

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium dan Paduan Aluminium

Aluminium merupakan logam *non-ferrous* yang paling banyak digunakan di dunia, dengan pemakaian tahunan sekitar 24 juta ton^[10]. Aluminium dengan densitas 2.7 g/cm^3 sekitar sepertiga dari densitas baja (8.83 g/cm^3), tembaga (8.93 g/cm^3), atau kuningan (8.53 g/cm^3), mempunyai sifat yang unik, yaitu: ringan, kuat, dan tahan terhadap korosi pada lingkungan luas termasuk udara, air (termasuk air garam), petrokimia, dan beberapa sistem kimia^[10].

Pemakaian aluminium dalam dunia industri yang semakin tinggi, menyebabkan pengembangan sifat dan karakteristik aluminium terus menerus ditingkatkan. Aluminium dalam bentuk murni memiliki kekuatan yang rendah dan tidak cukup baik digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan deformasi dan patahan, maka dari itu perlu ditambahkan unsur lain untuk meningkatkan kekuatannya^[12]. Aluminium dalam bentuk paduan yang sering dikenal dengan istilah *aluminium alloy* merupakan jenis aluminium yang digunakan cukup besar saat ini. Berdasarkan metode peleburannya, paduan aluminium dikelompokkan menjadi dua kelompok utama yaitu paduan tempa (*wrought*) dan paduan tuang (*casting*)^[10]. Jenis paduan aluminium saat ini sangat banyak dan tidak menutup kemungkinan ditemukannya lagi jenis paduan aluminium baru, oleh karena itu dibuatlah sistem penamaan sesuai dengan komposisi dan karakteristik paduan aluminium tersebut untuk memudahkan pengklasifikasiannya. Salah satu penamaan paduan aluminium adalah dengan standar AA, seperti pada Tabel 2.1.

Pada aluminium tempa, seri 1xxx digunakan untuk aluminium murni. Digit kedua dari seri tersebut menunjukkan komposisi aluminium dengan limit pengotor alamiahnya, sedangkan dua digit terakhir menunjukkan persentase minimum dari aluminium tsb. Digit pertama pada seri 2xxx sampai 7xxx menunjukkan kelompok paduannya berdasarkan unsur yang memiliki persentase komposisi terbesar dalam paduan.

Tabel 2.1 Daftar seri paduan aluminium tempa^[10,11]

No. Seri	Komposisi Paduan
1xxx	Aluminium murni
2xxx	Paduan aluminium – tembaga
3xxx	Paduan aluminium – mangan
4xxx	Paduan aluminium – silikon
5xxx	Paduan aluminium – magnesium
6xxx	Paduan aluminium – magnesium – silikon
7xxx	Paduan aluminium – seng
8xxx	Paduan aluminium – timah – litium
9xxx	Disiapkan untuk penggunaan di masa depan

Digit kedua menunjukkan modifikasi dari unsur paduannya, jika digit kedua bernilai 0 maka paduan tersebut murni terdiri dari aluminium dan unsur paduan. Jika nilainya 1 – 9, maka paduan tersebut memiliki modifikasi dengan unsur lainnya. Dua angka terakhir untuk seri 2xxx – 8xxx tidak memiliki arti khusus, hanya untuk membedakan paduan aluminium tersebut dalam kelompoknya^[10,11].

Paduan aluminium tuang penamaannya memakai sistem tiga digit diikuti dengan satu bilangan desimal. Tabel 2.2 menunjukkan seri paduan aluminium tuang berdasarkan unsur paduannya.

Tabel 2.2 Daftar seri paduan aluminium tuang^[10,11]

No. Seri	Komposisi Paduan
1xx.x	Aluminium murni
2xx.x	Paduan aluminium – tembaga
3xx.x	Paduan aluminium – silikon – magnesium
4xx.x	Paduan aluminium – silikon
5xx.x	Paduan aluminium – magnesium
6xx.x	Tidak digunakan
7xx.x	Paduan aluminium – seng
8xx.x	Paduan aluminium – timah
9xx.x	Belum digunakan

Dalam standar AA, angka pertama menunjukkan kelompok paduan, angka kedua dan ketiga menunjukkan kemurnian minimum untuk aluminium tanpa paduan dan sebagai nomor identifikasi untuk paduan tersebut, angka keempat menandakan bentuk produk (.0 = spesifikasi coran, .1 = spesifikasi ingot, .2 = spesifikasi ingot yang lebih spesifik).

