* pada paduan Al-7Si dengan penambahan Fe menunjukkan peningkatan kekerasan yang signifikan dibandingkan kondisi tanpa Fe (*baseline* 70,93 VHN). Penambahan Fe sebesar 1,2 % meningkatkan kekerasan menjadi 79,16 VHN (+11,8 %), dan terus meningkat hingga mencapai puncaknya pada 1,6 % dengan nilai 85,19 VHN (+20,1 %). Namun, pada kadar Fe 1,8 %, kekerasan sedikit menurun menjadi 84,99 VHN. Hasil analisis ANOVA menunjukkan bahwa kandungan Fe berpengaruh signifikan terhadap kekerasan ($F = 3,560$; $p = 0,0381 < 0,05$). Peningkatan kekerasan disebabkan oleh terbentuknya fasa intermetalik yang memperkuat struktur, namun pada kadar Fe terlalu tinggi ($>1,6$ %), partikel intermetalik cenderung teraglomerasi dan menimbulkan porositas serta retakan mikro yang mengurangi ketahanan beban permukaan seperti pada Gambar 9.



Gambar 9. Pengaruh Al-5TiB terhadap Kekerasan Al-7Si

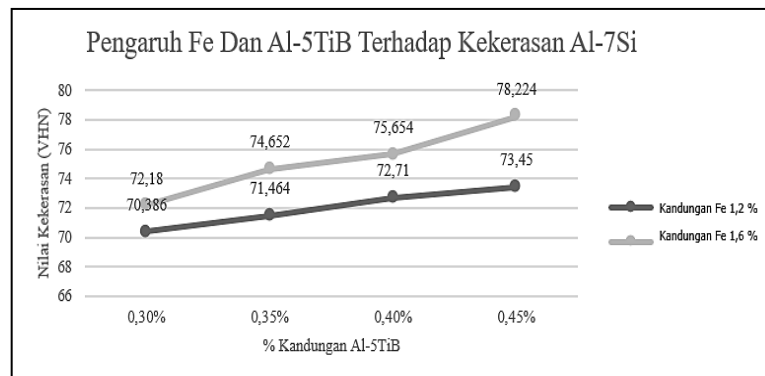
Sebaliknya, Penambahan Al-5TiB sebagai *grain refiner* pada paduan Al-7Si menunjukkan pengaruh kekerasan yang kompleks dan bergantung pada konsentrasi. Pada kadar rendah (0,3 %), kekerasan justru menurun menjadi 68,76 VHN (-2,9 % dari *baseline*), karena partikel TiB_2 belum cukup untuk menghambat pertumbuhan butir aluminium secara efektif. Nilai kekerasan mulai meningkat pada 0,35 % (71,43 VHN), dan terus naik signifikan pada 0,4 % (74,64 VHN), hingga mencapai puncak pada 0,45 % dengan 78,66 VHN (+11,0 %). Hasil analisis ANOVA mengonfirmasi bahwa pengaruh Al-5TiB terhadap kekerasan sangat signifikan ($F = 13,531$; $p = 0,00012$). Peningkatan ini disebabkan oleh distribusi merata partikel TiB_2 yang memperkecil ukuran butir, sehingga meningkatkan kekerasan permukaan. Namun, pada konsentrasi tinggi, potensi aglomerasi partikel dapat menyebabkan peningkatan viskositas dan menurunkan kepadatan, sehingga diperlukan optimasi kadar untuk menjaga performa material secara keseluruhan seperti pada Gambar 10.



Gambar 10. Pengaruh Al-5TiB terhadap Kekerasan Al-7Si

Hasil uji kekerasan *Vickers* menunjukkan bahwa paduan dasar Al-7Si memiliki nilai rata-rata kekerasan sebesar 70,93 VHN. Penambahan Fe dan *grain refiner* Al-5TiB pada suhu 720 °C meningkatkan kekerasan secara signifikan, terutama pada kadar Al-5TiB yang lebih tinggi. Pada Fe 1,2 %, kekerasan meningkat dari 70,386 VHN (Al-5TiB 0,3 %) menjadi 73,45 VHN (0,45 %). Sementara itu, pada Fe 1,6 %, kenaikan lebih tajam, dari 72,18 VHN hingga 78,224 VHN, bahkan beberapa sampel mencapai lebih dari 90 VHN. Meski demikian, analisis ANOVA dua arah menunjukkan bahwa pengaruh Fe dan Al-5TiB secara statistik tidak signifikan terhadap kekerasan ($p > 0,05$), menandakan bahwa interaksi keduanya menghasilkan struktur mikro yang relatif stabil. Al-5TiB berfungsi memperhalus butir, sedangkan Fe membentuk fasa intermetalik keras. Namun, fluktuasi kekerasan pada beberapa

komposisi mengindikasikan distribusi partikel penguat belum merata pada kadar rendah. Kombinasi Fe 1,6 % dan Al-5TiB 0,45 % terbukti memberikan kekerasan tertinggi, mencerminkan efek sinergis yang optimal dalam memperkuat paduan Al-7Si seperti pada Gambar 11.

