

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Awal

Material awal yang digunakan pada penelitian ini berupa limbah *velg* mobil bekas berbasis paduan Al–Si dengan kandungan silikon tinggi. Hasil uji komposisi awal menggunakan XRF menunjukkan kandungan aluminium sebesar 85,65 wt% dan silikon sebesar 13,45 wt%. Kandungan Si tersebut berada jauh di atas rentang komposisi paduan aluminium *velg* standar, seperti A356.0 yang umumnya memiliki kandungan Si sekitar 6,5–7,5 wt%. Kandungan silikon yang berlebih pada paduan Al–Si diketahui meningkatkan kekerasan namun menurunkan keuletan akibat terbentuknya fasa eutektik Si berbentuk jarum atau platelet yang bersifat rapuh. Oleh karena itu, limbah *velg* dengan kandungan Si tinggi memerlukan proses *refining* sebelum dimanfaatkan kembali sebagai material teknik.

Untuk menurunkan kadar silikon tersebut, dilakukan proses *remelting* dengan variasi suhu peleburan 650°C, 725°C, dan 800°C, disertai penambahan Ca sebagai agen desilikasi dengan variasi kadar 3%, 5%, 7%, dan 9% (wt%). Penambahan Ca didasarkan pada kemampuannya bereaksi dengan Si bebas dalam lelehan aluminium dan membentuk senyawa intermetalik Ca–Si yang memiliki densitas lebih rendah dibandingkan aluminium cair, sehingga dapat terpisahkan melalui proses *skimming* [17]. Hasil uji komposisi untuk material awal menggunakan XRF portabel (*X-ray Fluorescence*) dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil XRF Material *Velg*

Material	Elements wt%			
	Al	Si	Fe	Ta
<i>Velg</i>	85,65	13,45	0,163	0,025

Berdasarkan Tabel 4.1 Hasil XRF pada material bahan velg yang digunakan merupakan Paduan Al-Si 13.45%wt. yang akan dilakukan proses sesuai dengan metodologi penelitian yaitu di *remelting* dan ditambahkan Ca dengan variasi kadar, pada 3 variasi suhu yaitu 650°C, 725°C dan 800°C. setelah dilakukan *remelting* lelehan Paduan akan diberikan *degassing* tablet guna mencegah gas terperangkap ataupun inklusi pada lelehan dan dengan menghilangnya atau berkurangnya gas terperangkap dapat memodifikasi struktur mikro paduan pada proses solidifikasi nantinya . Yang kemudian akan dilakukan beberapa pengujian berdasarkan hasil pengecoran, dimulai dengan uji komposisi yang akan dilakukan dengan OES (*Optical Emission Spectroscopy*), kemudian masing-masing sampel akan diuji mekanik yaitu uji tarik untuk mengetahui pengaruh penambahan Ca pada *ductility* sampel hasil, lalu akan diuji kekerasan dengan alat *hardness brinnel test* guna mengetahui pengaruh variasi terhadap sifat kekerasan sampel hasil dan terakhir akan diuji metalografi untuk mengetahui mikrostruktur dari sampel yang dapat menjelaskan sifat fisik material dari struktur mikronya. Berdasarkan hasil uji komposisi awal material skrap velg yang digunakan mengindikasikan berupa *Cast Aluminium* seri 3 yang merupakan paduan Al dengan Si.

4.2 Hasil Uji Komposisi

Setelah material bahan velg dilakukan proses remelting pada variasi suhu 650°C, 725°C, dan 800°C dengan variabel penambahan Ca 5%, 7%, dan 9% pada masing-masing variasi suhu, proses ini bertujuan untuk mengamati pengaruh penambahan kalsium terhadap penurunan kadar silikon dalam paduan Al-Si. Penelitian yang telah dilaksanakan menggunakan metode OES (*Optical Emission Spectroscopy*) untuk menganalisis komposisi unsur dalam paduan aluminium hasil remelting. Data hasil uji komposisi tersebut akan ditampilkan pada tabel berikut,

Tabel 4.2 Hasil Uji Komposisi pada 650°C

Penambahan Ca	Element wt%	
	Al	Si
3% Ca Addition	88,3%	11,3%
5% Ca Addition	91,1%	8,7%
7% Ca Addition	91,7%	8,1%
9% Ca Addition	87,4%	3,47%

Tabel 4.3 Hasil Uji Komposisi pada 725°C

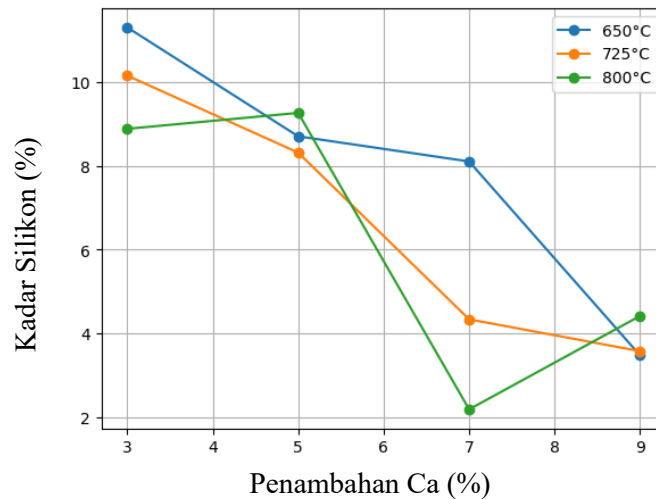
Penambahan Ca	Element wt%	
	Al	Si
3% Ca Addition	88,8%	10,15%
5% Ca Addition	89,1%	8,31%
7% Ca Addition	91,4%	4,33%
9% Ca Addition	90,3%	3,57%