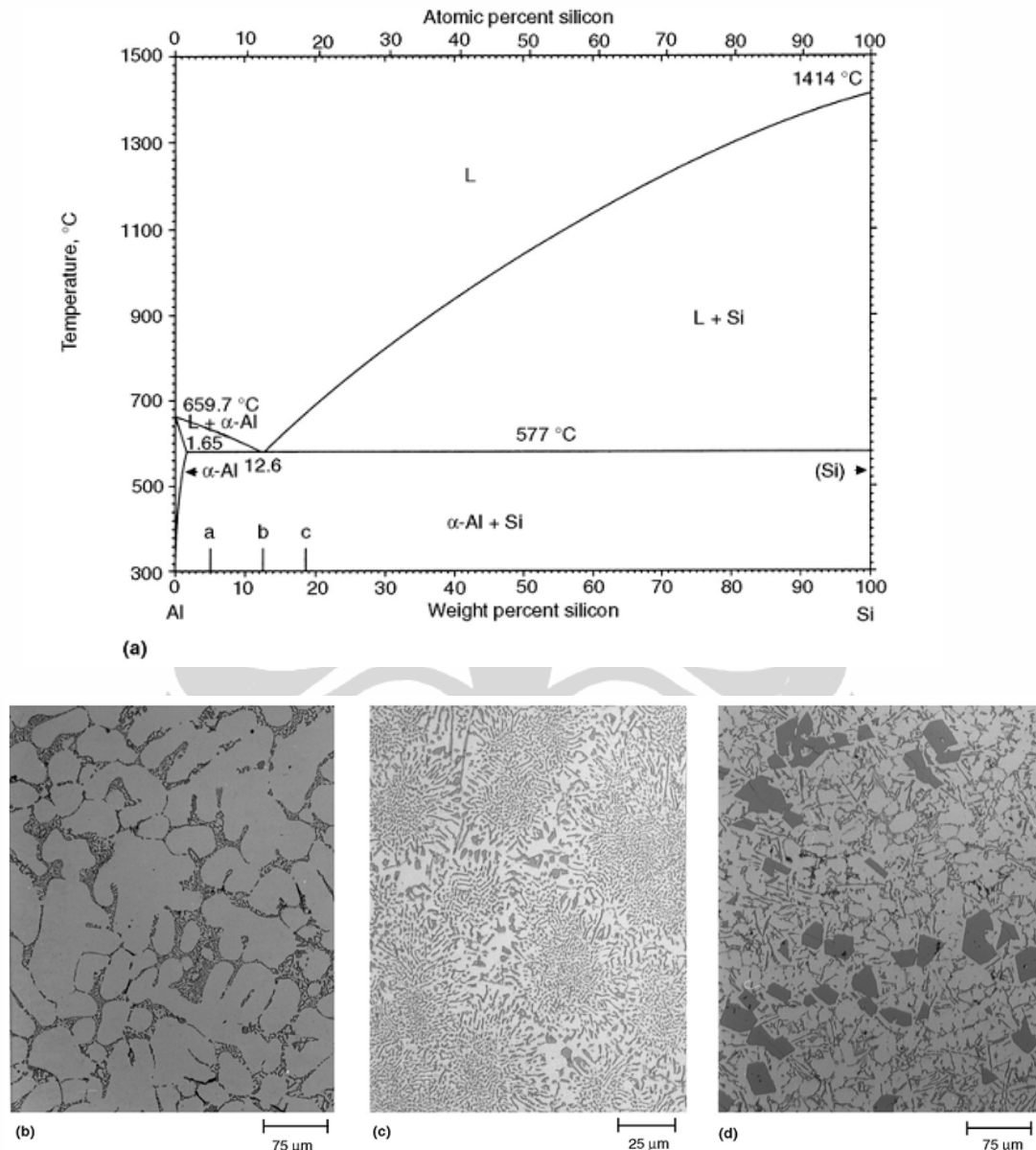
2.2 Paduan Aluminium - Silikon Tuang

Paduan aluminium – silikon tuang memiliki sifat mekanis, mampu cor, mampu las dan ketahanan korosi yang sangat baik sehingga secara luas telah digunakan untuk aplikasi *aerospace*, rekayasa laut, automobil dan rekayasa instrumen^[9]. Paduan aluminium-silikon tuang komersial adalah material multi fasa yang terdiri dari mikrostruktur yang diklasifikasikan dengan seri 3xx.x untuk paduan aluminium silikon dengan tambahan tembaga dan atau magnesium, dan seri 4xx.x untuk paduan aluminium silikon^[13]. Sifat karakteristik paduan Al-Si pada umumnya mempunyai kekuatan tarik yang tinggi dalam hubungannya dengan densitas. Tingkat kekuatan tariknya sangat dipengaruhi oleh komposisi multi fasa mikrostrukturnya. Tabel 2.3 berisi perbandingan kekuatan tarik dari paduan aluminium dan paduan lainnya.

Tabel 2.3 Perbandingan kekuatan tarik beberapa paduan^[13]

Alloy	Batas kekuatn tarik (UTS), MPA	Densitas (ρ), kg/m ³	Kekuatan Spesifik (UTS/ ρ), m ² /s ²
Al murni (99.9999% Al) Al(4N)	78	2699	0.03
Al-7% Si, T6	210	2685	0.09
Al-5% Si – 2% Cu, T6	310	2690	0.12
Al-9% Si, T6	240	2650	0.10
Al-20% Si, T6	200	2650	0.08
Besi	1.9	7650	0.00024
Besi tuang abu-abu	380	7100	0.05
Besi tuang lentur	900	7200	0.13
Besi tuang <i>austempered ductile</i>	12000	7200	0.17
Baja karbon tuang	650	7850	0.08
baja <i>stainless</i> tuang	880	7850	0.11

Kandungan silikon dalam paduannya berkisar antara 5 – 23 % wt. Strukturnya bisa hipoeutektik (1.65 – 12.6 wt % Si), eutektik (12.6 wt % Si), dan hipereutektik (> 12.6 wt % Si) tergantung dari persentase silikon dalam paduannya seperti pada Gambar 2.1. Dalam ketiga jenis paduan aluminium-silikon tuang ini (hipoeutektik, eutektik, hipereutektik) terdapat α -Al yang merupakan komposisi utama dari paduan Al-Si tuang^[10]. Paduan aluminium-silikon tuang paling sering ditemui dalam fasa hipoeutektik dan eutektik^[14]. Unsur silikon dalam paduan tersebut dapat meningkatkan ketahanan korosi dan aus, meningkatkan karakteristik *casting* dan *machining* pada paduan^[15].