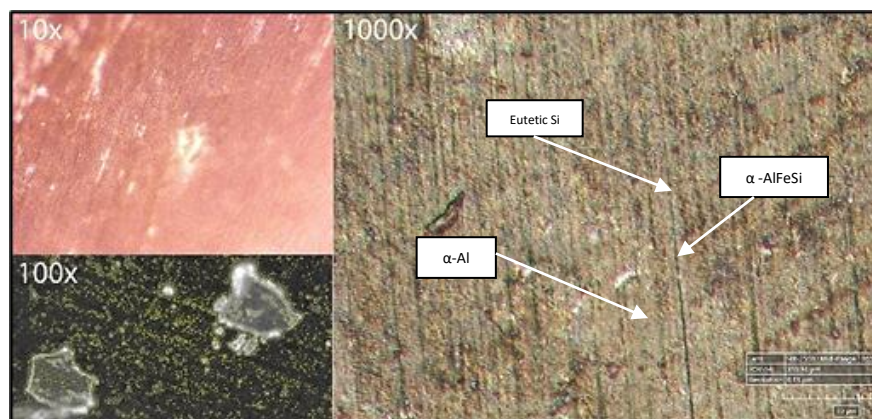


Gambar 11. Grafik Pengaruh Fe dan Al-5TiB terhadap Kekerasan Al-7Si

Berdasarkan hasil ANOVA dua arah, faktor tunggal Fe dan Al-5TiB secara statistik tidak berpengaruh signifikan terhadap kekerasan, meskipun secara metalurgi pengaruh mandiri Fe kuat dalam membentuk fasa intermetalik keras hanya saja signifikansinya tertutupi dalam model statistik akibat interaksi antar faktor. Sementara itu, penambahan Al-5TiB tidak memberikan dampak tambahan yang berbeda secara nyata pada setiap variasi Fe, yang berarti peningkatan kekerasan akibat Al-5TiB cenderung konsisten di semua level Fe sehingga tidak menciptakan perbedaan statistik yang signifikan.

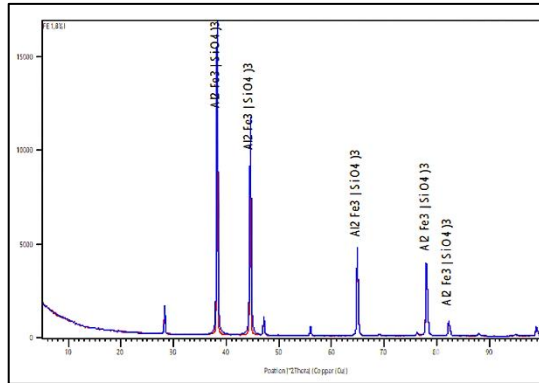
3.1.3 Analisa Pengamatan Mikro Struktur

Pengamatan mikro struktur paduan Al-7Si dengan penambahan Fe 1,8 % seperti pada Gambar 12 menunjukkan struktur yang halus dan kompleks. Pada *pembesaran* 10x, bidang potong tampak seragam, didominasi oleh matriks aluminium (α -Al) berwarna keemasan dan fasa eutektik silikon yang tampak gelap. Pada 100x, morfologi fasa eutektik silikon terlihat jelas berbentuk “chinese script” dengan pola bercabang khas. Pada *pembesaran* 1000x, struktur mikro memperlihatkan fasa intermetalik Al-Fe-Si dalam bentuk bulat *chinese script* yang merupakan ciri khas dari fasa α -AlFeSi pada kadar Fe tinggi (>1,6 %). Partikel intermetalik putih memanjang tampak tersebar merata di sepanjang butiran, sementara batas butir α -Al menjadi kurang jelas karena dominasi fasa intermetalik. Ukuran rata-rata butiran aluminium berkisar antara 20–30 μm dengan batas butir < 0,5 μm , menunjukkan struktur yang cukup halus namun kompleks akibat interaksi fasa sekunder.



