

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium

Selama ledakan besar atau kerap dikenal *big bang* sebuah bintang yang meledak sebagai supernova di wilayah luar galaksi kita, alumina terbentuk bersama dengan unsur – unsur berat lainnya yang oleh para ahli astronom disebut *metals* atau logam. Puing-puing ledakan tersebut membentuk tata surya kita. Pada suatu tahap dalam pembentukan planet kita, logam-logam berat seperti besi berkonsentrasi di pusat bumi, sementara unsur-unsur yang lebih ringan seperti magnesium dan aluminium, membentuk pada kerak bumi. Aluminium telah bereaksi dengan silikon dan oksigen, dan senyawa kimia ini membentuk dasar sebagian besar batu batuan di Bumi [1].

Aluminium merupakan logam paling umum yang ditemukan pada kerak bumi dan karena itu menyediakan *raw material* yang hampir tidak ada habisnya. Aluminium pula merupakan elemen paling umum ketiga setelah oksigen dan silikon dengan jumlah sampai dengan 8% di kerak benua dan sampai dengan 6,8% di seluruh kerak bumi. Akan tetapi aluminium merupakan logam yang masih sangat “muda”, penggunaan secara industri baru menggunakan aluminium selama kurang lebih 120 tahun yang lalu. Meskipun begitu kehidupan modern tidak dapat dibayangkan tanpa aluminium, bagaimana transportasi udara atau teknologi luar angkasa bisa terealisasikan tanpa aluminium. Label kecil pada *Pioneer 10 space*

probe terbuat dari aluminium dan mungkin dapat memberi informasi kepada bentuk kehidupan cerdas lainnya yang mungkin ditemukan di luar angkasa suatu saat nanti tentang umat manusia di planet biru kita.

Tabel 2.1 Unsur Pada Bumi [1]

<i>Occurence in %</i>		
<i>Elements</i>	<i>Total Earth</i>	<i>Earth Crust</i>
Lain-Lain	<1	<1
Aluminium	1,1	8,0
Ca	1,1	2,4
Na	<1	2,1
K	<1	2,3
S	1,9	<1
Ni	2,4	<1
Mg	13,0	4,0
Si	15,0	28,0
O	30,0	46,0
Fe	35,0	6,0

Banyak pengaplikasian dari bermacam teknologi setidaknya akan sangat sulit tanpa aluminium. Dan mungkin terlihat seperti kebetulan bahwa teknologi hidup bersamaan dengan penggunaan aluminium pada lalu lintas udara dan darat, teknik sipil, pengemasan, *power transmission* dan berbagai teknologi yang membuat kehidupan menjadi lebih mudah. Meskipun penggunaan secara industri logam

aluminium baru digunakan 120 tahun yang lalu, manusia telah menggunakan aluminium ketika mereka mulai membuat tembikar/*pottery* sekitar 7000 tahun yang lalu. Tanah liat yang digunakan oleh nenek moyang kita pada dasarnya mengandung silikat aluminium dan magnesium [1]. Ini menandakan bahwa aluminium sudah ada dalam kehidupan manusia sejak ribuan tahun yang lalu, aluminium pula tidak ditemukan sebagai logam karena senyawa yang sangat stabil dengan oksigen dan silikon ini menyebabkan butuh waktu lama bagi manusia untuk menemukan cara mengekstrak aluminium dalam bentuk logam murni dan hal ini pula baru dipatenkan kurang lebih 150 tahun yang lalu dalam skala industri. Beberapa tahun sebelumnya, sejumlah kecil aluminium diperoleh dengan harga yang sangat tinggi dan karena alasan ini disebut “perak dari tanah liat”. Nilai ekonomis tidak diperoleh hingga tahun 1850, dimana produksi aluminium dalam skala besar pula baru dimulai pada abad ke 19 melalui berbagai eksperimen dan penemuan salah satunya ialah Robert Bunsen, yang berhasil melakukan pemisahan elektrolitik aluminium metalik. Di Prancis keponakan dari Napoleon III, Henry St. Claire Deville memulai produksi aluminium pertama dengan tujuan menghasilkan baju besi yang kuat namun ringan untuk para prajurit.

2.1.1 Aluminium

Aluminium adalah logam berwarna putih keperakan yang sangat baik dalam menghantarkan listrik. Susunan atomnya yang rapat membuatnya mudah dibentuk. Secara kimia, aluminium sangat reaktif dan mudah bereaksi dengan hidrogen, terutama dalam keadaan cair. Aluminium pula mempunyai kecenderungan yang kuat untuk membentuk senyawa aluminium oksida. Ia

mempunyai ketahanan terhadap korosi karena permukaannya membentuk kulit oksida yang sangat tipis. Lapisan ini melindungi aluminium dari udara dan zat kimia lainnya. Dimana kepadatan aluminium adalah $2,7 \text{ g/cm}^3$, titik leburnya 991 K dan titik didihnya adalah 2603 K.

Dengan densitas sekitar $2,7 \text{ g/cm}^3$, aluminium jauh lebih ringan dibandingkan baja yang memiliki densitas sekitar $7,8 \text{ g/cm}^3$ yang berarti hanya sepertiganya. Perbandingannya bahkan lebih baik dengan logam berat lainnya, hal ini menawarkan keuntungan besar dimana bobot yang ringan sangat penting contohnya pada sektor industri otomotif atau pada kendaraan dan komponen yang sering dipindahkan. Pengurangan massa selama akselerasi dan pergerakan peralatan yang dapat diangkut dapat menghasilkan kebutuhan energi yang lebih rendah. Dalam konstruksi, bobot konstruksi yang lebih ringan seringkali menghasilkan fondasi yang lebih ringan sehingga dapat mengurangi biaya ditambah dengan ketahanan yang baik terhadap cuaca dan korosi, semua ini menghasilkan biaya operasi dan pemeliharaan yang lebih rendah. Berat jenis yang rendah juga sangat penting untuk sektor dirgantara seperti pesawat terbang dan pesawat luar angkasa.

Dengan penggunaanya yang sangat variatif diberbagai sektor, berdasarkan standar internasional sendiri alumunium dan paduannya dibagi menjadi beberapa seri, dari seri 1 hingga seri 7 dengan pembagian pada tiap seri bergantung pada paduan Paduan unsur dan komposisinya dan juga termasuk dalam *wrought alloy* atau *cast alloy*. Berdasarkan *Alumunium Association* yang mengemukakan pertama kali sistem seri 1 hingga seri 7.

Berdasarkan jenisnya nomenklatur untuk alumunium dibagi berdasarkan jenisnya yaitu untuk *wrought alloy* dan *cast alloy*.