Gambar 2.1 (a) Diagram kesetimbangan Al-Si, (b) mikrostruktur Al-Si hipoeutektik, (c) mikrostruktur Al-Si eutektik, (d). mikrostruktur Al-Si hipereutektik^[13]

2.3 Paduan Aluminium Tuang AC4B

Paduan aluminium tuang AC4B (standar JIS) atau AA333 (standar AA dan ASTM) memiliki komposisi 9 % Si dan 3 % Cu. Unsur-unsur penyusun AC4B dapat dilihat pada Tabel 2.4. Komposisi Cu dalam paduan AC4B pada Tabel 2.4 merupakan kedua terbanyak setelah Si, sehingga paduan AC4B dapat digolongkan ke dalam paduan Al-Si-Cu.

Tabel 2.4 Komposisi aluminium silikon tuang AC4B^[17].

Standar	Nama	Komposisi (%)												
		Cu	Zn	Al	Mn	Ni	Pb	Sn	Fe	Si	Mg	Ti	Cr	Pengotor lain
JIS	AC4B	2-4	≤1.0	Sisa	≤0.5	≤0.35	≤0.2	≤0.1	≤1.0	7-10	≤0.5	≤0.2	≤0.2	-
AA	333.0	3-4	≤1.0	Sisa	≤0.5	≤0.5	-	-	≤1.0	8-10	0.03-0.50	≤0.25	-	≤0.5
ASTM	333.0	3-4	≤1.0	Sisa	≤0.5	≤0.5	-	-	≤1.0	8-10	0.05-0.50	≤0.2	-	≤0.5
BS DIN	G(GK)- AISI8Cu3	2.0- 3.5	≤1.2	Sisa	≤0.2 -0.5	≤0.3	≤0.2	≤0.1	≤1.0	7.5- 9.5	0.1- 0.3	≤0.15	≤0.1	≤0.5

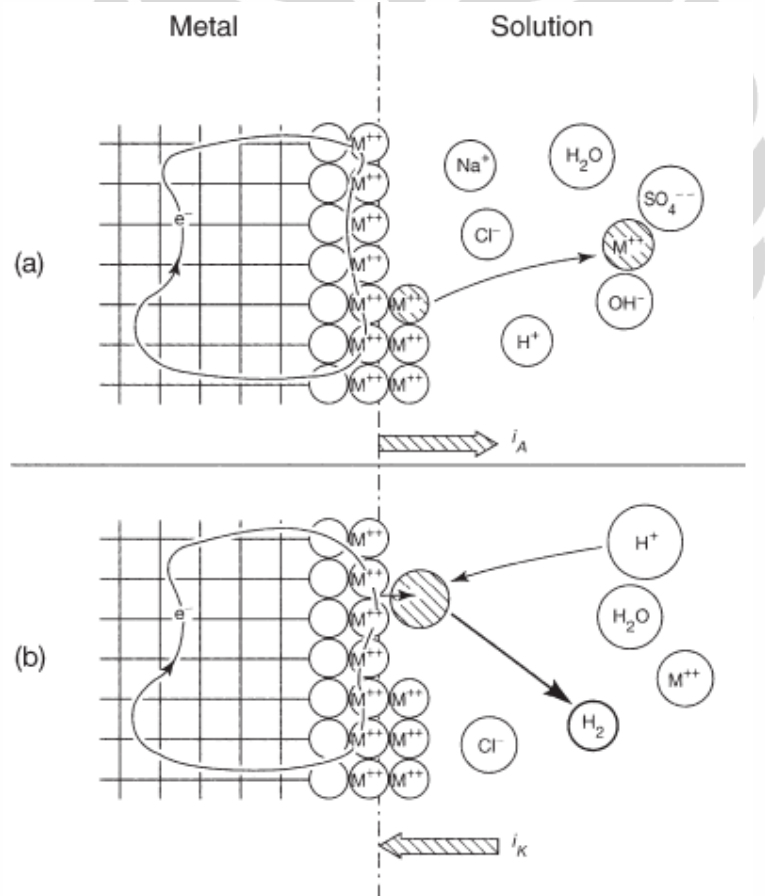
Berdasarkan komposisi silikon dalam paduan, AC4B memiliki mikrostruktur hipoeutektik. Mikrostruktur dengan jenis hipoeutektik umumnya lebih baik untuk pengecoran yang lebih kompleks dengan proses *permanent mold* dan *dies casting*^[11]. Kontribusi silikon dalam paduan ini dapat meningkatkan mampu cor dan menghilangkan *hot shortness*, sedangkan Cu berkontribusi untuk menguatkan dan meningkatkan sifat mampu mesin^[11]. Karakteristik tersebut membuat paduan AC4B memiliki sifat mampu cor yang baik, kuat, dan dapat diberi perlakuan panas. Karakteristik lainnya dari paduan AC4B dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Karakteristik paduan AC4B^[18]