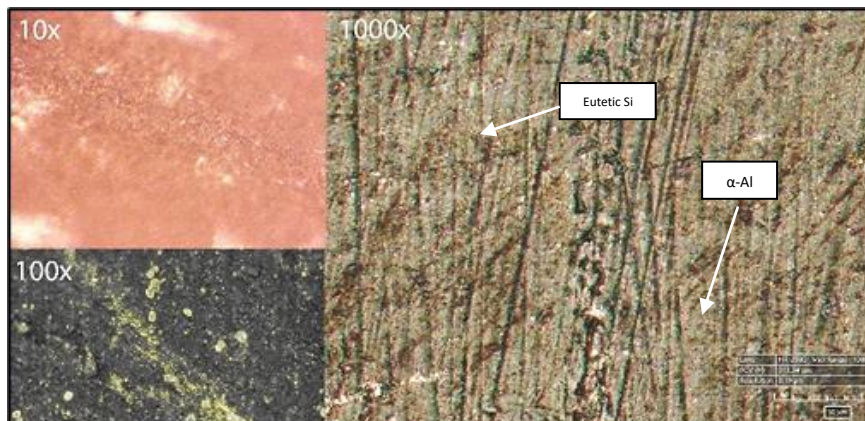
Gambar 12. Struktur Mikro Fe 1,8% *Pembesaran* 10x,100x, dan 1000x

Pada sampel paduan Al-7Si dengan kadar Fe 1,8 %, pola difraksi menunjukkan dominasi kuat dari fasa aluminium-besi-silikat berstruktur garnet ($\text{Al}_2\text{Fe}_3(\text{SiO}_4)_3$), tanpa terdeteksi fasa Fe murni atau intermetalik lain. Hal ini mengindikasikan bahwa hampir seluruh Fe telah terikat dalam bentuk silikat kompleks. Sebagian Fe selama peleburan atau pada permukaan bereaksi dengan SiO_2 yang akhirnya membentuk silikat dimana kondisi aktivitas oksigen yang tinggi atau Si berlebih di lelehan yang menggeser keseimbangan kimia ke arah pembentukan silikat, serta kondisi kinetik seperti pendinginan cepat yang dapat menstabilkan fasa silikat nanokristalin yang tidak lazim pada kondisi kesetimbangan. Puncak utama pada sudut $2\theta \approx 38,25^\circ$ dengan $\text{FWHM} = 0,2273^\circ$ menunjukkan ukuran kristalit kecil, sekitar 37 nm berdasarkan perhitungan *Scherrer*. Pelebaran puncak mencerminkan adanya tegangan mikro dan batas butir yang halus, kemungkinan dipengaruhi oleh proses pendinginan cepat yang menghambat pertumbuhan kristal garnet secara signifikan seperti pada Gambar 13.



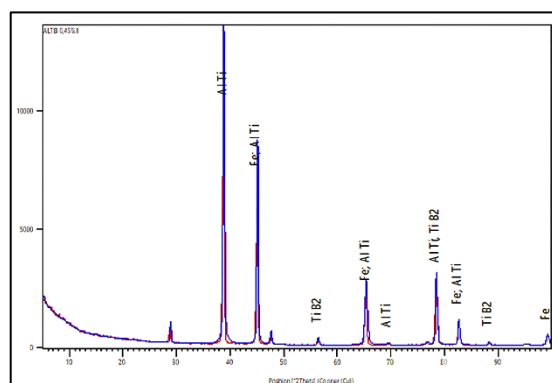
Gambar 13. Kurva XRD Fe 1,8% terhadap Al-7Si

Sedangkan pada pengamatan mikro struktur paduan Al-7Si dengan penambahan 0,45 % Al-5TiB menunjukkan struktur yang lebih halus dan seragam dibandingkan tanpa *grain refiner*. Pada pembesaran 10x, matriks α -Al terlihat lebih terang dan homogen, dengan titik-titik gelap kecil yang merupakan partikel TiB_2 atau Al_3Ti . Pembesaran 100x memperlihatkan distribusi butiran halus yang merata, menandakan efektivitas proses perefinasi. Pada pembesaran 1000x, terlihat matriks α -Al berwarna keemasan dengan partikel TiB_2 dan Al_3Ti tersebar merata, mempertegas batas-batas butir dan memperhalus struktur. Partikel TiB_2 bermorfologi halus (*acicular*/berbiji) dan terdistribusi secara homogen, sehingga memperkecil ukuran butir aluminium. Berdasarkan jumlah butir dalam FOV (lebar 313 μm), diameter rata-rata butir α -Al berkisar 26–40 μm dengan batas butir < 0,5 μm , sesuai fungsi utama *grain refiner* dalam memperhalus mikro struktur seperti pada Gambar 14.