Tabel 4.4 Hasil Uji Komposisi pada 800°C

Penambahan Ca	Element wt%	
	Al	Si
3% Ca Addition	87,5%	8,88%
5% Ca Addition	85,1%	9,26%
7% Ca Addition	90,9%	2,18%
9% Ca Addition	92,1%	4,41%

Pengujian komposisi kimia dengan OES (*Optical Emission Spectroscopy*) dilakukan untuk mengetahui perubahan kadar unsur utama aluminium (Al), silikon (Si), dan kalsium (Ca) pada paduan Al–Si setelah proses *remelting* dengan variasi penambahan Ca dan suhu peleburan. Hasil uji komposisi pada suhu peleburan 650°C, 725°C, dan 800°C masing-masing disajikan pada Tabel 4.2, Tabel 4.3, dan Tabel 4.4. Berdasarkan data pada Tabel 4.2 hingga Tabel 4.4, secara umum terlihat adanya kecenderungan penurunan kadar Si seiring dengan peningkatan kadar penambahan Ca pada seluruh variasi suhu peleburan. Penurunan kadar Si tersebut diikuti dengan peningkatan relatif kadar Al dalam paduan, sementara unsur Ca terdeteksi dalam jumlah yang relatif kecil dan menunjukkan variasi antar kondisi peleburan. Pada suhu peleburan 650°C, kadar Si mengalami penurunan dari nilai awal sebesar 13,45 wt% menjadi 11,3 wt% pada penambahan Ca sebesar 3%, kemudian menurun lebih lanjut menjadi 8,7 wt% dan 8,1 wt% masing-masing pada penambahan Ca sebesar 5% dan 7%. Pada penambahan Ca sebesar 9%, kadar Si masih menunjukkan penurunan, namun perbedaannya relatif kecil dibandingkan

variasi 7%. Pola penurunan kadar Si yang serupa juga teramati pada suhu peleburan 725°C dan 800°C, dengan kadar Si terendah umumnya diperoleh pada penambahan Ca sebesar 7%.



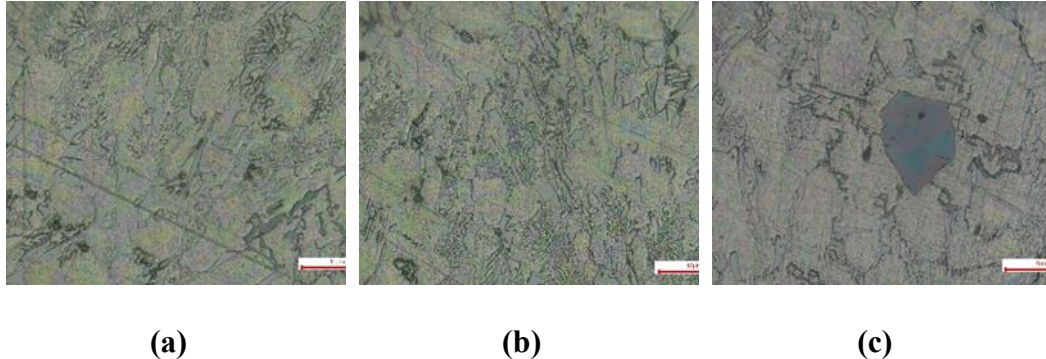
Gambar 4.1 Grafik Tren Penurunan Kadar Si

Temuan ini menunjukkan bahwa variasi penambahan Ca dan suhu peleburan memengaruhi komposisi kimia paduan Al–Si hasil *remelting*. Analisis lebih lanjut mengenai mekanisme penurunan kadar Si dan pengaruh suhu peleburan akan dibahas pada bagian pembahasan grafik hasil uji mekanik.

4.3 Mikrostruktur Hasil

Pengamatan struktur mikro menggunakan *Optical Microscopy* dilakukan untuk mengevaluasi perubahan morfologi eutektik Si akibat penambahan Ca dan variasi suhu peleburan. Pada paduan Al–Si tanpa modifikasi, eutektik Si umumnya berbentuk jarum atau platelet yang tajam dan memanjang di dalam matriks α -Al. Proses pengamatan dengan *Optical Microscopy* ini dilakukan pada perbesaran 200x. Hasil pengamatan dengan *Optical Microscopy* akan ditampilkan pada gambar

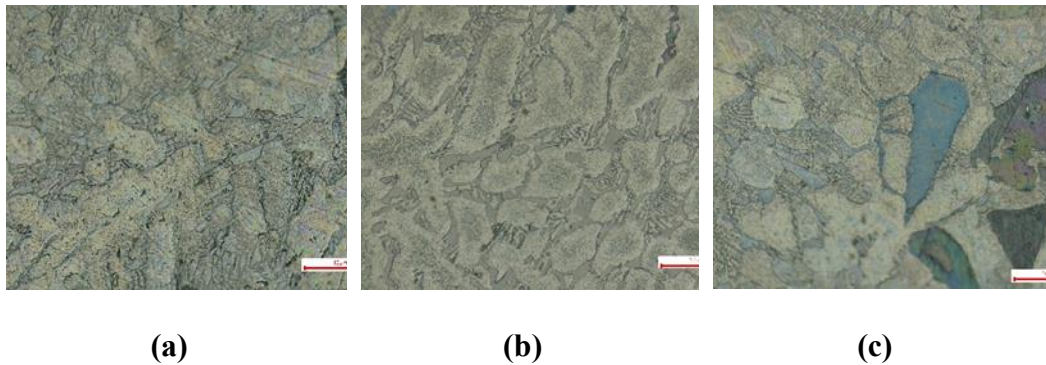
dibawah ini



Gambar 4.2 Struktur Mikro Penambahan Ca 5wt% pada Suhu 650°C (a), 725°C (b) dan 800°C (c)