Sifat	Jenis Sifat	Nilai
Sifat Fisik	Densitas (g/cm ³)	2.77
Sifat Fisik	Koefisien Ekspansi Panas Linear (μm/m·K)	20.8
Sifat Fisik	Konduktifitas Panas (W/m·K)	95
Sifat termodinamik	Temperatur Cair (°C)	590
Sifat termodinamik	Temperatur Pembekuan (°C)	520
Sifat termodinamik	Panas Spesifik (kJ/kg·K)	0.963
Sifat tarik (<i>tensile</i>)	Batas Kekuatan Tarik (MPa)	267
Sifat tarik (<i>tensile</i>)	<i>Tensile Yield Strength</i> (MPa)	178
Sifat tarik (<i>tensile</i>)	Elongasi Tarikan (%)	2
Sifat elastis	Modulus Tekanan Elastis (GPa)	75.2
Sifat elastis	Modulus Geseran Elastis (GPa)	24.8
Kekerasan	<i>Brinell Hardness</i> (HB) (HB)	83
Sifat fatik	Tingkat Putaran Fatik (<i>Axial</i>) (<i>Cycles</i>)	50000000

2.4 Korosi

Korosi adalah hasil kerusakan reaksi kimia antara logam atau paduan logam dengan lingkungannya dan dilanjutkan dengan proses elektrokimia yang kompleks berdasarkan struktur atom dari material^[19]. Di dalam logam, lingkungan elektris atom membuat elektron bebas mampu bergerak di sepanjang logam. Di dalam fasa cair (larutan), spesies yang dapat ditemukan adalah ion-ion positif (kation) dan ion-ion negatif (anion), molekul netral seperti air dan variasi campuran yang tidak terpisahkan^[20]. Pada permukaan antara logam dan cairan, terjadi pertukaran muatan elektris yang mengawali reaksi kimia seperti terlihat pada Gambar 2.2 berikut ini.



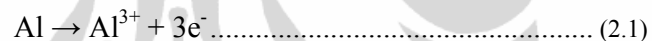
Gambar 2.2 Reaksi elektrokimia antara permukaan logam dan larutan^[20].

Pada Gambar 2.2, reaksi elektrokimia yang terjadi adalah:

- (a) Atom-atom logam teroksidasi membentuk ion-ion Mn^{n+} yang berada dalam fasa cair dan menciptakan *flux* elektron di dalam logam dengan arah larutan – logam. Kemudian menghasilkan arus oksidasi anodik i_a yang mengalir dari logam menuju larutan.
- (b) Ion- ion atau molekul-molekul pada fasa cair berkurang yang berarti mereka membawa elektron-elektron dari logam dan berubah menjadi spesies kimiawi lain. Ini menciptakan *flux* elektron di dalam logam dengan arah logam – larutan. Menghasilkan arus katodik i_k yang mengalir dari larutan menuju logam.

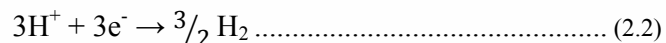
2.4.1 Korosi Pada Aluminium

Reaksi dasar dari aluminium dalam media cair telah dipelajari dalam banyak penelitian. Dalam keadaan biasa, oksidasi aluminium dalam air dimulai dengan persamaan:



Logam aluminium, dalam keadaan oksidasi 0, dalam larutannya berubah menjadi kation Al^{3+} ketika kehilangan tiga elektron. Reaksi ini seimbang dengan reduksi simultan ion yang hadir dalam larutan yang merupakan elektron bebas. Dalam media cair dengan pH mendekati netral, seperti air biasa, air laut, dan uap air dapat ditunjukkan oleh perhitungan termodinamika bahwa hanya dua reaksi reduksi yang dapat terjadi, yaitu:

- Reduksi proton H^+ :

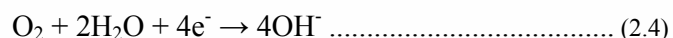


Proton H^+ diperoleh dari dissolusi molekul air :



- Reduksi oksigen terurai dalam air :

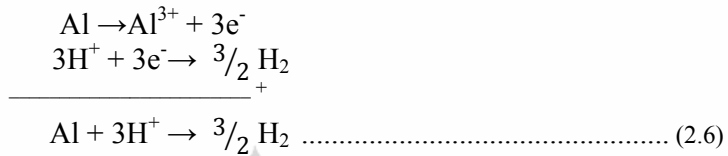
- Dalam alkalin atau media netral :



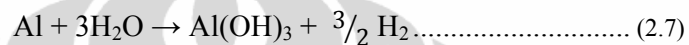
- Dalam media asam :



Pada 20°C dan dibawah tekanan atmosfer, kelarutan oksigen dalam air adalah 43.4 mg.kg⁻². Menurun dengan meningkatnya temperature dan tidak lebih dari 30.8 mg.kg⁻² pada 40°C dan 13.8 mg.kg⁻² pada 80°C. Umumnya korosi aluminium dalam media cair adalah penjumlahan dua reaksi kimia, oksidasi dan reduksi:



atau



Reaksi ini diiringi oleh suatu perubahan dalam bilangan oksidasi pada aluminium, dari 0 di dalam logam berubah menjadi bilangan oksidasi alumina (+3). Dengan pertukaran elektron, maka aluminium kehilangan tiga elektron yang diambil oleh 3H⁺. Korosi aluminium diperoleh dalam formasi alumina Al(OH)₃ yang tidak larut dalam air dan mengendap sebagai gel putih dimana di dalamnya ditemukan korosi sumuran sebagai kepingan gelatin putih^[20].