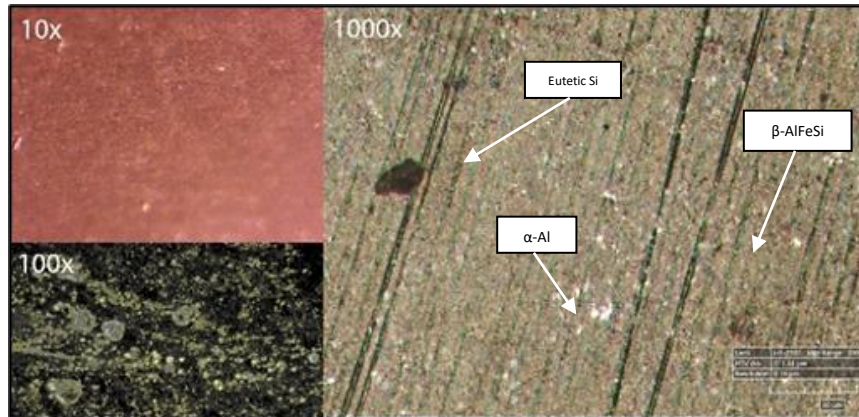
Gambar 14. Struktur Mikro Al-5TiB 0,45 % Pembesaran 10x, 100x, dan 1000x

Pada sampel Al-7Si dengan penambahan 0,45 % Al-5TiB, terdeteksi tiga fasa utama yaitu TiB_2 , $AlTi$, dan Fe. Kehadiran TiB_2 menandakan keberhasilan reaksi antara prekursor Ti dan B dalam membentuk partikel penguat yang stabil, sementara $AlTi$ muncul sebagai fasa intermetalik dalam matriks. Fasa Fe kemungkinan berasal dari kontaminasi atau residu pengotor. Puncak difraksi paling kuat pada $2\theta \approx 38,80^\circ$ dengan $FWHM = 0,2922^\circ$ menunjukkan ukuran kristalit sekitar 29 nm, mencerminkan butiran halus yang terdistribusi merata. Pelebaran puncak tersebut juga mengindikasikan adanya tegangan sisa di antarmuka matriks dan partikel penguat, yang turut memengaruhi sifat mekanik paduan seperti pada Gambar 15.



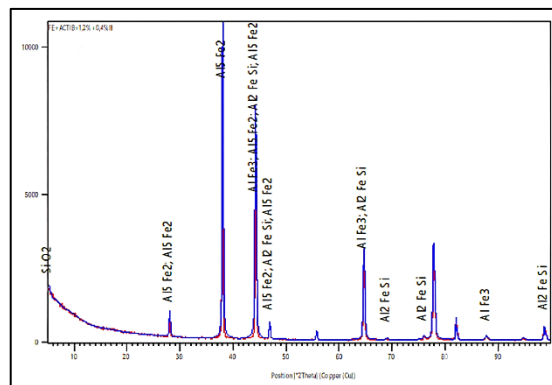
Gambar 15. Kurva XRD Al-5TiB 0,45 % terhadap Al-7Si

Paduan Al-7Si dengan penambahan 1,2 % Fe dan 0,30 % Al-5TiB menunjukkan struktur mikro yang seragam dan halus. Pada *pembesaran* 1000x, butir α -Al memiliki diameter rata-rata 28–35 μm , dengan distribusi yang seragam juga terlihat pada *pembesaran* 10x dan 100x tanpa anomali ukuran. Fasa intermetalik tampak sebagai pelat tipis memanjang (15–30 μm) dan partikel kecil (3–6 μm), tersusun sejajar arah pertumbuhan kristal dan terkonsentrasi di batas butir, memperkuat struktur tanpa membentuk klaster besar. Batas butir tetap sangat tipis (< 0,5 μm), menandakan kontrol mikro struktur yang baik. Dari pantulan kontras, matriks α -Al tampak kekuningan terang, eutektik Si berwarna abu-abu keperakan, dan fasa intermetalik tampak coklat kekuningan dengan kilau hijau-biru di tepi pelat, seperti terlihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Struktur Mikro Fe 1,2 % + Al-5TiB 0,4% *Pembesaran* 10x, 100x, dan 1000x