Berdasarkan Gambar 4.2 (a), struktur mikro paduan Al-Si dengan penambahan Ca 5 wt% pada suhu peleburan 650°C masih didominasi oleh fasa eutektik Si yang berbentuk jarum atau platelet dengan ukuran relatif panjang dan distribusi yang belum merata dalam matriks aluminium. Pada peningkatan suhu peleburan hingga 725°C, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.2 (b), morfologi eutektik Si mulai mengalami perubahan menjadi lebih pendek dan tidak beraturan, meskipun distribusinya masih belum homogen sepenuhnya.

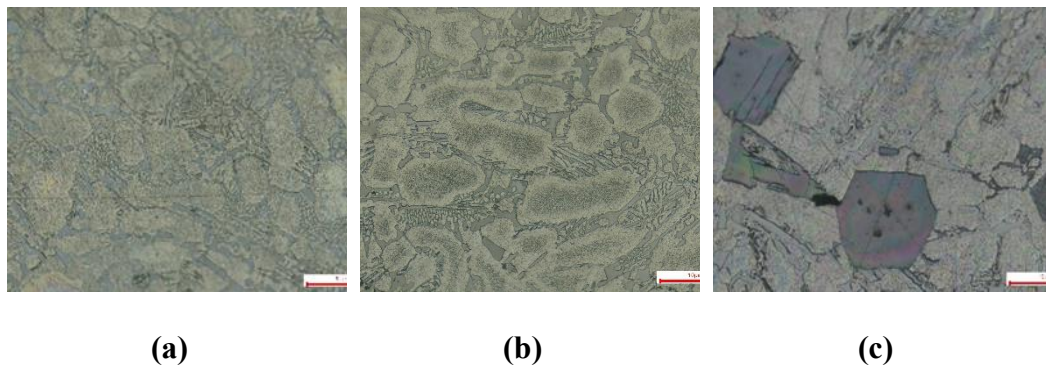
Pada suhu peleburan 800°C (Gambar 4.2 (c)), fragmentasi fasa eutektik Si terlihat lebih jelas, dengan ukuran partikel yang cenderung lebih halus dan bentuk yang lebih tidak beraturan dibandingkan pada suhu peleburan yang lebih rendah. Namun demikian, pada seluruh variasi suhu peleburan, masih teramati adanya ketidakhomogenan distribusi fasa eutektik Si dalam matriks aluminium pada penambahan Ca sebesar 5 wt%.



Gambar 4.3 Struktur Mikro Penambahan Ca 7wt% pada Suhu 650°C (a), 725°C (b) dan 800°C (c)

Gambar 4.3 (a), (b), dan (c) masing-masing menunjukkan struktur mikro paduan Al–Si dengan penambahan Ca sebesar 7 wt% pada suhu peleburan 650°C, 725°C, dan 800°C. Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk melihat perubahan morfologi dan distribusi fasa eutektik Si akibat variasi suhu peleburan pada kadar Ca yang sama.

Berdasarkan Gambar 4.3 (a), pada suhu peleburan 650°C, fasa eutektik Si tampak mengalami fragmentasi lebih merata dibandingkan dengan penambahan Ca 5 wt%, dengan ukuran partikel yang relatif lebih pendek dan distribusi yang lebih seragam dalam matriks aluminium. Pada peningkatan suhu peleburan hingga 725°C (Gambar 4.3 (b)), morfologi eutektik Si semakin berubah menjadi lebih halus dan cenderung berbentuk granular, tingkat homogenitas distribusi yang lebih baik. Pada suhu peleburan 800°C (Gambar 4.3 (c)), fasa eutektik Si terlihat semakin halus dan terdistribusi lebih homogen dalam matriks aluminium dibandingkan dengan suhu peleburan yang lebih rendah. Secara umum, pada penambahan Ca sebesar 7 wt%, perubahan morfologi eutektik Si teramati lebih jelas pada seluruh variasi suhu peleburan dibandingkan dengan penambahan Ca 5 wt%.



Gambar 4.4 Struktur Mikro pada Penambahan Ca 9wt% pada Suhu 650°C (a), 725°C (b), dan 800°C (c)

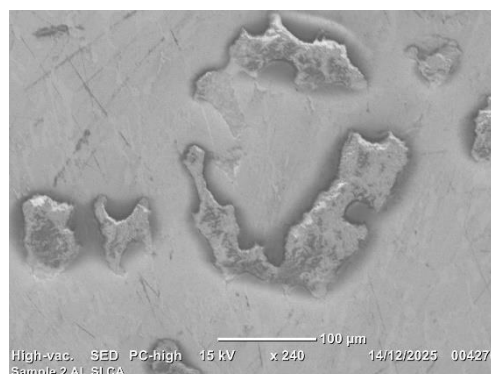
Gambar 4.4 (a), (b), dan (c) masing-masing menunjukkan struktur mikro paduan Al–Si dengan penambahan Ca sebesar 9 wt% pada suhu peleburan 650°C, 725°C, dan 800°C. Pengamatan ini dilakukan untuk mengamati perubahan morfologi dan distribusi fasa eutektik Si pada kadar Ca yang lebih tinggi dengan variasi suhu peleburan.

