

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 PADUAN ALUMINIUM TUANG

Saat ini aluminium tuang merupakan salah satu jenis paduan yang banyak dipakai dalam industri pengecoran. Aluminium diadaptasikan untuk berbagai macam metode pengecoran yang umumnya dipakai dan dapat dituang langsung kedalam cetakan logam yang terpasang pada mesin otomatis dengan volume yang besar. Terdapat beberapa karakteristik aluminium tuang yang menunjang maupun yang menghambat kualitas produk cor, karakteristik tersebut akan dijelaskan sebagai berikut.

2.1.1 Karakteristik Paduan Aluminium Tuang

Terdapat beberapa sifat dari aluminium tuang yang menunjang proses cor pada aluminium itu sendiri, yaitu sebagai berikut ^[4]:

1. Fluiditas yang baik, sehingga mampu mengisi rongga-rongga cetakan yang tipis.
2. Temperatur lebur dan tuang yang rendah dibandingkan dengan material lain sehingga energi pemanasan dapat diminimalkan.
3. Siklus penuangan yang cukup cepat, dikarenakan perpindahan panas (konduktivitas panas) dari aluminium cair ke cetakan relatif cepat jadi produktivitas dapat ditingkatkan.
4. Kelarutan gas hidrogen dalam aluminium dapat di kontrol dengan proses yang baik.

Namun, selain sifat-sifat diatas, aluminium tuang juga memiliki sifat-sifat yang kurang menguntungkan, yaitu :

1. Mudah mengikat gas hidrogen dalam kondisi cair. Hal ini dapat menyebabkan cacat porositas pada produk pengecoran.

2. Berat jenis yang rendah memudahkan aluminium tercampur dengan pengotor oksida. Misalnya Al_2O_3 yang berat jenisnya (2.1 gr/mm^3) hampir sama dengan berat jenis air (2.3 gr/mm^3).

Namun hal tersebut dapat diatasi dengan cara-cara tertentu, seperti *degassing*, *fluxing*, dan pemilihan desain yang baik dalam proses penuangannya. Karena aluminium memiliki sifat mekanis yang rendah dalam bentuk murni, maka selalu ditambahkan unsur paduan dalam proses pengecorannya. Unsur paduan yang ditambahkan ke dalam aluminium memiliki kelarutan yang berbeda-beda. Pada tabel 2.1 dapat dilihat kelarutan beberapa unsur paduan di dalam aluminium:

Tabel 2.1. Kelarutan beberapa unsur paduan di dalam aluminium^[5]

Unsur paduan	Temperatur °C	kelarutan padat maksimum pada Al, wt, %
Krom	660	0.77
Tembaga	550	5.67
Besi	655	0.052
Litium	600	4.0
Magnesium	450	14.9
Mangan	660	1.82
Nikel	640	0.05
Silikon	580	1.65
Titanium	665	1.0
Vanadium	665	0.6
Seng	380	82.8
Zirkonium	660	0.82

Dari unsur-unsur paduan di atas, terdapat lima unsur yang menjadi dasar paduan aluminium komersial, yakni seng, magnesium, tembaga, silikon dan mangan. Dalam penelitian ini digunakan jenis paduan aluminium silikon. Berdasarkan sistem penamaan yang dikeluarkan oleh *Aluminum Association* (AA) yang dipakai oleh Amerika Serikat, kelas-kelas pada aluminium dibagi berdasarkan jenis paduan yang digunakan. Untuk aluminium silikon digunakan seri

4XX.X, dengan digit pertama menunjukkan kelompok paduan, digit kedua dan ketiga menunjukkan jenis spesifikasi komposisi aluminium paduan tersebut. Digit keempat menunjukkan bentuk produk, 0 untuk spesifikasi coran, 1 untuk spesifikasi ingot dan 2 untuk spesifikasi ingot yang lebih spesifik.