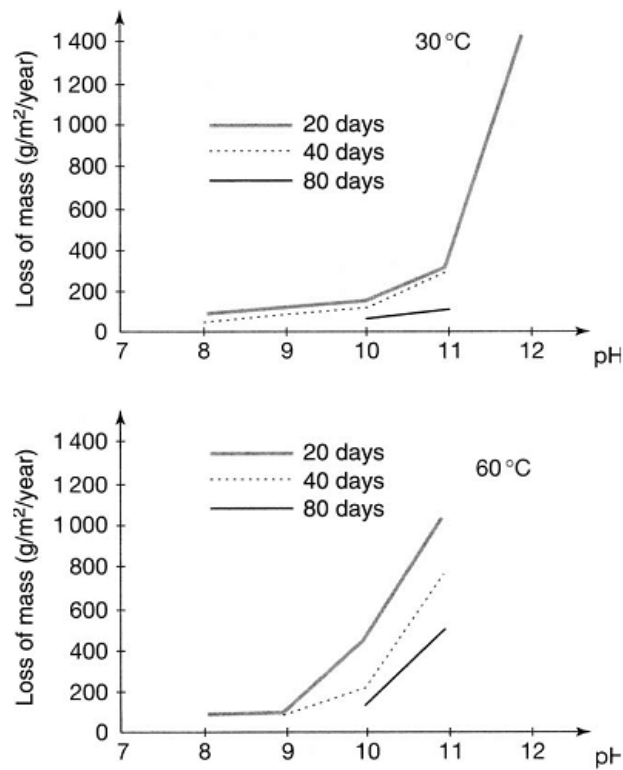
2.4.2 Jenis-Jenis Korosi

Perbedaan jenis korosi yang terjadi pada aluminium lebih kurang dapat dilihat dengan pengamatan visual, seperti korosi *uniform*, korosi sumuran, korosi tegangan, dll. Jenis korosi dominannya tergantung pada beberapa factor, yaitu: penyusun logam, media dan kondisi yang digunakan. Tidak ada bentuk korosi yang khusus pada aluminium dan paduannya.

- Korosi *uniform* pada aluminium^[20]

Korosi jenis ini berkembang dari lubang dengan diameter yang sangat kecil dalam ukuran micrometer, merata dan menurunkan ketebalan seluruh luas permukaan logam. Dalam aluminium, korosi jenis ini didapati dalam media asam yang tinggi atau media alkalin, dimana kelarutan lapisan oksida alaminya tinggi. Laju pelarutan lapisan lebih besar daripada laju pembentukannya, sehingga perbandingan laju keduanya dapat berubah sepanjang waktu. Sebagai contoh, dalam larutan NaOH laju pelarutan didapati lebih rendah selama 40 atau 80 hari waktu ekspose dibandingkan dengan

pengujian setelah 20 hari, seperti pada Gambar 2.3. Laju pelarutan dapat bervariasi dari beberapa micrometer per tahun sampai beberapa micrometer per jam, tergantung pada perilaku asam atau basa. Pemberian inhibitor dapat mengurangi laju pelarutannya, misalnya sodium silikat dapat mengurangi laju pelarutan aluminium dalam media alkalin. Laju korosi *uniform* dapat diukur dengan mudah melalui perhitungan kehilangan berat atau jumlah hidrogen yang hilang. Ini adalah parameter yang berguna untuk mengevaluasi laju pelarutan aluminium dalam bak asam.



Gambar 2.3 Variasi laju korosi aluminium 1050 dalam larutan NaOH^[20]

- Korosi sumuran pada aluminium

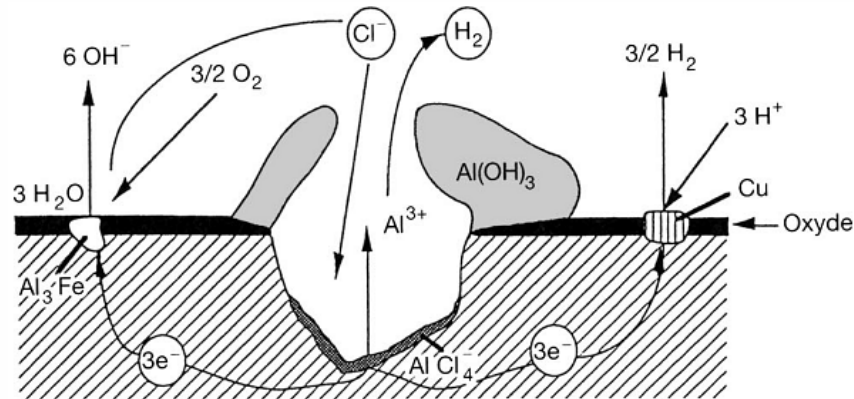
Karakter dari korosi lokal ini memiliki bentuk lubang yang tidak teratur pada permukaan logam. Diameter dan kedalamannya tergantung pada beberapa parameter yang berhubungan dengan logam, media, dan kondisi perawatan. Aluminium rawan terserang korosi sumuran dalam media dengan pH mendekati netral yang mana secara mendasar meliputi semua lingkungan alami seperti permukaan air, air laut, dan uap air. Tidak seperti logam lainnya, korosi pada aluminium mudah dikenali karena korosi sumuran ditutupi oleh gelatin putih yang tebal yang merupakan gel $\text{Al}(\text{OH})_3$. Gelatin ini jauh lebih besar daripada lubang di bawahnya. Percobaan menunjukkan korosi sumuran akan selalu berkembang selama minggu pertama terekspose. Korosi sumuran pada aluminium terjadi dalam dua tahap yang berbeda, yaitu inisiasi dan propagasi.