Berdasarkan Gambar 4.4 (a), pada suhu peleburan 650°C, struktur mikro masih menunjukkan keberadaan fasa eutektik Si dengan morfologi memanjang dan distribusi yang belum merata dalam matriks aluminium. Pada peningkatan suhu peleburan hingga 725°C (Gambar 4.4 (b)), perubahan morfologi fasa Si mulai terlihat, dengan sebagian fasa eutektik mengalami fragmentasi, namun masih dijumpai partikel-partikel dengan ukuran relatif lebih besar. Pada suhu peleburan 800°C (Gambar 4.4 (c)), struktur mikro menunjukkan keberadaan partikel-partikel dengan ukuran relatif lebih besar dan distribusi yang tidak merata dalam matriks aluminium. Kondisi ini mengindikasikan meningkatnya ketidakhomogenan struktur mikro pada penambahan Ca sebesar 9 wt% dibandingkan dengan kadar Ca yang lebih rendah, khususnya pada suhu peleburan yang lebih tinggi.

Pengamatan struktur mikro dengan *Optical Microscopy* (OM) menunjukkan bahwa penambahan kalsium pada paduan Al–Si di suhu 650°C, 725°C, dan 800°C menyebabkan perubahan morfologi fasa eutektik silikon (Si). Pada suhu 650°C, struktur mikro menunjukkan adanya fasa eutektik Si yang berbentuk jarum panjang, yang berubah menjadi lebih halus dan granular pada suhu lebih tinggi [6]. Peningkatan suhu peleburan meningkatkan efektivitas reaksi Ca–Si, yang mempengaruhi distribusi dan ukuran partikel *silicon* [20].

4.4 Hasil SEM-EDX

Analisis SEM–EDX dilakukan untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang terdeteksi secara lokal pada area tertentu dari paduan Al–Si hasil peleburan dengan penambahan Ca. Pengujian ini bersifat lokal dan merepresentasikan komposisi unsur pada titik analisis yang dipilih. Citra SEM serta spektrum EDX untuk paduan Al–Si dengan penambahan Ca sebesar 5 wt% pada suhu peleburan 800°C ditunjukkan pada Gambar 4.5, sedangkan hasil kuantifikasi unsur disajikan pada Tabel 4.5.



Gambar 4.5 SEM-EDX pada Penambahan 5% Ca dan 800°C

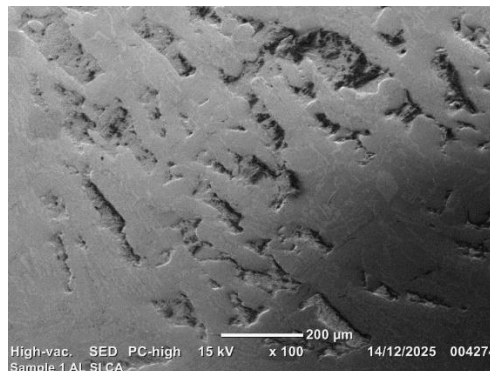
Analisis SEM-EDX yang dilakukan di dapatkan hasil dua jenis yaitu citra SEM-EDX dan kuantifikasi unsur pada titik analisis yang dipilih. Citra SEM digunakan untuk menjelaskan pada titik mana SEM-EDX dilakukan sehingga dapat dibandingkan dengan hasil citra mikroskop optik yang telah dibahas pada bagian mikrostuktur hasil khususnya pada mikroskop optik yang dapat menjelaskan pada hasil pengujian mekanik yang ditemukan. Lalu kuantifikasi unsur dapat digunakan untuk mengetahui unsur yang ditemukan pada titik lokal yang diuji, dengan temuan temuan ini diharapkan dapat memperjelas temuan hasil dan memperkuat dalam membahas hasil yang ditemukan.

Tabel 4.5 Hasil SEM-EDX pada Penambahan 5% Ca dan 800°C

<i>Fitting Coefficient: 0,8224</i>				TOTAL
Element	Al K	Si K	Ca K	
(keV)	1,486	1,739	3,690	
Mass%	95,84	3,98	0,19	100,00
Sigma	3,90	2,38	0,89	
Atom%	96,04	3,83	0,13	100,00
Compound				
Mass%				
Cation				
K	98,1653	1,6559	0,1788	

Berdasarkan hasil analisis EDX pada Tabel 4.5, unsur aluminium (Al) terdeteksi sebagai unsur dominan pada area analisis, dengan kandungan massa sebesar 95,84 wt%. Unsur silikon (Si) terdeteksi dalam jumlah yang relatif lebih rendah, yaitu sebesar 3,98 wt%, sementara unsur kalsium (Ca) terdeteksi dalam jumlah sangat kecil, yaitu sekitar 0,19 wt%. Selain unsur Al, Si, dan Ca, pada spektrum EDX juga teramati puncak untuk unsur karbon (C) dan oksigen (O), yang menunjukkan keberadaan unsur ringan pada permukaan sampel.