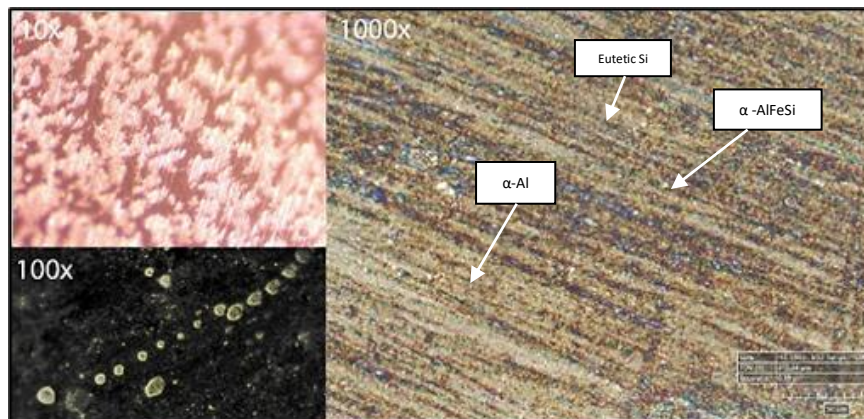
Dalam sampel kombinasi Fe 1,2 % dengan Al-5TiB 0,3 %, pola difraksi mengungkapkan terbentuknya beberapa fasa silikat dan intermetalik: SiO_2 (kuarsa), AlFe_3 , Al_5Fe_2 , Al_2FeSi , serta Al_5Fe_2 duplikat. Ketiadaan *peak* TiB_2 menandakan bahwa pada konsentrasi B rendah, pembentukan TiB_2 terhambat dan Fe lebih banyak membentuk intermetalik kompleks dengan Al dan Si. FWHM puncak utama pada $2\theta \approx 38,02^\circ$ sebesar $0,2273^\circ$ menghasilkan ukuran kristalit sekitar 37 nm, serupa dengan sampel pertama. Fenomena *multiphase* ini dapat menimbulkan heterogenitas mikro struktur, mempengaruhi sifat mekanik dan termal melalui distribusi tegangan lokal di antar fasa seperti pada Gambar 17.



Gambar 17. Kurva XRD Fe 1,2 % + Al-5TiB 0,4% terhadap Al-7Si

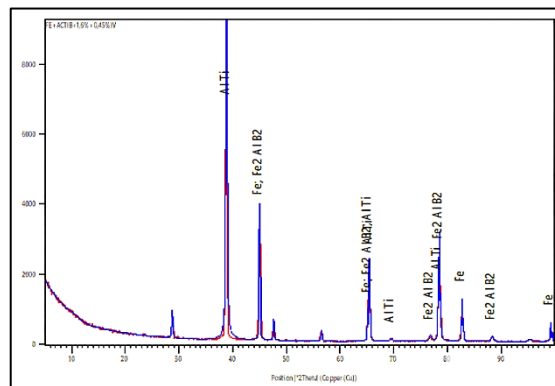
Kombinasi penambahan 1,6 % Fe dan 0,45 % Al-5TiB ke dalam paduan Al-7Si menghasilkan struktur mikro yang jauh lebih halus serta keberagaman fase yang lebih terkontrol dan homogen dibandingkan kondisi tanpa modifikasi. Pada pengamatan dengan pembesaran rendah (10 \times) tampak butiran α -Al berbentuk *equiaxed* yang terdistribusi merata di seluruh bidang pengamatan tanpa munculnya zona-zona kasar atau aglomerasi makroskopis, yang menunjukkan penyebaran fase dasar yang seragam. Ketika pembesaran ditingkatkan menjadi 100 \times , terjadi perubahan morfologi fase intermetalik dimana bentuk jarum yang lebih kasar berganti menjadi partikel yang berbentuk bulat hingga *ellipsoid* dengan ukuran individual sekitar 2-5 μm . Beberapa partikel ini juga terlihat bergabung membentuk agregat yang lebih besar (sekitar 8-12 μm), dan agregat tersebut dapat ditemukan baik tersisip di dalam butir α -Al maupun menempel di batas butir. Pada pembesaran tinggi (1000 \times) jelas terlihat dimensi butir α -Al yang relatif kecil, diameternya berkisar antara 26- 40 μm dengan batas butir yang sangat tipis (< 0,5 μm), sementara eutektik Si mempertahankan morfologi *chinese script* tetapi dalam versi yang lebih halus dan terfragmentasi, menandakan peningkatan rafinasi eutektik. Matriks α -Al memantulkan cahaya sehingga tampak kekuningan terang, eutektik Si tampil sebagai area abu-abu terang, dan fasa intermetalik memperlihatkan rona coklat kekuningan dengan kilau berwarna hijau-biru di tepian partikel. Karakteristik visual yang juga dapat dilihat pada Gambar 18 dimana seluruh ciri

ini secara bersama-sama mengindikasikan bahwa kombinasi Fe dan Al-5TiB memberikan efek pemecahan morfologi dan peningkatan homogenitas distribusi fase dalam paduan Al-7Si.