1. Tahap Inisiasi

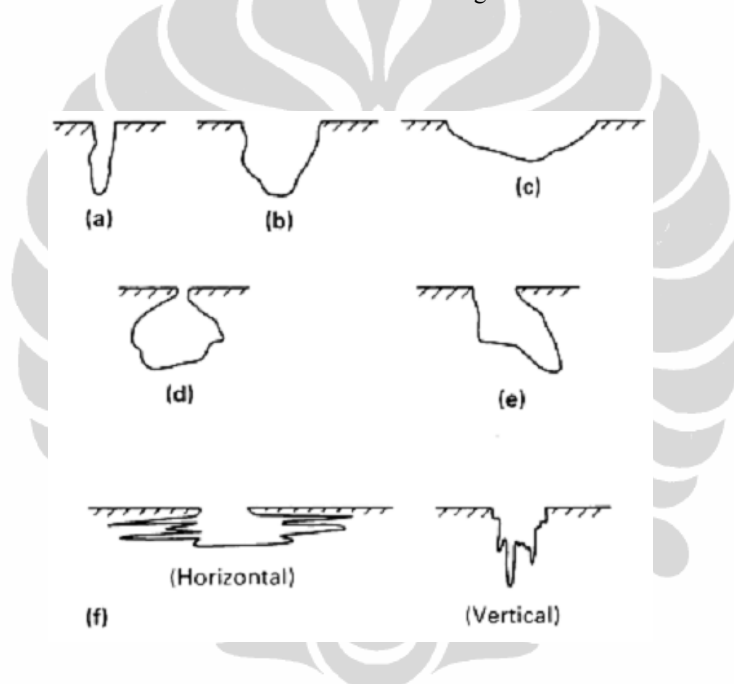
Korosi sumuran berkembang dengan kehadiran klorida. Ion Cl^- terserap dalam lapisan oksida diikuti dengan kerusakan lapisan pada titik yang lemah dengan formasi *mikrocrack* selebar beberapa nano meter. Ketika logam terpolarisasi sekali lagi, pasivasi lubang tidak akan terinisiasi kembali, tetapi lubang akan mulai pada sisi yang baru. Oksigen akan berkurang secara perlahan dalam wilayah katodik. Wilayah ini merupakan fasa intermetalik dimana lapisan oksida sedikit menutupinya. Ketika lapisan robek, aluminium akan teroksidasi terus menerus, dan intermediet klorida AlCl^{4-} akan terbentuk.

2. Tahap Propagasi

Pada tahap propagasi ini reaksi yang terjadi sama seperti reaksi pada persamaan (2.1) sampai (2.2), sedangkan mekanismenya dan bentuk kedalaman korosi dapat dilihat pada Gambar 2.4 dan 2.5.



Gambar 2.4 Mekanisme korosi sumuran logam aluminium^[20].



Gambar 2.5 Variasi bentuk penampang sumuran (a) sempit dan dalam, (b) elips, (c) lebar dan rendah, (d) *subsurface*, (e) *undercutting*, (f) bentuknya sesuai dengan mikrostruktur^[21].

2.5 Pengaruh Sr dan Ti Terhadap Ketahanan Korosi

Paduan aluminium mempunyai ketahanan korosi yang sangat baik karena adanya pembentukan lapisan pasivasi oksida pada permukaannya^[9]. Unsur silikon pada paduan Al-Si seri 333.x bersifat katodik terhadap matriks aluminium. Efeknya terhadap ketahanan korosi sangat sedikit karena silikon terpolarisasi cukup tinggi dan densitas arusnya rendah^[11]. Ketahanan korosi pada paduan

aluminium seri 333.x sama seperti pada seri 222.x, yaitu berhubungan dengan jumlah kandungan tembaga dalam paduan dan tingkat pengotornya^[11]. Serangan korosi biasanya terjadi pada titik terlemah pada lapisan pasivasi yang kemudian berkembang menjadi korosi lokal pada permukaan logam. Cacat pengecoran, ketidakhomogenan komposisi, inklusi *slag*, presipitasi fasa kedua merupakan penyebab terjadinya korosi pada paduan Al-Si^[9]. Korosi lokal hadir dalam bentuk sumuran, interkristalin korosi, eksfoliasi, dan SCC.

Kekuatan dan kualitas paduan Al-Si tuang ditentukan oleh kualitas mikrostruktur, kehalusan struktur, bentuk dan morfologi unsur mikro yang ada dalam paduan, serta porositas yang dihasilkan dalam proses pengecoran^[16]. Mikrostruktur paduan aluminium silikon tuang kebanyakan dijumpai dalam fasa hipoeutektik dan eutektik^[14]. Umumnya mikrostruktur dikontrol melalui proses penghalusan butir (*grain refinement*) dan modifikasi (*modifier*) yang sesuai dengan paduannya. Al-Ti-B dan Al-Sr *grain refinement* dan *modifier* yang sering digunakan untuk paduan Al-Si^[11].