Keberadaan unsur C dan O pada spektrum EDX mengindikasikan adanya unsur tambahan selain unsur utama paduan pada area analisis. Unsur-unsur tersebut terdeteksi secara lokal dan dapat berkaitan dengan kondisi permukaan sampel maupun proses preparasi untuk pengujian SEM-EDX.



Gambar 4.6 SEM-EDX pada Penambahan 7% Ca dan 800°C

Analisis SEM-EDX dilakukan untuk mendukung hipotesa dan temuan hasil mikrostruktur khususnya keberadaan fasa Ca pada struktur mikro hasil dimana keberadaan Ca dapat dikonfirmasi dengan hasil SEM-EDX kuantifikasi unsur pada titik uji. Analisa SEM -EDX juga bersifat lokal guna mendukung temuan pada mikrostruktur sehingga memperkuat implikasi hasil dari reaksi yang terjadi.

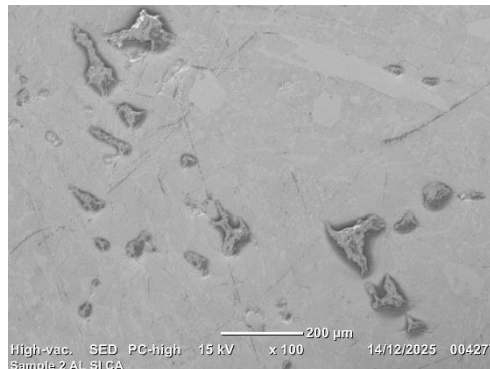
Tabel 4.6 Hasil SEM-EDX pada Penambahan 7% Ca dan 800°C

<i>Fitting Coefficient: 0,8224</i>				TOTAL
Element	Al K	Si K	Ca K	
(keV)	1,486	1,739	3,690	
Mass%	99,04	0,67	0,29	100,00
Sigma	2,67	1,01	0,35	
Atom%	99,16	0,65	0,19	100,00
Compound				
Mass%				
Cation				
K	99,4609	0,2679	0,2712	

Citra SEM dan spektrum EDX untuk paduan Al–Si dengan penambahan Ca sebesar 7 wt% pada suhu peleburan 800°C ditunjukkan pada Gambar 4.5, sedangkan hasil kuantifikasi unsur pada titik analisis disajikan pada Tabel 4.6. Analisis SEM–EDX ini bersifat lokal dan merepresentasikan komposisi unsur pada area permukaan yang dianalisis. Pembahasan hasil analisis lebih lanjut akan dibahas pada grafik pengaruh variasi terhadap sifat mekanik paduan hasil pengecoran.

Berdasarkan hasil analisis EDX pada Tabel 4.6, unsur aluminium (Al) terdeteksi sebagai unsur dominan dengan kandungan massa sebesar 99,04 wt%. Kandungan silikon (Si) terdeteksi dalam jumlah yang sangat rendah, yaitu sebesar

0,67 wt%, sedangkan unsur kalsium (Ca) terdeteksi sebesar 0,29 wt%. Nilai ini menunjukkan bahwa Ca terdeteksi dalam jumlah kecil pada area analisis dibandingkan dengan unsur utama paduan. Selain unsur Al, Si, dan Ca, pada spektrum EDX juga teramati puncak unsur karbon (C) dan oksigen (O).



Gambar 4.7 SEM-EDX Pada Penambahan 9%Ca dan 800°C

Pada penambahan Ca 9 wt%, hasil SEM–EDX menunjukkan bahwa Ca terdeteksi lebih tinggi pada area-area tertentu, sementara distribusinya menjadi kurang homogen. Kondisi ini mengindikasikan terjadinya kejenuhan reaksi Ca–Si, di mana Ca berlebih tidak seluruhnya bereaksi dengan Si dan cenderung membentuk sisa fasa intermetalik atau bereaksi dengan oksigen membentuk oksida Ca. Keberadaan unsur O yang relatif tinggi pada spektrum EDX mendukung indikasi terbentuknya produk oksidasi Ca, sedangkan unsur C kembali diasosiasikan dengan efek permukaan dan preparasi spesimen. Partikel-partikel hasil reaksi yang berukuran relatif besar dan terdistribusi tidak merata berpotensi menurunkan homogenitas struktur mikro serta menjadi titik awal konsentrasi tegangan.

Tabel 4.7 Hasil SEM-EDX pada Penambahan 9% Ca dan 800°C

<i>Fitting Coefficient : 0,8224</i>				TOTAL
Element	Al K	Si K	Ca K	
(keV)	1,486	1,739	3,690	
Mass%	93,96	4,24	1,80	100,00
Sigma	3,18	1,79	0,73	
Atom%	94,68	4,10	1,22	100,00
Compound				
Mass%				
Cation				
K	96,4836	1,8045	1,7569	

Hasil ini konsisten dengan pengamatan OM yang menunjukkan bahwa meskipun eutektik Si mengalami fragmentasi, peningkatan kadar Ca hingga 9 wt% tidak memberikan perbaikan struktur mikro yang signifikan dibandingkan Ca 7 wt%. Dengan demikian, Ca pada kadar tinggi cenderung berperan sebagai unsur reaktif yang membentuk inklusi non-logam, bukan sebagai agen modifikasi struktur mikro yang efektif.