Gambar 18. Struktur Mikro Fe 1,6 % + Al-5TiB 0,45% Pembesaran 10x, 100x, dan 1000x

Analisis XRD pada sampel Al-7Si dengan 1,6 % Fe dan 0,45 % Al-5TiB menunjukkan keberadaan tiga fasa utama, yaitu Fe, intermetalik Fe_2AlB_2 , dan AlTi. Fasa Fe_2AlB_2 terbentuk dari reaksi antara Fe, Al, dan B pada suhu tinggi, yang memperkaya kompleksitas struktur mikro. Hal ini disebabkan oleh peningkatan mobilitas atom dan laju difusi pada suhu 720 °C yang cukup sehingga memberi kesempatan bagi atom-atom Fe, Al, dan B untuk saling berinteraksi dan mengendapkan fase baru, meskipun keberadaan unsur perekat atau elemen dengan afinitas boron yang lebih tinggi (Ti) dapat mengubah keseimbangan kinetik dengan mengikat B menjadi borida stabil sehingga mengurangi kelimpahan B bebas yang tersedia untuk membentuk Fe_2AlB_2 . Puncak difraksi utama pada $2\theta \approx 38,81^\circ$ dengan FWHM = $0,3572^\circ$ menghasilkan ukuran kristalit sekitar 24 nm, lebih kecil dibanding sampel lain, menandakan pertumbuhan butir yang sangat terhambat akibat kehadiran partikel TiB_2 serta tingginya tegangan mikro. Kombinasi butiran halus dan keberagaman fasa ini mengindikasikan adanya mekanisme penguatan melalui efek *Hall-Petch* dan interaksi antar fasa, yang berpotensi meningkatkan kekerasan paduan namun dapat menurunkan keuletannya seperti pada Gambar 19.



Gambar 19. Kurva XRD Fe 1,6 % + Al-5TiB 0,45% terhadap Al-7Si

Secara keseluruhan, penambahan Fe sebesar 1,8 % pada Al-7Si menghasilkan fase intermetalik Al-Fe-Si bermorfologi “*chinese script*” yang mendominasi batas butir α -Al, membentuk butiran sedang (20–30 μm) dengan kristalit halus berstruktur garnet (37 nm) dan tegangan mikro tinggi, yang meningkatkan kekerasan namun mengaburkan batas butir. Sebaliknya, penambahan 0,45 % Al-5TiB mampu memperhalus butir α -Al (26–40 μm), menegaskan batas butir, serta mendispersikan partikel TiB_2/Al_3Ti (29 nm) secara homogen sebagai *grain refiner*, sehingga meningkatkan homogenitas mikro struktur dan stabilitas fasa penguat. Kombinasi kadar rendah (1,2 % Fe dan 0,30 % Al-5TiB) membentuk *multiphase* kompleks tanpa keberadaan TiB_2 yang signifikan, sementara kombinasi kadar tinggi (1,6 % Fe dan 0,45 % Al-5TiB) menghasilkan mikro struktur sangat halus dan homogen dengan butir *equiaxed* 26–40 μm serta kristalit TiB_2/Fe_2AlB_2 berukuran kecil (24 nm), yang mengoptimalkan penguatan melalui mekanisme *Hall-Petch* dan interaksi antar fasa.

3.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil dari penelitian, peningkatan fluiditas tertinggi pada penambahan Al-5TiB 0,45% disebabkan oleh terbentuknya partikel TiB_2 dan Al_3Ti yang terdistribusi homogen dan berperan sebagai inti nukleasi heterogen bagi fasa α -Al, sehingga menghasilkan struktur *equiaxed* yang lebih halus dan stabil. Penghalusan butir ini menurunkan hambatan aliran serta membantu menjaga kestabilan leleh selama pengisian cetakan. Sebaliknya, penambahan Fe pada kadar rendah ($\leq 1,2\%$) memicu dominasi fasa β -AlFeSi berbentuk jarum yang cenderung menghambat aliran



logam cair dan meningkatkan viskositas, sehingga fluiditas menurun drastis. Pada kadar Fe yang lebih tinggi ($\geq 1,6\%$), morfologi intermetalik bergeser ke bentuk α -AlFeSi yang lebih kompak dan kurang merugikan terhadap aliran, sehingga fluiditas kembali meningkat meskipun rentang pembekuan bertambah.