Tabel 2.2 Nomenklatur *Wrought Alumunium* [1]

Seri Alumunium	Jenis Paduan
Seri 1xxx	Alumunium murni
Seri 2xxx	Paduan Cu (Al-Cu)
Seri 3xxx	Paduan Mn (Al-Mn)
Seri 4xxx	Paduan Si (Al-Si)
Seri 5xxx	Paduan Mg (Al-Mg)
Seri 6xxx	Paduan Mg-Si (Al-Mg-Si)
Seri 7xxx	Paduan Zn juga dengan Cu (Al-Zn-Cu)

Tabel 2.3 Nomenklatur *Cast Alumunium* [1]

Seri Alumunium	Jenis Paduan
Seri 1xx.x	Umumnya alumunium hampir murni
Seri 2xx.x	Paduan Cu (Al-Cu)
Seri 3xx.x	Paduan Si atau Cu/Mg (Al-Si-(Cu/Mg))
Seri 4xx.x	Paduan Si (Al-Si)
Seri 5xx.xs	Paduan Mg (Al-Mg)
Seri 7xx.x	Paduan Mg

Salah satu dari *cast alumunium* yang cukup masif digunakan adalah Seri 3 yang diaplikasikan pada otomotif. Seri 3 diaplikasikan pada sektor otomotif umumnya pada bagian roda kendaraan yaitu velg. Velg merupakan salah satu komponen pada kendaraan yang berfungsi sebagai dudukan ban. Velg sendiri pada industri otomotif umumnya terbagi menjadi 2 jenis, *Steel velg* dan *Alloy velg*. Masing masing memiliki keunggulannya sendiri, akan tetapi perbedaan yang paling mencolok ialah beratnya. *Steel velg* lebih berat dibandingkan dengan *Alloy velg* yang dapat mempengaruhi berat total kendaraan hingga kelincahan dan akselerasi kendaraan, yang juga mempengaruhi penggunaan bahan bakar kendaraan. Berdasarkan kandungannya *Alloy velg* umumnya merupakan bentuk produk dari *cast alumunium* yang umumnya berada pada seri 3 yaitu paduan alumunium dengan kandungan silikon atau juga dengan magnesium atau dengan Cu atau dengan tambahan tembaga dengan proposional yang relatif kecil pada Mg dan Cu seperti sebagai contoh A356.0 yang pengaplikasiannya cukup umum pada sektor otomotif sebagai velg dimana berdasarkan standarnya A356.0 memiliki kandungan Paduan paling banyak yaitu Si dengan rentang pada 6,5-7,5% dan Mg 0,25-0,45%.

Secara fisik, aluminium memiliki densitas rendah, yang mendasari penggunaannya di dunia, yaitu ringan. Aluminium juga merupakan konduktor listrik dan panas yang sangat baik, dengan titik lebur relatif rendah yaitu 991 K, sehingga mudah dibentuk dan diaplikasikan. Secara mekanik, meskipun ringan, aluminium memiliki kekuatan yang cukup baik terutama ketika

dijadikan paduan dengan logam lainnya seperti tembaga, magnesium, dan silikon. Selain itu, secara mekanis aluminium juga mudah dibentuk melalui berbagai proses seperti ekstrusi, *rolling*, dan *forging*. Pengecoran aluminium memegang peran sentral dalam perkembangan industri modern. Dengan sifat unggulnya, aluminium telah menjadi bahan dasar yang tak tergantikan dalam berbagai sektor industri. Untuk memenuhi kebutuhan teknis, paduan aluminium dengan berbagai komposisi telah dikembangkan. Penambahan unsur-unsur seperti silikon, tembaga, mangan, seng, nikel, dan magnesium pada aluminium murni secara signifikan meningkatkan sifat mekaniknya, menjadikannya bahan konstruksi yang sangat fleksibel.

a. *Good Shapability*

fleksibilitas aluminium memungkinkan pembuatan berbagai bentuk yang rumit. Kemampuannya dibentuk menjadi lembaran tipis juga menjadikannya bahan yang serbaguna untuk berbagai keperluan.

b. *Good Machining Behaviour*

Aluminium mudah diproses menggunakan mesin. Paduan aluminium tertentu sangat cocok untuk produksi massal karena dapat dipotong dengan cepat.

c. *Good suitability for welding and adhesive linking*

Aluminium mudah dilas dan direkatkan dengan bahan lain. Teknik-teknik sambungan ini semakin banyak digunakan dalam berbagai industri. Hal ini sangat memperluas penggunaan

aluminium pada industri.

d. *Wide range of special surface treatment*

Permukaan aluminium dapat diproses dengan berbagai cara untuk menghasilkan tampilan yang menarik dan perlindungan yang baik.

e. *High electric conductivity*

Aluminium adalah penghantar listrik yang sangat baik. Sifat ini membuatnya ideal untuk digunakan dalam berbagai peralatan elektronik

f. *High Thermal Conductivity*

Aluminium sangat baik dalam menghantarkan panas. Sifat ini membuatnya sangat berguna dalam komponen mesin seperti piston dan silinder.

g. *Good Optical Characteristics*

Aluminium memiliki sifat optik yang baik, seperti kemampuan memantulkan cahaya. Permukaannya dapat diatur untuk berbagai keperluan optik.

Tabel 2.4 Karakteristik Aluminium Perbandingan Tembaga dan, Besi [1]

<i>Qualities</i>	<i>Unit</i>	<i>Aluminium</i>	<i>Copper</i>	<i>Steel</i>
		(Al 99,5)	(Cu)	(St 60-2)
<i>Tensile Strength</i> R _m	(N/mm ²)	360	500	650
<i>Tensile Strength</i> R _{0,2}	(N/mm ²)	320	430	520

Tabel 2.4 (Lanjutan)

<i>Qualities</i>	<i>Unit</i>	<i>Aluminium</i>	<i>Copper</i>	<i>Steel</i>
		(Al 99,5)	(Cu)	(St 60-2)
<i>Spec. Gravity</i>	(g/cm ³)	2,7	8,92	7,85
<i>Conductivity</i>	(m/Ωmm ²)	35	56	
<i>E-module</i>	(N/mm ²)	0,7*10 ⁵	1,2*10 ⁵	2,1*10 ⁵
<i>Melting Point</i>	°C	658	1083	1539

2.1.2 Scrap Aluminium

Aluminium bekas yang sudah tidak terpakai menjadi bahan baku utama untuk produksi aluminium baru. Aluminium bekas ini biasanya sudah tercampur dengan berbagai jenis kotoran, seperti logam lain (misalnya besi, tembaga) atau zat organik. Proses daur ulang aluminium membutuhkan tahap pemurnian untuk menghilangkan kontaminan-kontaminan tersebut sehingga aluminium dapat digunakan kembali. Aluminium yang dikumpulkan dalam bentuk dan jenis tertentu (misalnya, kaleng minuman, potongan aluminium murni) dapat langsung dilebur ulang tanpa perlu persiapan khusus. Bahan pengotor non-logam dalam jumlah tertentu masih bisa ditoleransi. Pabrik yang mengolah aluminium bekas jenis ini disebut pabrik peleburan ulang. Mereka biasanya terhubung dengan pabrik yang membuat produk dari aluminium, seperti pabrik pelat atau ekstrusi. Karena banyak pabrik yang memilih untuk mengolah sendiri aluminium bekasnya, maka jumlah aluminium bekas yang bersih dan siap pakai di pasaran menjadi berkurang.