4.5 Hasil Pengujian Mekanik

Uji mekanik merupakan serangkaian pengujian yang mengukur sifat dan kelakuan mekanik dari suatu material atau bahan dengan pengujian mekanik. Dimana perlu diketahui harga-batas yang dapat ditahan suatu material tanpa

mengalami kerusakan (*failure*) [21]. Dengan pengujian mekanik ini dapat dianalisa sifat mekanis dari material uji dengan mempertimbangkan bahwa tiap tiap pengujian mekanis yang lazim, bukan bertolak dari sudut pandangan Teknik pengujian yang biasa, melainkan dari pertimbangan tentang apa yang diungkapkan oleh pengujian -pengujian ini mengenai mampu guna (*service performance*) dan bagaimana perubahan-perubahan metalurgi seperti mikrostruktur dan komposisi mempengaruhi hasil pengujian [21]. Dengan melaksanakan pengujian mekanik ini dapat dianalisa karakteristik dasar material seperti kekuatan tarik maksimum, regangan, serta perilaku material ketika menerima gaya atau beban aksial. Pada penelitian ini pengujian Tarik dilakukan pada spesimen hasil proses pengecoran atau *remelting* velg bekas dengan komposisi awal seperti pada Tabel 4.1 yang dimodifikasi dengan variasi penambahan Ca 5%,7% dan 9%. Penambahan Ca bertujuan untuk memodifikasi material dengan merubah komposisi serta memperbaiki struktur mikro untuk meningkatkan sifat mekanik material dengan komposisi hasil modifikasi, khususnya dalam hal kekuatan dan ketahanan material terhadap deformasi. Kekuatan material dapat dinilai sebagai acuan hasil dalam mengetahui pengaruh penambahan Ca terhadap perubahan morfologi struktur mikro yang menjelaskan nilai kekuatan material

Data hasil pengujian mekanis yang telah diperoleh dari seluruh rangkaian proses akan disajikan pada Tabel 4.8 dibawah ini, yang akan menampilkan nilai-nilai parameter mekanik sesuai prosedur pengujian yang berlaku. Hasil dibawah ini akan menjadi acuan dalam menganalisa pengaruh penambahan Ca terhadap penurunan kadar Si dan pengaruhnya pada sifat mekanis material.

Tabel 4.8 Hasil Uji Mekanik

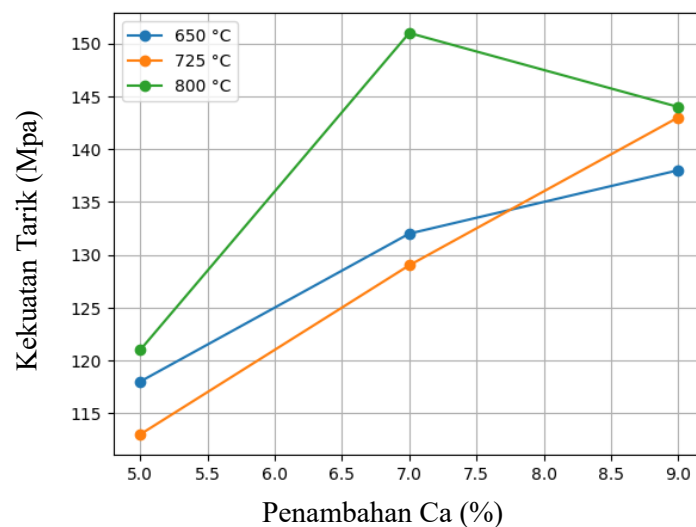
Penambahan Ca	Suhu Peleburan	Kekuatan Tarik (Mpa)	%Elongasi	Kekerasan (HVN)
5% Ca addition	650°C	118	2,0	39
7% Ca addition		132	1,8	65
9% Ca addition		138	1,2	74
5% Ca addition	725°C	113	1,7	48
7% Ca addition		129	1,6	89
9% Ca addition		143	1,0	87
5% Ca addition	800°C	121	1,9	91
7% Ca addition		151	1,1	103
9% Ca addition		144	1,0	88

Hasil uji tarik menunjukkan bahwa peningkatan kadar Ca dan suhu peleburan cenderung meningkatkan kekuatan tarik paduan Al–Si hingga kondisi tertentu. Pada suhu 650°C dan 725°C, kekuatan tarik meningkat seiring dengan bertambahnya Ca, namun diikuti oleh penurunan nilai elongasi. Pada suhu 800°C, kekuatan tarik maksimum diperoleh pada penambahan Ca 7 wt%, dengan nilai mencapai 151 MPa. Pada kondisi ini, struktur mikro menunjukkan eutektik Si yang halus dan distribusi fasa yang relatif homogen. Namun, pada penambahan Ca 9 wt%, meskipun kadar Si lebih rendah, kekuatan tarik menurun. Hal ini dapat terkait dengan perubahan struktur mikro yang terjadi pada penambahan Ca lebih tinggi.

Hasil uji kekerasan menunjukkan tren yang sejalan dengan uji tarik, di mana

nilai kekerasan meningkat hingga kondisi optimum pada penambahan Ca 7 wt% dan suhu 800°C, kemudian menurun pada penambahan Ca yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat kombinasi parameter proses yang optimum untuk memperoleh keseimbangan antara kekuatan dan keuletan material. Keseimbangan parameter proses yang optimum sehingga dapat memperoleh keseimbangan antara kekuatan dan keuletan material dipengaruhi oleh *properties* dari material itu sendiri yang akan dibahas lebih lanjut pada bagian selanjutnya.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan Ca efektif dalam menurunkan kadar Si dan memodifikasi struktur mikro paduan Al–Si, dengan kondisi optimum diperoleh pada penambahan Ca 7 wt% dan suhu peleburan 800°C.