Dari sisi kekerasan, peningkatan nilai VHN pada Fe 1,6% berkaitan dengan terbentuknya intermetalik Fe yang keras dan berkontribusi pada penguatan dispersi, sedangkan Al-5TiB 0,45% meningkatkan kekerasan melalui mekanisme penghalusan butir (efek *Hall-Petch*) akibat distribusi partikel TiB₂ berukuran nanometer. Kombinasi Fe 1,6% dan Al-5TiB 0,45% menghasilkan mikrostruktur paling homogen dengan kristalit lebih kecil dan interaksi antar fasa yang optimal, termasuk kemungkinan terbentuknya fasa kompleks seperti Fe₂AlB₂ pada suhu tinggi, sehingga tercapai keseimbangan antara fluiditas dan kekerasan. Sinergi ini menunjukkan bahwa kontrol komposisi dan morfologi intermetalik menjadi kunci dalam memaksimalkan performa paduan Al-7Si termodifikasi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa penambahan Al-5TiB 0,45% pada Al-7Si tanpa Fe memberikan fluiditas tertinggi yaitu 106,5 cm (dibandingkan *baseline* 77 cm), sementara penambahan Fe pada kadar rendah (1,2-1,4%) menurunkan fluiditas drastis menjadi 53-57,5 cm. Menariknya, pada kadar Fe tinggi (1,6-1,8%) fluiditas kembali naik signifikan ke 86-98,5 cm, menunjukkan transformasi morfologi intermetalik (dari β -AlFeSi jarum ke α -AlFeSi lebih seragam) yang mengurangi efek penghambat aliran fenomena konstraintif terhadap anggapan umum bahwa Fe selalu menurunkan fluiditas. Kombinasi Fe 1,6% dan Al-5TiB 0,45% menghasilkan paduan terbaik antara alir dan penguatan dengan fluiditas 92,3 cm dan peningkatan kekerasan permukaan (rata-rata 78,22 VHN, puncak >90 VHN), sementara nilai kekerasan tertinggi tercatat pada Fe 1,6% (85,19 VHN) dan Al-5TiB 0,45% sendiri mencapai 78,66 VHN. Mikrostruktur mendukung temuan ini dimana Al-5TiB menghasilkan α -Al *equiaxed* (26-40 μm) dengan partikel TiB₂/Al₃Ti ~ 29 nm dan batas butir tegas (<0,5 μm), Fe rendah mendorong β -AlFeSi jarum yang menurunkan fluiditas, sedangkan Fe tinggi dan kombinasi dengan Al-5TiB menghasilkan mikrostruktur paling halus (kristalit ≈ 24 nm) dan, pada kondisi suhu tinggi, munculnya fasa kompleks (mis. Fe₂AlB₂) yang turut mempengaruhi penguatan. Oleh karena itu kontrol kuantitatif komposisi dan morfologi intermetalik adalah kunci untuk memaksimalkan keseimbangan fluiditas dan sifat mekanik.