2.5.1 Pengaruh Sr Terhadap Ketahanan Korosi pada Paduan Aluminium

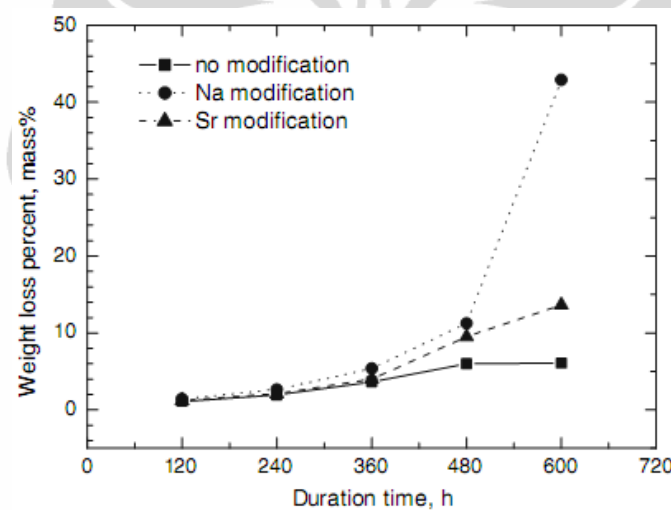
Penambahan stronsium pada paduan hipoeutektik Al-Si tuang bertujuan untuk mengubah morfologi silikon eutektik dari bentuk *acicular flakes* menjadi *fibrous* sehingga meningkatkan sifat mekanik terutama kekerasan dan elongasi^[22]. Namun efek lain dari penambahan Sr adalah naiknya jumlah porositas dalam paduan Al-Si dari makro porositas penyusutan menjadi sebaran porositas mikro yang baik, sehingga keuntungan perubahan morfologi silikon tidak begitu berarti terhadap sifat mekaniknya^[22].

Penelitian sebelumnya mengenai efek penambahan Sr dalam Al-11.7 % Si Alloy terhadap ketahanan korosi pernah dilakukan oleh dilakukan oleh Hengcheng Liou *et al*^[9]. Pengujian korosi dalam penelitian tersebut menggunakan metode *salt spray* dan *immersion* untuk mengetahui laju korosi dengan perhitungan kehilangan berat. Setelah pengujian selama 600 jam pencelupan dalam larutan H₂SO₄ 4%, hasil penelitian tersebut menunjukkan terjadinya penurunan ketahanan korosi pada paduan Al-11.7 % Si dengan adanya penambahan *modifier* Sr. Komposisi penambahan Sr dapat dilihat dari Tabel 2.6.

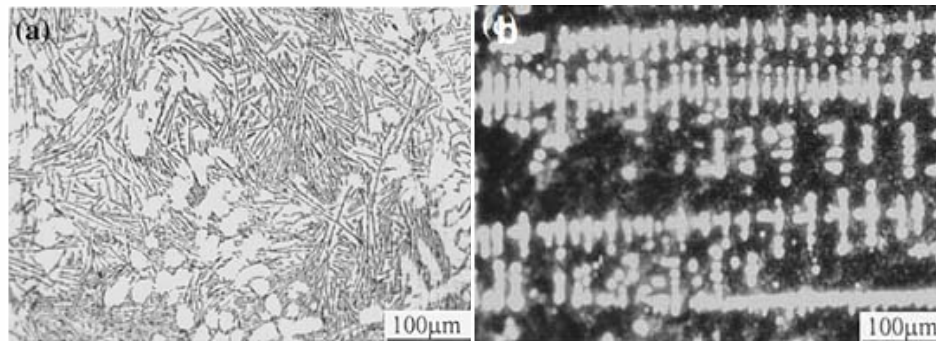
Tabel 2.6 Komposisi penambahan Sr dalam paduan Al-11.7%Si^[9]

Alloys	Concentrations in the alloys				Addition level by weight of the melt, wt%	
	Si (wt%)	Fe (wt%)	Na (ppm)	Sr (ppm)	Na salt flux	Al-10Sr master alloy
Alloy 1	11.68	0.19	<10	<10	-	-
Alloy 2	11.75	0.22	80	<10	0.5	-
Alloy 3	11.72	0.19	<10	290	-	1.0

Hasil pengujian korosi menunjukkan ketahanan korosi pada paduan Al-11.7% Si dengan penambahan Sr lebih kecil dibandingkan tanpa penambahan Sr. Hal ini ditunjukkan dari persentase berat yang hilang dimana dengan penambahan Sr persentase berat yang hilang setelah 600 jam pengujian adalah sebesar 13.63 % sedangkan Al-11.7 % Si tanpa penambahan Sr persentase pengurangannya sebesar 6.10%, seperti pada Gambar 2.6.

Gambar 2.6 Grafik persentase kehilangan berat berdasarkan waktu uji^[9].