Aluminium bekas dengan jenis yang beragam dan tidak tentu bisa digunakan untuk membuat berbagai jenis paduan aluminium. Namun, sebelum dilebur, aluminium bekas ini harus dimurnikan terlebih dahulu untuk menghilangkan kotoran. Hampir semua produk aluminium bisa didaur ulang berkali-kali. Proses daur ulang aluminium membutuhkan energi yang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan membuat aluminium baru dari bahan mentah dan menghasilkan emisi gas rumah kaca yang lebih rendah. Daur ulang aluminium adalah proses mengubah barang bekas berbahan aluminium menjadi produk aluminium baru. Proses ini lebih efisien dan ramah lingkungan dibandingkan dengan membuat aluminium baru dari awal.

2.2 Refining

Refining adalah proses pemurnian logam dari berbagai macam pengotor atau zat asing yang terkandung di dalamnya. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk meningkatkan kemurnian logam sehingga memiliki sifat fisik dan kimia yang diinginkan sesuai dengan penggunaannya. Dalam konteks industri, *refining* sangat penting karena logam murni memiliki sifat yang lebih baik dibandingkan dengan logam yang masih mengandung banyak pengotor. Dalam pemanfaatan limbah aluminium, proses *refining* sangat krusial. Limbah aluminium seringkali terkontaminasi oleh berbagai jenis logam lain seperti besi, tembaga, dan silikon. Adanya pengotor ini dapat menurunkan kualitas aluminium yang dihasilkan jika tidak dihilangkan. Dalam prosesnya *refining* atau pemurnian logam umumnya melalui beberapa tahapan salah satunya adalah peleburan ulang dan purifikasi terkhusus pada pengolahan limbah aluminium atau *recycling*.

2.2.1 *Remelting*

Remelting adalah proses peleburan ulang logam yang telah diproses atau diproduksi menjadi produk lain. Proses ini merupakan bagian penting dalam daur ulang logam dan memiliki beberapa tujuan utama.

a. Daur ulang logam

Dengan melebur ulang logam bekas atau *scrap*, kita dapat menghemat sumber daya alam dan mengurangi kebutuhan untuk menambang bijih baru.

b. Membuat Produk Baru

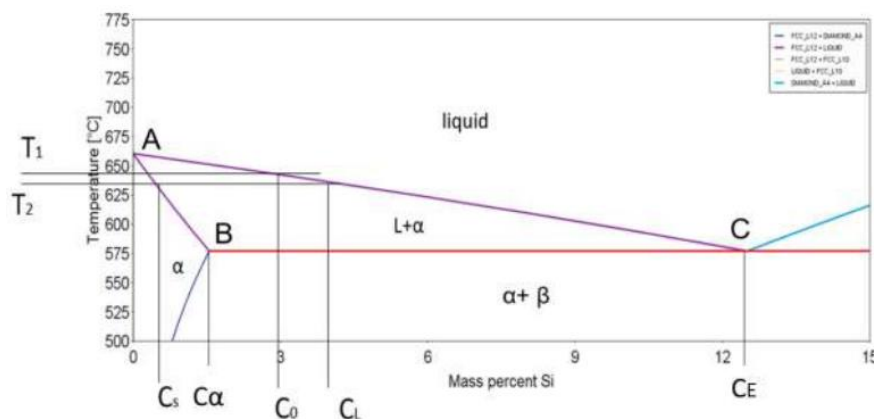
Logam hasil peleburan ulang dapat dicetak menjadi bentuk atau produk baru yang berbeda.

c. Meningkatkan kualitas logam

Proses *remelting* dapat digunakan untuk memurnikan logam dan menghilangkan *impurities* (pengotor), sehingga meningkatkan kualitas keseluruhan logam

Setelah *scrap* memasuki tungku, teknologi pemisahan fisik tidak dapat lagi diterapkan. Teknologi yang ditujukan untuk menghilangkan kotoran dari lelehan cukup lazim. Peleburan adalah proses metalurgi dan oleh karena itu diatur oleh hukum termodinamika. Penghapusan elemen yang tidak diinginkan dalam aliran *scrap* ditentukan oleh pertimbangan energi dari proses lelehan. Dalam kasus aluminium, penghalang termodinamika untuk menghilangkan sebagian besar elemen cukup besar [3]. Diagram fasa Al-Si menggambarkan hubungan antara komposisi silikon dan suhu terhadap

perubahan fasa pada paduan aluminium-silikon. Pada komposisi rendah, aluminium membentuk larutan padat α , sedangkan pada komposisi tinggi silikon membentuk larutan padat β . Kurva liquidus dan solidus menunjukkan batas pembekuan, dengan titik eutektik terjadi pada sekitar 12,6% Si dan suhu $\pm 577^\circ\text{C}$, di mana cairan berubah menjadi campuran α dan β secara bersamaan. Karakteristik eutektik ini penting karena menghasilkan struktur mikro yang memberikan sifat mekanik unggul, seperti ketahanan aus dan kemampuan tuang yang baik, sehingga paduan Al-Si banyak digunakan dalam industri pengecoran



Gambar 2.1 Diagram Fasa Al-Si [2]

Secara termodinamika, proses *remelting* pada daur ulang aluminium bukan sekadar pemanasan logam padat menjadi cair, tetapi juga merupakan perubahan fasa yang sangat tergantung pada parameter energi dan interaksi kimia dalam lelehan. Aluminium memiliki titik leleh relatif rendah ($\sim 660^\circ\text{C}$), namun sifatnya yang sangat reaktif terhadap oksigen menyebabkan banyak unsur pengotor sulit dihilangkan melalui perubahan energi sederhana selama peleburan. Analisis termodinamik yang mencakup perubahan energi bebas