REFERENCES

- Abdus Shomad, M., Wisnujati, A., & Mudjijana, M. (2022). Karakterisasi Pengecoran Paduan Al-Si-TiB dengan Variabel Suhu Die Casting. *Rekayasa*, 15(3), 300–307. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v15i3.15438>
- AIT EL HAJ, B., Hamadallah, A., BOUAYAD, A., & El Akili, C. (2023). Review Of Grain Refinement Performance Of Aluminium Cast Alloys. *Metallurgical and Materials Engineering*, 29(2), 1–15. <https://doi.org/10.56801/mme997>
- Angeles, L. (2018). *Aluminum alloys with grain refiners, and methods for making and using the same* (Vol. 1). <https://patents.google.com/patent/US20190032175A1/en>
- Biswas, P., Gupta, S., Mondal, M. K., Bhandari, R., & Pramanik, S. (2020). Structure-property correlation of hypoeutectic Al-7.6Si alloys with and without Al-5Ti-1B grain refiner. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 79(8), 696–700. <https://doi.org/10.56042/jsir.v79i8.41414>
- Choudhary, C., Bar, H. N., Arif, S. M. D., Sahoo, K. L., & Mandal, D. (2024). Effect of Structural Refinement and Modification on the Mechanical Properties of Al-7Si Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(10), 5155–5167. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08313-6>
- Fan, Z., Gao, F., Wang, Y., Men, H., & Zhou, L. (2022). Effect of solutes on grain refinement. *Progress in Materials Science*, 123(March), 100809. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100809>
- Gyarmati, G., Bogoly, L., Stawarz, M., Fegyverneki, G., & Tok, M. (2022). *Grain Refiner Settling and Its Effect on the Melt Quality of Aluminum Casting Alloys*.
- Kumar, D. T. A., Kumar, K. G. B., Pattanaik, A., & Mukherjee, M. (2020). Improvement of Al-Si Hypoeutectic Cast Alloy Properties by Forging with Grain Refiner and Modifier. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73(12), 3105–3112. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02120-6>
- Li, Y., Hu, B., Liu, B., Nie, A., Gu, Q., Wang, J., & Li, Q. (2020). *Acta Materialia Insight into Si poisoning on grain refinement of Al-Si / Al-5Ti-B system*. 187. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.01.039>
- Martin, J. H., Yahata, B., Mayer, J., Mone, R., Stonkevitch, E., Miller, J., Masta, M. R. O., Schaedler, T., Hundley, J., Callahan, P., Pollock, T., Yahata, B., Mayer, J., & Mone, R. (2020). Grain refinement mechanisms in additively manufactured nanofunctionalized aluminum. *Acta Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.09.043>
- Nanda, I. P. (2014). Pengaruh Penambahan Fe Terhadap Sifat mekanik dan Struktur Mikro pada Paduan Aluminium 7% Silikon (Al-7%Si). *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIII, Snttm Xiii*, 976–980.
- Nanda, I. P., Ghandvar, H., Idris, M. H., & Arafat, A. (2020). Influence of superheating melt treatment on microstructure of Gd-modified Al-15wt. % Mg₂Si in-situ composite. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 17(2), 7967–7973. <https://doi.org/10.15282/ijame.17.2.2020.15.0596>
- Samuel, E., Tahiri, H., M. Samuel, A., Songmene, V., & H. Samuel, F. (2024). A Review on Fundamentals of Grain Refining of Al-Si Cast Alloys. *Recent Advancements in Aluminum Alloys*.



<https://doi.org/10.5772/intechopen.112987>

- Suharno, B., Prima Nanda, I., & Evan, T. (2007). Peranan Modifier Strontium Terhadap Fluiditas Dan Perubahan Morfologi Struktur Silikon Pada Master Alloy Al-7%Si DAN Al-11%Si. *Jurnal Sains MIPA Universitas Lampung*, 13(3), 175–180.
- Suharno, B., Prima Nanda, I., Harjanto, S., & Lirachandra, E. (2007). The Influence of Grain Refiner on Dendrite Arm Spacing of Aluminum Alloy ADC 12 (Bambang Suharno) The Influence Of Grain Refiner On Dendrite Arm Spacing Of Aluminum Alloy ADC 12. *Jurnal Sains Materi Indonesia Indonesian Journal of Materials Science*, 8(2), 1411–1098.
- Sunitha, K., & Gurusami, K. (2020). Study of Al-Si alloys grain refinement by inoculation. *Materials Today: Proceedings*, 43(xxxx), 1825–1829. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.684>
- Uludağ, M. (2020). Influence of Al-B grain refiner on porosity formation of directionally solidified Al-Si alloys. 17(5), 1–6.
- Vainik, R., Courtenay, J., & Lien, F. (2021). Grain Refinement Efficiency. *Minerals, Metals and Materials Series*, 6, 829–836. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65396-5_109
- Wang, Y. U. N., Que, Z., Hashimoto, T., Zhou, X., & Fan, Z. (2020). Mechanism for Si Poisoning of Al-Ti-B Grain Refiners in Al Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51(11), 5743–5757. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05950-7>
- Xiao, F., Wu, M., Wang, Y., Zhou, W., Wang, S., Wang, D., Zhu, G., Jiang, M., Shu, D., Mi, J., & Sun, B. (2022). Effect of trace boron on grain refinement of commercially pure aluminum by Al – 5Ti – 1B. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 32(4), 1061–1069. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(22\)65855-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(22)65855-2)
- Zhao, Y., Zhang, W., Song, D., Lin, B., Shen, F., Zheng, D., Xie, C. X., Sun, Z., Fu, Y., & Li, R. (2021). Nucleation and growth of Fe-rich phases in Al-5Ti-1B modified Al-Fe alloys investigated using synchrotron X-ray imaging and electron microscopy. *Journal of Materials Science and Technology*, 80, 84–99. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.12.011>