Gambar 4.8 Grafik Pengaruh Penambahan Ca Terhadap Kekuatan Tarik

Berdasarkan Gambar 4.8, kekuatan tarik paduan Al–Si menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan penambahan Ca pada seluruh variasi suhu peleburan, dengan nilai maksimum dicapai pada penambahan Ca sebesar 7

wt% pada suhu 800°C. Kondisi ini menunjukkan bahwa kombinasi kadar Ca dan suhu peleburan memiliki peran penting dalam mengendalikan sifat mekanik paduan melalui perubahan struktur mikro dan komposisi efektif silikon di dalam matriks aluminium.

Peningkatan kekuatan tarik pada penambahan Ca hingga 7 wt% berkorelasi dengan hasil pengamatan struktur mikro dan analisis SEM–EDX yang menunjukkan fragmentasi eutektik Si serta distribusi fasa yang lebih homogen. Seperti dibahas dalam Bab II, eutektik Si berbentuk jarum atau platelet bertindak sebagai konsentrator tegangan yang mempercepat inisiasi retak pada paduan Al–Si. Modifikasi morfologi eutektik Si menjadi lebih halus dan tidak beraturan berkontribusi terhadap penurunan konsentrasi tegangan lokal serta peningkatan ketahanan deformasi plastis. Mekanisme ini konsisten dengan temuan Jiao et al. yang melaporkan bahwa penambahan Ca mampu mengubah morfologi eutektik Si dari flake menjadi fibrous, yang berdampak positif terhadap sifat mekanik paduan Al–Si[6]

Pada suhu peleburan 800°C, kinetika reaksi antara Ca dan Si berlangsung lebih intensif akibat meningkatnya difusivitas unsur dan homogenitas lelehan. Hal ini memungkinkan Ca berperan lebih efektif sebagai unsur reaktif yang mengikat Si berlebih, sebagaimana ditunjukkan oleh penurunan kadar Si hasil uji komposisi dan SEM–EDX. Temuan ini sejalan dengan teori modifikasi struktur paduan Al–Si, di mana suhu peleburan yang lebih tinggi meningkatkan peluang terbentuknya produk reaksi Ca–Si dan mempercepat proses pemisahan fasa yang tidak diinginkan dari matriks aluminium [5]

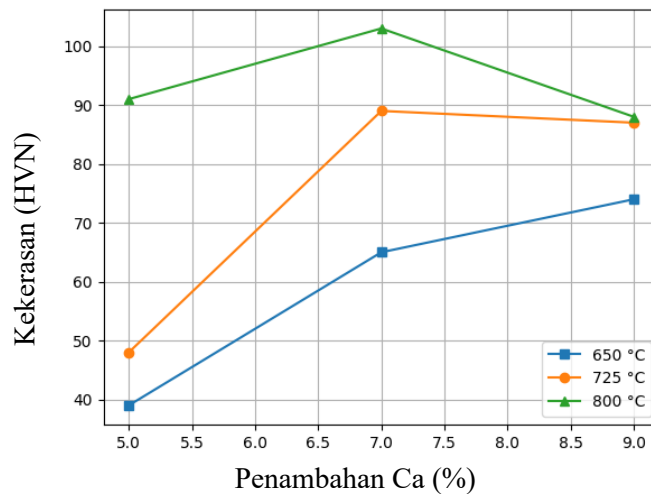
Namun demikian, pada penambahan Ca sebesar 9 wt% pada suhu yang sama (800°C), kekuatan tarik justru mengalami penurunan dibandingkan variasi 7 wt%. Fenomena ini mengindikasikan bahwa penambahan Ca yang berlebihan tidak selalu menghasilkan peningkatan sifat mekanik. Ca memiliki afinitas yang sangat tinggi terhadap oksigen dan cenderung membentuk senyawa oksida yang stabil, terutama pada suhu tinggi. Keberadaan oksida dan inklusi non-logam tersebut berpotensi memicu porositas atau ketidakhomogenan struktur mikro, yang berdampak negatif terhadap kekuatan tarik material. Hal ini konsisten dengan laporan Campbell serta Caceres dan Selling yang menyatakan bahwa inklusi oksida dan porositas merupakan faktor utama penurunan sifat mekanik pada paduan aluminium cor [6][9]

Pada variasi suhu peleburan 725°C , kekuatan tarik menunjukkan tren peningkatan yang relatif konsisten dengan bertambahnya kadar Ca, meskipun nilai maksimumnya masih lebih rendah dibandingkan suhu 800°C . Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada suhu 725°C , reaksi Ca–Si telah berlangsung, tetapi belum mencapai kondisi optimum. Ca mulai bereaksi dengan Si bebas dalam lelehan, namun keterbatasan energi termal menyebabkan efektivitas reaksi dan modifikasi struktur mikro belum maksimal. Fenomena ini sejalan dengan konsep undercooling dan keterbatasan kinetika reaksi pada suhu menengah, sebagaimana dilaporkan dalam studi-studi terdahulu mengenai modifikasi paduan Al–Si dengan unsur reaktif [5][11]