Gibbs, koefisien aktivitas unsur dalam aluminium cair, serta tekanan parsial oksigen menunjukkan bahwa sebagian besar unsur pengotor tidak mudah dipisahkan dari fasa logam cair karena keterbatasan variasi kondisi proses yang dapat diterapkan tanpa menurunkan kualitas material atau meningkatkan pembentukan oksida yang merugikan. Hal ini berbeda dengan logam lain seperti besi atau tembaga, di mana pengontrolan suhu dan atmosfer bisa lebih efektif dalam mengubah keseimbangan fasa pengotor. Dengan kata lain, meskipun *remelting* menyediakan energi yang cukup untuk mencairkan aluminium, batas termodinamika tertentu membatasi kemampuan untuk menghilangkan banyak unsur *tramp* selama peleburan, sehingga perlu pendekatan tambahan seperti pengendalian kandungan oksigen, penggunaan fluks, atau pengolahan awal *scrap* untuk meminimalkan kontaminasi sebelum peleburan. Studi sebelumnya yang melakukan evaluasi parameter termodinamika pada *remelting* aluminium menunjukkan bahwa hanya sebagian kecil unsur seperti magnesium (Mg) dan seng (Zn) yang dapat dihilangkan ke fasa slag atau gas melalui reaksi yang termodinamika menguntungkan, sementara unsur lain cenderung tetap terlarut dalam logam cair karena energi bebas Gibbs mereka yang kurang menguntungkan pada kondisi proses aluminium *recycling*. Kondisi ini menegaskan bahwa efisiensi *remelting* aluminium sangat dipengaruhi oleh sifat termodinamika logam dan impuritasnya, serta bahwa strategi pengendalian komposisi *scrap* adalah aspek penting dalam mengoptimalkan *remelting* sebagai proses pemurnian[7]

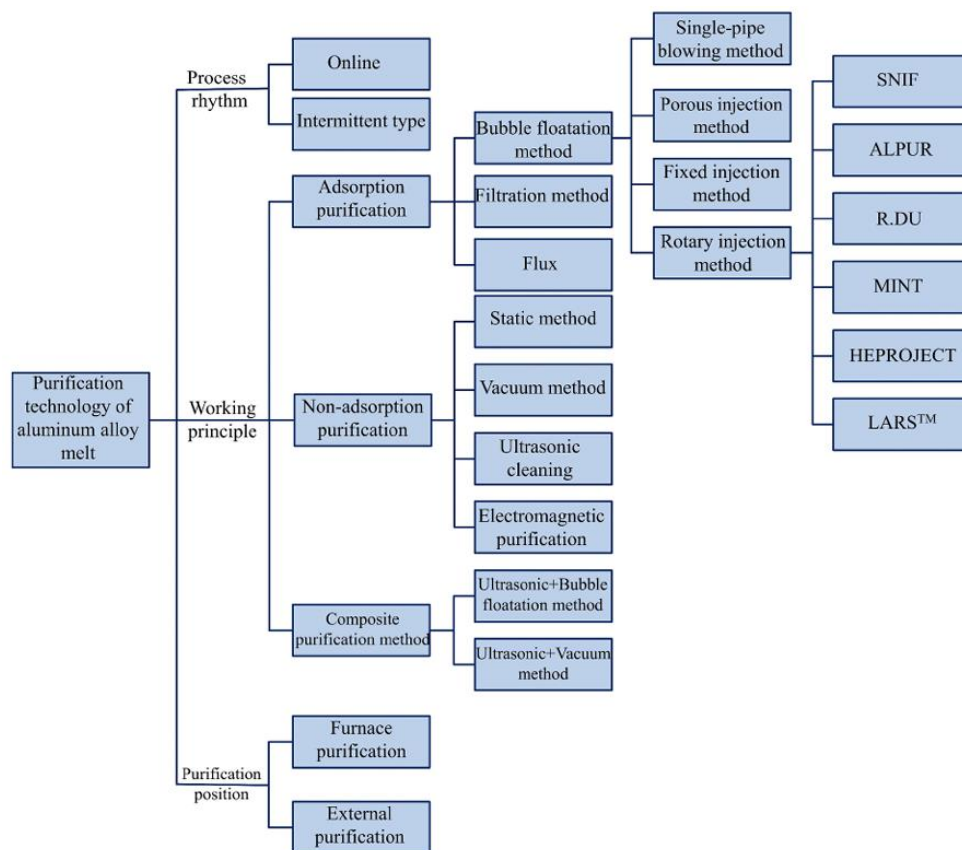
Proses *remelting* sendiri umumnya terdiri dari pengumpulan bahan yang dimana logam bekas atau *scrap* dan disiapkan untuk proses peleburan kemudian dilakukan peleburan dimana logam yang telah disiapkan kemudian dilebur dalam tungku khusus pada suhu tinggi pada aluminium umumnya suhu bisa mencapai 750°C. Setelah dilebur umumnya logam cair akan dituangkan dicetak untuk membentuk produk yang diinginkan yang kemudian akan didinginkan.

Remelting ini sendiri mempunyai beberapa keuntungan dalam pelaksanaannya. *Remelting* ini memberikan keuntungan yaitu ramah lingkungan dengan mengurangi limbah seperti limbah *velg* dan emisi gas rumah kaca selain ramah lingkungan efisiensi energi juga merupakan salah satu keuntungan dari *remelting* juga biaya yang efektif dimana harga logam bekas biasanya lebih murah dibandingkan dengan logam murni sehingga bisa menghemat biaya produksi.

2.2.2 *Degassing*

Paduan aluminium banyak dimanfaatkan di berbagai sektor industri karena kemampuannya dalam mengurangi berat dan kombinasi sifat yang sangat baik, seperti yang dinyatakan oleh Polmear [4]. Namun, adanya porositas pada komponen yang dicetak merupakan hal yang umum dan berdampak negatif pada sifat mekanik, terutama dalam hal elongasi dan kekuatan tarik, seperti yang dijelaskan oleh Caceres dan Selling [8], serta dalam perilaku kelelahan, seperti diungkapkan oleh Ammar [9]. Porositas

terbentuk selama proses pendinginan dan, setelah terbentuk, sulit dihilangkan melalui perlakuan panas atau proses deformasi, seperti dilaporkan oleh Chaijaruwanich [10]. Oleh karena itu, penting untuk memastikan kualitas lelehan yang baik sebelum pengecoran dengan mengurangi atau setidaknya menghilangkan penyebab porositas.



Gambar 2.2 Ringkasan Teknologi Pemurnian Leburan Paduan Aluminium[11]

Campbell [12] menyatakan bahwa dua faktor utama yang menentukan kualitas dari lelehan aluminium. Yang pertama ialah adanya lapisan oksida dengan *wettability* yang buruk dan satunya lagi adalah hidrogen terlarut. Kedua itu merupakan konsekuensi dari reaksi lelehan aluminium cair dengan kelembapan air disekitarnya.