Fenomena ini terjadi karena perbedaan morfologi antara paduan Al-11.7 % Si tanpa dan dengan penambahan Sr terhadap orientasi α -Al dendrit pada paduan ini. Dalam paduan Al-11.7 % Si non modifikasi, kristal eutektik silikon berada dalam bentuk *flakes* dan orientasi lengan dendrit α -Al adalah *disordered*. Sedangkan pada paduan Al-Si 11.7 % yang ditambahkan Sr, morfologi partikel eutektik silikonnya mengalami perubahan dari bentuk *flakes* menjadi *fibrous*, orientasi lengan dendrit α -Al adalah *orderly*^[9]. Mikrostruktur dari kedua paduan ini dapat dilihat dari hasil dari foto mikroskop optik pada Gambar 2.7.

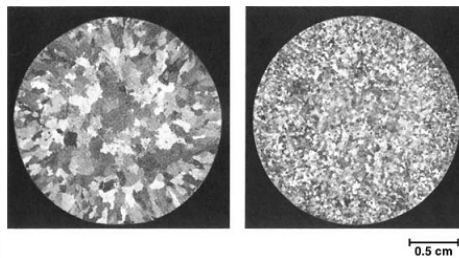


Gambar 2.7 Mikrostruktur (A) Al-11.7 % Si non modifikasi, (B) Al-11.7 % Si + Sr^[9].

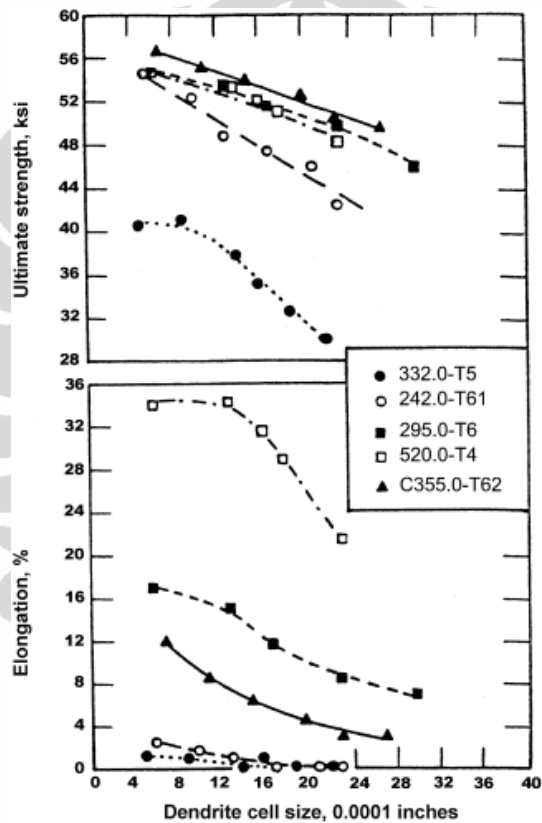
Perbedaan morfologi ini menyebabkan paduan Al-11.7 % Si lebih tahan terhadap serangan korosi dibandingkan dengan Al-11.7 % Si yang dimodifikasikan dengan Sr.

2.5.2 Pengaruh Ti Terhadap Ketahanan Korosi pada Paduan Aluminium

Bentuk dan ukuran butir dipengaruhi oleh komposisi kimia, kecepatan pembekuan serta konsentrasi dari efektifitas inti saat pembekuan. Butiran yang halus sangat diperlukan untuk mendapatkan kombinasi yang baik antara kekuatan dan keuletan dari paduan aluminium, yaitu dengan memaksimalkan luas permukaan batas butir dan menghaluskan distribusi batas butir unsur^[11]. Penghalusan batas butir dapat dilakukan dengan menambah penghalus butir (*grain refinement*) ke dalam paduan Al-Si ketika proses pengecoran. Al-Ti-B merupakan penghalus butir yang dipakai secara luas untuk paduan aluminium. Penambahan unsur penghalus butir Al-Ti-B master alloy, dalam bentuk batang ataupun serbuk akan bereaksi dengan aluminium cair membentuk kombinasi $TiAl_3$ dan TiB_2 ^[11]. Efek penghalusan butir pada paduan Al-Si terhadap bentuk butir dan keuletan pada paduan Al-Si AA 356 dapat dilihat pada Gambar 2.8 dan 2.9.



Gambar 2.8 Efek penghalus butir sebelum dan sesudah penambahan^[11].



Gambar 2.9 Pengaruh penghalusan butir terhadap keuletan paduan^[11].

Modifikasi beberapa komposisi dasar paduan Al-Si dapat membatasi tingkat pengotor pada paduan Al-Si, hal ini akan bermanfaat untuk ketahanan korosi sama baiknya dengan meningkatnya sifat mekanik tertentu termasuk kekuatan^[11]. Secara teori, penambahan Ti sebagai penghalus butir pada paduan AC4B akan meningkatkan komposisi Ti dalam paduan tersebut yang memang

sudah ada sebelumnya dengan batas maksimal 0.2 % w_t ^[17], sehingga akan membatasi tingkat pengotor dalam paduan AC4B. Dalam penelitiannya mengenai aspek polarisasi dan potensiodinamik pada aluminium - silikon tuang dalam larutan NaCl, Anil, M. *et al* melaporkan bahwa struktur dendrit yang kasar akan menurunkan ketahanan korosi pada paduan Al-Si tuang^[23]. Penambahan penghalus butir dalam paduan Al-Si tuang akan menghaluskan struktur dendrit, sehingga ketahanan korosi pada paduan akan meningkat^[23].