Sementara itu, pada suhu peleburan 650°C , peningkatan kekuatan tarik masih teramati hingga mencapai nilai optimum pada penambahan Ca 7 wt%. Meskipun

suhu ini berada jauh di bawah titik leleh Ca murni, hasil penelitian menunjukkan bahwa Ca tetap mampu bereaksi secara terbatas dengan Si dalam lelehan Al–Si. Namun, efektivitas reaksi tersebut relatif lebih rendah dibandingkan suhu yang lebih tinggi, yang tercermin dari struktur mikro eutektik Si yang masih cenderung memanjang dan belum terdistribusi secara homogen. Kondisi ini menyebabkan peningkatan kekuatan tarik yang terbatas dan menegaskan bahwa suhu peleburan merupakan parameter kunci dalam mengoptimalkan peran Ca sebagai unsur modifikator dan pemurni paduan.

Secara keseluruhan, hasil pengujian mekanik yang dikorelasikan dengan analisis struktur mikro dan SEM–EDX menunjukkan bahwa penambahan Ca sebesar 7 wt% pada suhu peleburan 800°C merupakan kondisi optimum untuk meningkatkan kekuatan tarik paduan Al–Si dalam penelitian ini. Pada kondisi tersebut, Ca berfungsi secara efektif sebagai unsur reaktif yang mengurangi kadar Si berlebih dan memodifikasi morfologi eutektik Si tanpa menimbulkan efek negatif yang signifikan akibat oksidasi atau inklusi. Temuan ini menegaskan bahwa kontrol kadar Ca dan suhu proses sangat krusial dalam pengolahan paduan Al–Si berbasis daur ulang untuk memperoleh kombinasi sifat mekanik yang optimal, khususnya untuk aplikasi struktural di bidang otomotif dan manufaktur. Dengan mengetahui nilai tarik maksimum atau *Ultimate Tensile Strength* dan tren peningkatan nilai kekuatan tarik yang dapat disertai dengan penurunan %elongasi atau penambahan panjang material sebelum terdeformasi penggunaan material hasil pemanfaatan limbah dapat lebih tepat sasaran dan meningkatkan peningkatan pemanfaatan material daur ulang.



Gambar 4.9 Pengaruh Penambahan Ca terhadap Kekerasan

Berdasarkan Gambar 4.9, nilai kekerasan paduan Al–Si dipengaruhi secara signifikan oleh variasi kadar Ca dan suhu peleburan. Secara umum, peningkatan kadar Ca hingga batas tertentu serta kenaikan suhu peleburan cenderung meningkatkan nilai kekerasan material. Fenomena ini menunjukkan bahwa Ca berperan sebagai unsur reaktif yang memodifikasi struktur mikro paduan, khususnya morfologi dan distribusi eutektik Si, yang selanjutnya memengaruhi mekanisme pengerasan paduan Al–Si.

Pada suhu peleburan 650°C, nilai kekerasan meningkat seiring dengan penambahan Ca dari 5 wt% hingga 9 wt%, yaitu dari 39 HVN menjadi 74 HVN. Peningkatan ini berkaitan dengan peran fasa Si sebagai fasa keras dalam paduan Al–Si. Distribusi fasa Si yang lebih halus dan merata di dalam matriks α -Al meningkatkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi, sehingga meningkatkan kekerasan material. Namun demikian, pada suhu ini efektivitas Ca masih relatif terbatas karena kinetika reaksi Ca–Si belum berlangsung secara optimal.

Pada suhu peleburan 725°C, peningkatan nilai kekerasan terlihat lebih signifikan dibandingkan suhu 650°C. Nilai kekerasan meningkat dari 48 HVN pada penambahan Ca 5 wt% menjadi 89 HVN pada 7 wt% Ca, kemudian sedikit menurun menjadi 87 HVN pada 9 wt% Ca. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada suhu menengah, Ca mulai berperan lebih efektif dalam memodifikasi eutektik Si dan meningkatkan homogenitas struktur mikro. Tren ini konsisten dengan mekanisme modifikasi eutektik Si oleh unsur Ca yang menyebabkan perubahan morfologi Si dari bentuk flake atau platelet menjadi lebih halus dan tidak beraturan, sebagaimana dilaporkan oleh Jiao *et al.* pada paduan Al–Si hipoeutektik [6]

Pada suhu peleburan 800°C, nilai kekerasan mencapai nilai tertinggi dibandingkan variasi suhu lainnya. Kekerasan meningkat dari 91 HVN pada penambahan Ca 5 wt% menjadi maksimum 103 HVN pada 7 wt% Ca, kemudian menurun menjadi 88 HVN pada 9 wt% Ca. Peningkatan suhu peleburan mempercepat difusi unsur dan kinetika reaksi Ca–Si, sehingga menghasilkan struktur mikro dengan eutektik Si yang sangat halus dan terdistribusi homogen. Namun, pada penambahan Ca yang berlebihan, kecenderungan Ca untuk bereaksi dengan oksigen meningkat, membentuk inklusi oksida atau fasa kaya Ca yang tersegregasi dalam matriks. Keberadaan inklusi non-logam tersebut menurunkan homogenitas struktur mikro dan dapat membatasi peningkatan sifat mekanik makro, sebagaimana dilaporkan pada studi-studi pengecoran aluminium terkait pengaruh inklusi oksida terhadap kekerasan dan kekuatan material [5]