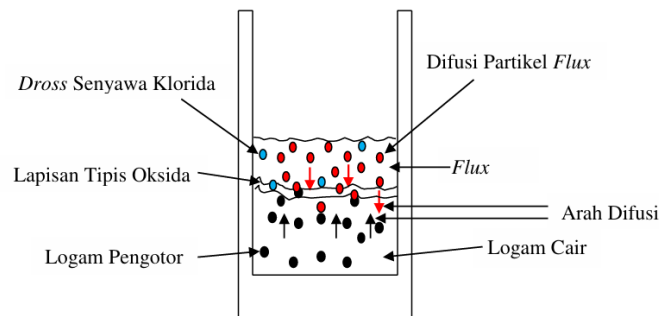


Dengan meningkatnya permintaan akan produk paduan aluminium, teknologi peleburan dan pengecoran paduan aluminium telah berkembang pesat, dan persyaratan untuk kinerjanya juga meningkat. Namun, kandungan gas yang tinggi dalam paduan aluminium adalah salah satu alasan utama yang mempengaruhi kualitas paduan aluminium, ditemukan bahwa kandungan hidrogen paduan aluminium lebih dari 85% dengan menganalisis komposisi gas paduan aluminium [11]. Kandungan hidrogen yang tinggi dalam paduan aluminium akan berdampak signifikan pada pemurnian lelehan paduan aluminium [11]. Selama pemadatan logam, presipitasi hidrogen dan penyusutan yang disebabkan oleh transisi fasa cair-padat menyebabkan cacat seperti porositas dan kelonggaran, yang pada gilirannya mempengaruhi kekuatan tarik, kekuatan luluh, perpanjangan dan ketahanan korosi material. Selain itu, fluiditas lelehan yang mengandung gas akan berkurang, yaitu, kapasitas pengisian mode yang buruk, dan proses *degassing* dan pemurnian lelehan paduan aluminium yang ada tidak dapat memenuhi permintaan produksi komponen paduan aluminium berkualitas tinggi [11]. Oleh karena itu, penelitian tentang teori penghilangan hidrogen dari lelehan paduan aluminium, analisis hubungan antara kandungan hidrogen dari lelehan paduan aluminium dan kualitas pengecoran, dan pengembangan metode dan teknologi pengolahan lelehan paduan aluminium baru akan memberikan dasar ilmiah untuk meningkatkan kondisi tenaga kerja dan meningkatkan manfaat ekonomi dari produksi pengecoran.

Sievert, Ransley dan Sigworth [11] adalah yang pertama mempelajari hidrogen dalam lelehan paduan aluminium, mereka melakukan sejumlah besar pengalaman dan menyimpulkan kandungan hidrogen dalam gas yang terlarut dalam paduan aluminium adalah 80~90%, yaitu, hidrogen adalah satu-satunya gas yang dapat dilarutkan dalam jumlah besar dalam lelehan paduan aluminium. Hidrogen ada dalam lelehan paduan aluminium dalam tiga bentuk: atom hidrogen "larutan" atau "larutan padat"; hidrogen dalam bentuk hidrida; hidrida kompleks dalam bentuk $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-xH}$. Di antaranya, yang pertama adalah bentuk dominan, terhitung lebih dari 95% dari total kandungan hidrogen [11]. Ditemukan bahwa kandungan hidrogen paduan aluminium adalah sekitar 80% – 90% melalui analisis porositas paduan aluminium, dan karena efek turun-temurun dari porositas, hal ini mengarah pada pengurangan sifat mekanik paduan aluminium, yang memiliki efek tertentu pada ketahanan korosi dan kinerja oksidasi anodik paduan aluminium. Inklusi lelehan paduan aluminium dapat dibagi menjadi dua jenis sesuai dengan morfologinya: satu adalah struktur makro dari inklusi besar yang terdistribusi tidak merata, inklusi tersebut akan menyebabkan kebocoran atau korosi pada pengecoran, sampai batas tertentu, mengurangi kekerasan dan plastisitas paduan; Jenis inklusi lain didistribusikan dalam lelehan paduan aluminium dalam keadaan difusi. Dengan lipatan inklusi difusi, viskositas lelehan paduan aluminium menjadi lebih besar, yang pada akhirnya menyebabkan kerusakan *performance* pengecoran paduan aluminium, atau bahkan pengikisan purifikasi paduan aluminium mengacu pada penghilangan

gas, impuritas, dan *hazard* dari Aluminium dan paduannya melalui teori dan teknologi secara fisik dan kimia.

Mekanisme metode *flux* pada peleburan paduan aluminium bekerja dengan cara mengatasi terbentuknya lapisan oksida padat dan rapat di permukaan cairan logam, yang biasanya menghambat pelepasan gas hidrogen dari dalam lelehan. *Flux* yang ditambahkan akan bereaksi secara fisik maupun kimia dengan lapisan oksida tersebut, memanfaatkan perbedaan sifat (*wettability*) antar fasa sehingga mampu mengadsorpsi dan menghancurkan film oksida dengan cepat. Setelah lapisan oksida tereliminasi, jalur pelepasan hidrogen menjadi terbuka, sehingga gas hidrogen dapat dengan mudah keluar melalui lapisan *flux* menuju atmosfer.



Gambar 2.3 Skematik Difusi Partikel *Flux* Dalam Mengikat Logam Pengotor[13]

2.3 Pengaruh Unsur Paduan Pada Alumunium

Umumnya alumunium pada penggunaan keseharian tidak digunakan dalam bentuk murninya, dikarenakan nilai kekuatan yang tidak relatif tinggi meskipun sifat dari alumunium sendiri cukup bermanfaat seperti ketahanan korosinya yang cukup tinggi. Dengan terbentuk lapisan film tipis oksida pada permukaan

aluminium yaitu Al_2O_3 yang cukup stabil, hal ini menunjukkan reliabilitas aluminium dalam penggunaan yang memungkinkan ekspos dengan lingkungan korosif, meskipun begitu aplikasi penggunaan aluminium dalam bentuk murninya umumnya tidak dilakukan mengingat beberapa kelemahan dari aluminium sendiri.

2.3.1 Silikon

Silikon (Si) adalah salah satu unsur paduan yang umum ditambahkan ke dalam aluminium untuk meningkatkan sifat mekanik dan fisiknya. Penambahan silikon ini menghasilkan paduan aluminium-silikon (Al-Si) yang memiliki karakteristik unik dan banyak diaplikasikan dalam berbagai sektor industri. Penambahan Si pada paduan aluminium umumnya memiliki tujuan-tujuan yang ingin dicapai dari hasil modifikasi paduan aluminium-silikon (Al-Si). Dengan penambahan ini pula sifat – sifat dari paduan pun bisa berubah, pengaruh utama silikon pada paduan aluminium ialah:

a. Peningkatan kekuatan

Silikon akan membentuk senyawa intermetalik dengan aluminium, yang dapat meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan paduan hal ini membuat paduan Al-Si sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan tinggi.

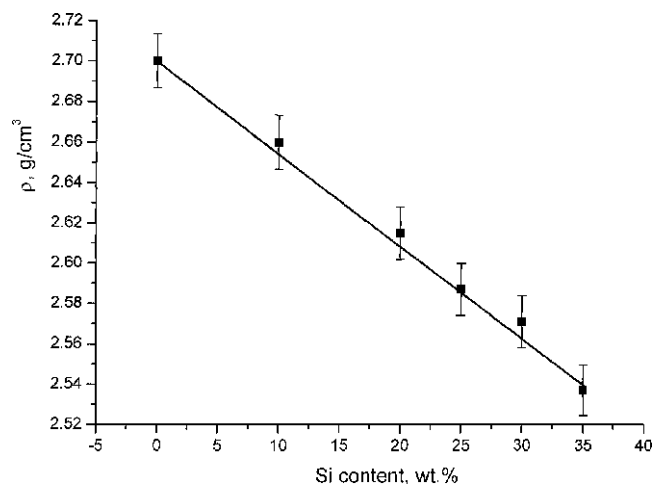
b. Peningkatan Ketahanan Abrasi

Senyawa intermetalik silikon juga memberikan ketahanan abrasi yang baik pada paduan Al-Si. Ini membuatnya ideal untuk aplikasi dimana komponen akan mengalami gesekan terus menerus.

c. Peningkatan Sifat Cor

Silikon dapat meningkatkan fluiditas lelehan aluminium, sehingga memudahkan proses pengecoran.

Akan tetapi penambahan silikon yang berlebihan dapat mempengaruhi sifat dari paduan Al-Si itu sendiri, kandungan silikon yang optimal akan menghasilkan sifat mekanik yang diinginkan, sedangkan kandungan silikon yang terlalu tinggi dapat menyebabkan paduan menjadi lebih rapuh sehingga mengurangi ketahanan terhadap deformasi dan meningkatkan kemungkinan terjadinya patah



Gambar 2.4 Pengaruh Kadar Si Terhadap *Tensile Strength* Pada Paduan Aluminium [14]

2.3.2 Kalsium

Penggunaan kalsium (Ca) sebagai deoksidasi dan modifikasi struktur pada paduan aluminium telah menjadi praktik umum dalam industri metalurgi. Penambahan Ca pada paduan aluminium memberikan beberapa keunggulan, terutama dalam hal modifikasi struktur dan pengurangan kadar silikon

1. Deoksidasi:

Ca bereaksi dengan oksigen yang terlarut dalam lelehan aluminium membentuk kalsium oksida (CaO). CaO memiliki titik leleh yang tinggi dan densitas yang rendah, sehingga mudah mengapung ke permukaan dan dapat dihilangkan melalui proses *skimming*. Proses ini disebut deoksidasi.

2. Modifikasi Struktur:

Ca berinteraksi dengan silikon membentuk senyawa intermetalik CaSi_2 . Senyawa ini memiliki bentuk yang lebih bulat dan distribusi yang lebih merata dibandingkan dengan partikel silikon murni. Hal ini menyebabkan struktur mikro paduan menjadi lebih halus dan seragam, sehingga meningkatkan kekuatan dan ketangguhan.

3. Pengurangan Kadar Silikon:

Dengan membentuk senyawa intermetalik CaSi_2 , sebagian besar silikon dalam lelehan akan terikat dan mengapung ke permukaan. Hal ini mengurangi jumlah silikon yang terlarut dalam paduan, sehingga dapat mengontrol sifat-sifat paduan yang dipengaruhi oleh kandungan silikon.

Adapun dampak Penggunaan Ca sebagai berikut:

a. Peningkatan kekuatan dan ketangguhan

Struktur mikro yang lebih halus dan seragam serta pengurangan inklusi non-metalik meningkatkan kekuatan tarik, kekuatan luluh dan ketangguhan impak dari paduan aluminium

b. Peningkatan ketahanan korosi

Dalam beberapa kasus penambahan Ca dapat meningkatkan ketahanan korosi paduan aluminium terutama pada lingkungan yang agresif

c. Peningkatan sifat cor

Ca dapat meningkatkan kemampuan alir cairan logam, sehingga memudahkan pengisian cetakan yang kompleks dan menghasilkan coran dengan permukaan yang lebih halus

d. Pengurangan porositas

Dengan mengurangi kadar oksigen dalam lelehan, Ca juga membantu mengurangi pembentukan pori pori pada coran

2.3.3 Unsur Paduan Lainnya

Penambahan unsur unsur pada paduan aluminium bukan hanya terbatas pada Si ataupun Ca saja akan tetapi sangat luas dan bahkan hingga saat ini penelitian penambahan unsur pada paduan aluminium pun masih dilakukan. Selain Si dan Ca ada pula beberapa unsur yang cukup umum untuk ditambahkan pada paduan aluminium untuk modifikasi sifat fisik maupun mekaniknya, unsur unsurnya ialah

- a. Magnesium adalah salah satu unsur paduan utama yang sering ditambahkan pada paduan aluminium. Penambahan magnesium pada paduan aluminium memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik dan korosi material. Dalam konsentrasi rendah, magnesium meningkatkan kekuatan mekanik melalui

mekanisme pengerasan larutan padat. Namun, pada konsentrasi yang lebih tinggi, magnesium dapat membentuk senyawa intermetalik seperti Al_3Mg_2 yang dapat memengaruhi sifat keuletan material.

- b. Tembaga adalah unsur paduan yang dikenal karena kontribusinya terhadap peningkatan kekuatan dan kekerasan pada paduan aluminium. Penambahan tembaga biasanya dilakukan dalam kisaran 2-10%, tergantung pada aplikasi dan sifat yang diinginkan. Paduan aluminium-tembaga (seri 2xxx) memiliki kekuatan yang sangat baik setelah dilakukan perlakuan panas,
- c. Mangan merupakan unsur paduan yang sering digunakan untuk meningkatkan kekuatan, ketahanan korosi, dan stabilitas termal pada paduan aluminium. Mangan memperbaiki struktur mikro dengan mengurangi ukuran butiran dan membentuk presipitat Al_6Mn yang stabil secara termal. Efek ini memberikan peningkatan kekuatan tanpa mengorbankan keuletan paduan.

2.3.4 Desilikasi pada Paduan Aluminium

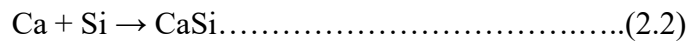
Desilikasi merupakan proses pengurangan kadar silikon (Si) dalam paduan aluminium, khususnya pada paduan Al-Si yang banyak digunakan dalam industri otomotif dan manufaktur. Kandungan silikon yang tinggi memang meningkatkan sifat cor dan ketahanan abrasi, tetapi berlebihan dapat menurunkan keuletan serta menyebabkan terbentuknya fasa eutektik Si yang rapuh. Oleh karena itu, diperlukan metode untuk mengurangi kadar silikon

agar sifat mekanik paduan lebih seimbang. Salah satu pendekatan yang banyak diteliti adalah penggunaan unsur tertentu sebagai agen desilikasi, yaitu bahan yang ditambahkan ke dalam lelehan aluminium untuk bereaksi dengan silikon bebas. Kalsium (Ca) merupakan contoh agen desilikasi yang efektif karena memiliki afinitas tinggi terhadap silikon, membentuk senyawa intermetalik CaSi atau CaSi_2 yang lebih mudah dipisahkan dari lelehan aluminium[15]. Proses ini tidak hanya menurunkan kadar silikon, tetapi juga memodifikasi struktur mikro paduan sehingga lebih homogen, mengurangi porositas, dan meningkatkan sifat mekanik seperti kekuatan tarik dan ketangguhan. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Mwase et al bahkan menunjukkan Ca berhasil mereduksi Si hingga 91% pada bentuk CaO pada pemurnian alumina untuk mendapatkan aluminium[15].

2.4 Reaksi Termodinamika

Pada prinsipnya setelah masuk kedalam tungku teknologi pemisahan fisik tidak dapat lagi dilakukan, dimana peleburan adalah proses metalurgi maka dari itu diatur oleh hukum termodinamika dan pada kali ini reaksi yang diutamakan adalah reaksi pemisahan Si berlebih dengan penambahan Ca pada proses peleburan. Kalsium memiliki afinitas yang relatif tinggi terhadap silikon (Si) dan oksigen yang memungkinkan terbentuknya senyawa intermetalik atau oksida. Dalam reaksi ini, kalsium bertindak sebagai reduktor yang cenderung melepaskan elektron, sementara silikon dengan keelektronegatifan yang lebih tinggi yaitu 1,90 dalam skala pauling. Salah satu

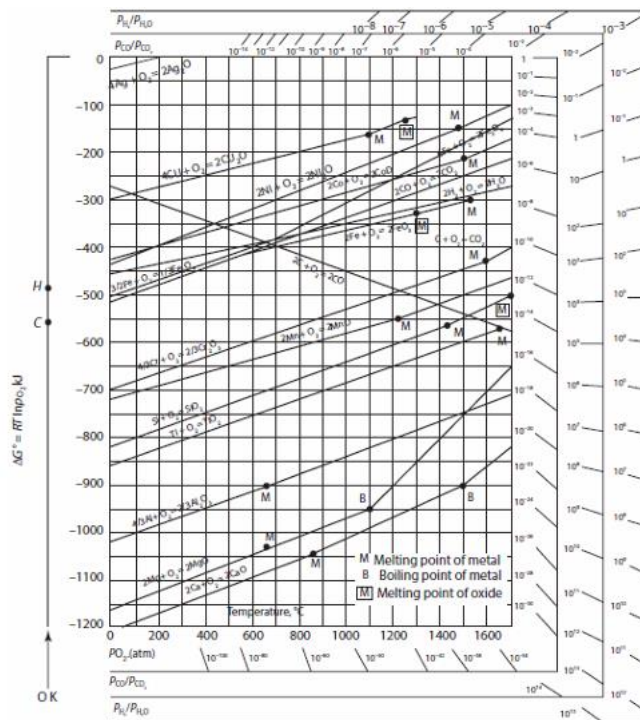
reaksi yang dapat terjadi adalah pembentukan senyawa kalsium silikat (CaSi) atau kalsium oksida (CaO) apabila oksigen turut terlibat[15].



Namun apabila oksigen hadir dalam lingkungan reaksi, reaksi ini dapat lebih lanjut membentuk kalsium oksida sebagai produk sampingan yang diwakili oleh reaksi berikut.

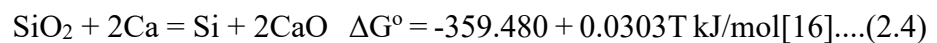


Secara termodinamika ΔG reaksi Ca-Si pada proses peleburan aluminium cenderung negatif yang menandakan reaksi berlangsung secara spontan. Berdasarkan gambar Diagram Ellingham yang ditunjukkan dibawah menunjukkan bahwa terdapat beberapa unsur yang dapat mereduksi silika, dari beberapa unsur tersebut kalsium dipilih karena memiliki kelimpahan atau *abundant* besar pada kerak bumi [16]. Dengan kelimpahan yang tinggi pada kerak bumi dan harganya yang relatif murah dibandingkan dengan unsur-unsur lain yang dapat mereduksi silika serta nilai afinitas yang tinggi dengan silikon (1,90 – 1,00 dalam skala pauling) menjadikan kalsium merupakan pereduksi silikon yang relatif baik.



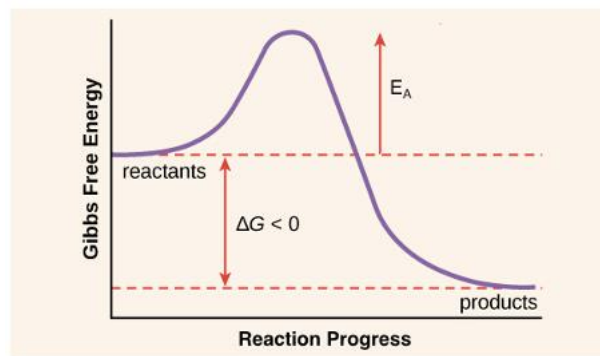
Gambar 2.5 Diagram Ellingham [16]

Diagram Ellingham menunjukkan plot hubungan antara temperatur dan kestabilan senyawa oksida yang dapat dilihat dari nilai energi bebas gibbs senyawa tersebut. Energi bebas gibbs (ΔG) adalah suatu parameter termodinamika yang menunjukkan kemungkinan terjadinya suatu reaksi. Nilai ΔG yang bersifat negatif mengindikasikan bahwa reaksi tersebut dapat berlangsung secara spontan.



Untuk setiap reaksi yang memiliki nilai energi bebas gibbs negatif, reaksi tersebut terjadi secara spontan menurut termodinamika. Dari nilai energi bebas gibbs pada reaksi diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa reaksi akan berlangsung secara spontan bahkan pada suhu kamar (20°C) namun hal ini

tidak bisa terjadi begitu saja karena dibutuhkan energi aktivasi. Ilustrasi dari energi aktivasi dari suatu reaksi agar dapat berlangsung terlihat pada gambar dibawah.



Gambar 2.6 Ilustrasi Energi Aktivasi[16]

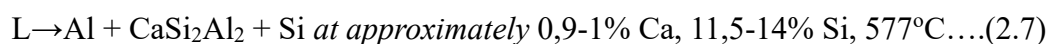
Selain itu, meskipun suatu reaksi akan berlangsung secara spontan menurut termodinamika, terdapat juga kemungkinan bahwa reaksi itu membutuhkan waktu yang sangat lama sehingga terlihat seperti reaksi tersebut tidak berlangsung. Oleh karena itu, kinetika juga berperan sangat penting dalam berlangsungnya suatu reaksi. Secara umum, suatu reaksi akan berlangsung lebih cepat jika dioperasikan pada temperatur yang lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan persamaan arrhenius, atau persamaan reaksi heterogen yang dimodelkan sebagai shrinking core model (Levenspiel, 1999) sebagai berikut.

$$k = k_0 e^{-E/RT} \dots\dots\dots(2.5)$$

2.4.1 Presipitasi Selektif

Silikon pada paduan aluminium hipoeutektik hanya terpresipitasi selama reaksi eutektik sehingga sulit dipisahkan melalui reaksi pengendapan konvensional. Salah satu mekanisme yang mungkin dilakukan untuk menghilangkan silikon dari lelehan paduan adalah dengan secara selektif mempresipitaskan silikon melalui reaksi dengan elemen atau unsur logam lain untuk membentuk partikel intermetalik. Fenomena terbentuknya fasa intermetalik akibat penambahan Ca tidak hanya bersifat spontan, tetapi juga berlangsung secara selektif. Meskipun kalsium atau zirkonium dapat digunakan untuk bereaksi dengan silikon, kalsium diketahui adalah salah satu unsur yang paling efektif yang dapat membentuk partikel intermetalik dengan silikon dan dapat dengan mudah dihilangkan dari paduan [17].

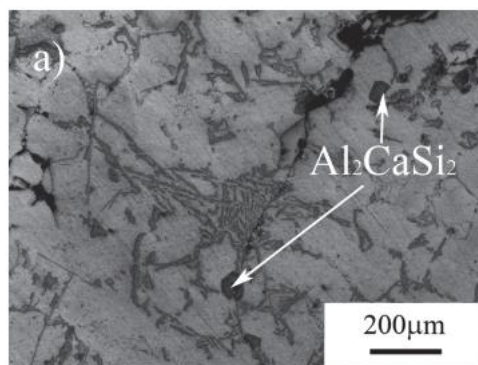
Ca memiliki kecenderungan untuk *selectively precipitating* bersama unsur Si, sehingga menghasilkan fasa-fasa tertentu yang lebih stabil pada kondisi termodinamika tertentu. Mekanisme presipitasi selektif ini menjadi dasar terbentuknya senyawa seperti CaSi dan CaSi₂, yang kemudian berimplikasi pada perubahan morfologi Si eutektik dalam matriks aluminium, reaksi-reaksi yang mungkin terjadi disebabkan oleh dua *ternary eutectic* yang terbentuk dalam sistem Al-Ca-Si adalah sebagai berikut[17]



Pada kondisi *solid state* Al dalam keseimbangan dengan CaSi₂Al₂ dan CaAl₄ atau Si [17].

2.4.2 Hasil Reaksi Terhadap Mikrostruktur

Penambahan unsur *micro alloying* seperti Ti, B, dan Sr pada paduan Al–Si telah lama dikenal efektif sebagai *grain refiner* maupun *modifier* untuk meningkatkan sifat paduan. Unsur-unsur tersebut bekerja dengan cara memperbanyak situs nukleasi heterogen serta memodifikasi morfologi eutektik silikon melalui mekanisme tertentu, seperti pembentukan partikel Al_3Ti , TiB_2 , maupun efek *twinning* yang diinduksi oleh segregasi Sr. Sejalan dengan peran Ti, B, dan Sr, unsur kalsium (Ca) juga dapat bertindak sebagai *grain refiner* dan *modifier* pada paduan Al–Si hipoeutektik. Studi termal pada penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penambahan Ca menurunkan temperatur eutektik sekaligus mengubah bentuk eutektik Si dari *acicular* menjadi *fibrous*. Analisis EPMA dan EBSD lebih lanjut bahkan mengidentifikasi terbentuknya fasa kaya kalsium berbentuk plat, yaitu Al_2CaSi_2 dengan struktur heksagonal, yang berperan dalam memodifikasi mikrostruktur paduan [6].



Gambar 2.7 Fasa *Polyhedral-Plate like* Al_2CaSi_2 [18]

Secara keseluruhan, penambahan Ca pada paduan Al–Si tidak hanya memicu terbentuknya fasa intermetalik seperti CaSi dan CaSi₂, tetapi juga menghasilkan fasa kaya kalsium berbentuk plat yang terdistribusi di sepanjang batas butir. Temuan Jiao[6] menunjukkan bahwa dengan meningkatnya kadar Ca, ukuran butir primer α -Al dan *secondary dendrite arm spacing* (SDAS) mengalami penurunan, sementara morfologi eutektik Si berubah dari bentuk flake menjadi fibrous. Kehadiran fasa Ca-rich ini berperan penting dalam memodifikasi mikrostruktur, karena selain meningkatkan jumlah situs nukleasi heterogen, juga membatasi pertumbuhan dendrit sehingga menghasilkan struktur yang lebih halus dan homogen. Dengan demikian, keberadaan fasa-fasa hasil reaksi Ca–Si menjadi landasan utama bagi perubahan mikrostruktur [6].

2.4.3 Implikasi Hasil Reaksi

Ca berperan sebagai *modifier* yang mengubah morfologi Si eutektik melalui pembentukan fasa baru. Ketika kalsium (Ca) ditambahkan dalam proses remelting scrap aluminium yang mengandung silikon (Si), Ca berinteraksi dengan silikon untuk membentuk senyawa intermetalik seperti CaSi₂, yang memiliki densitas lebih rendah dibandingkan dengan aluminium cair. Senyawa ini akan mengapung ke permukaan dan dapat dipisahkan melalui proses *skimming*, yang menjadikan proses pemurnian lebih efektif. Penambahan kalsium ini tidak hanya mengurangi kadar silikon, tetapi juga memodifikasi struktur mikro paduan, mengubah morfologi eutektik Si dari bentuk jarum atau platelet menjadi lebih halus dan terdistribusi lebih merata

dalam matriks aluminium [19]. Efek ini meningkatkan kekuatan tarik dan ketangguhan paduan aluminium, sehingga sangat penting untuk aplikasi industri, khususnya pada sektor otomotif yang membutuhkan sifat mekanik yang lebih baik. Selain itu, perubahan morfologi ini juga mengurangi konsentrasi tegangan lokal yang dapat memicu retak, serta meningkatkan keuletan dan ketahanan material terhadap deformasi plastis