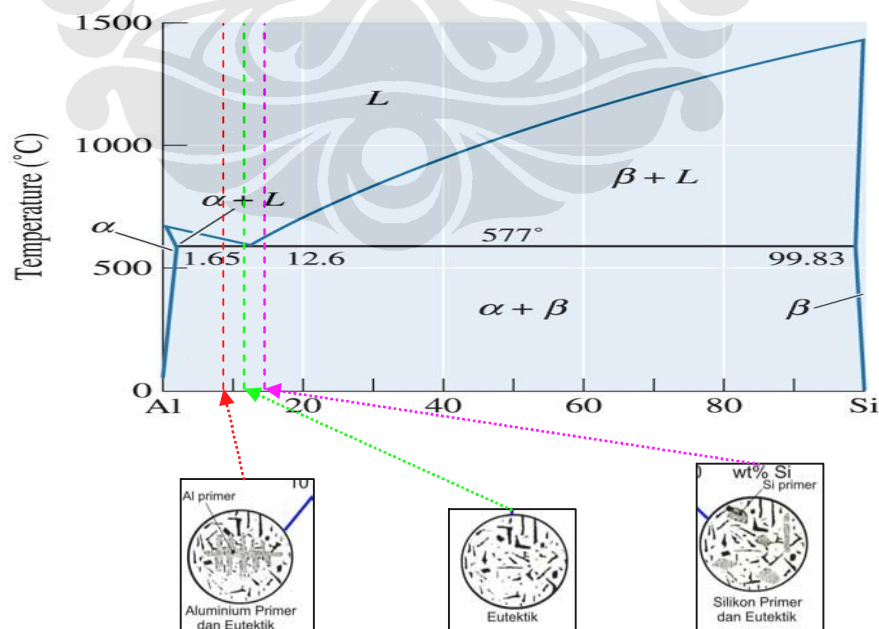
2.1.2 Paduan Aluminium Silikon

Paduan aluminium silikon (Al-Si) merupakan paduan yang paling umum digunakan untuk keperluan komersial (80-95%) dari total aluminium tuang yang diproduksi. Hal ini dikarenakan paduan aluminium silikon memiliki karakteristik cor yang sangat baik dibandingkan dengan paduan lainnya. Selain itu paduan ini memiliki variasi sifat fisik dan mekanis, seperti sifat mampu cor (*castability*), ketahanan korosi, dan sifat mampu permesinan yang baik serta sifat mampu las yang baik [6].

Paduan aluminium silikon terbagi menjadi 3 jenis berdasarkan pada konsentrasi unsur Si yang dimiliki, yaitu ;

- ◆ Hipo eutektik (< 11,7% Si)
- ◆ Eutektik (11,7 – 12.2% Si)
- ◆ Hiper eutektik (> 12.2 % Si)

Posisi ketiga jenis paduan aluminium tersebut dapat dilihat pada gambar 2.1 di bawah.



Gambar 2.1 Diagram fasa Al- Si dan mikrostruktur paduan pada komposisi hipoeutektik, eutektik, dan hipereutektik [7]

Struktur utama dari ketiga jenis paduan ini adalah berupa fasa α -Al, yang sangat kaya akan kandungan aluminium. Selain fasa α -Al, juga terdapat fasa β , yang merupakan partikel-partikel silikon yang tidak larut dalam fasa α -Al.

2.1.3 Paduan Aluminium-12%Silikon (Al-12%Si)

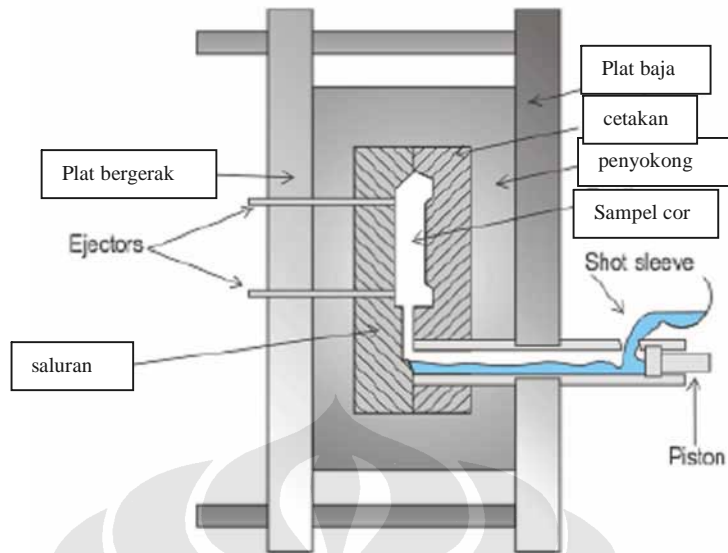
Pada komposisi eutektik, terdapat kandungan Si kurang dari 12,2%. Pada daerah ini, pembekuan terjadi melalui fasa cair-padat. Struktur akhir dari komposisi ini adalah struktur yang kaya akan aluminium, dan sebagai fasa utamanya adalah fasa α dengan struktur eutektik sebagai struktur tambahan. Paduan eutektik memiliki karakteristik seperti sifat mampu cor (*castability*) dan ketahanan korosi yang baik. Penambahan Cu akan meningkatkan kekuatan dan sifat mampu permesinan (*machinability*) namun menurunkan keuletan dan ketahanan korosi^[8].

Proses pembekuan yang berlangsung pada komposisi eutektik menyerupai proses pembekuan logam murni, dimana temperatur awal dan temperatur akhir peleburan adalah sama (*isothermal*). Komposisi ini berada pada daerah dimana paduan Al-Si dapat membeku secara langsung dari fasa cair ke fasa padatnya. Logam cair dapat langsung membeku ke fasa padat tanpa harus melalui fasa cair-padat terlebih dahulu. Adanya komposisi eutektik ini mengakibatkan paduan Al-Si memiliki karakteristik mampu cor yang baik. Komposisi ini memiliki kandungan Si sekitar 12,2%, namun jumlah ini bergantung juga pada laju pendinginannya, sehingga kandungan Si-nya akan bervariasi mulai dari 11,7% hingga 12,2%. Pada pengecoran paduan Al-Si, umumnya pembekuan melalui daerah sekitar titik eutektik^[9].

2.2 PENGECORAN CETAK TEKAN

Die casting adalah salah satu metode pengecoran dengan menggunakan cetakan logam, dan metode ini adalah cara tercepat untuk memproduksi benda *casting* dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan pengecoran dengan cetakan pasir^[10].

2.1.1 Proses *High Pressure Die Casting* (HPDC)



Gambar 2.2 skematis mesin HPDC^[11]

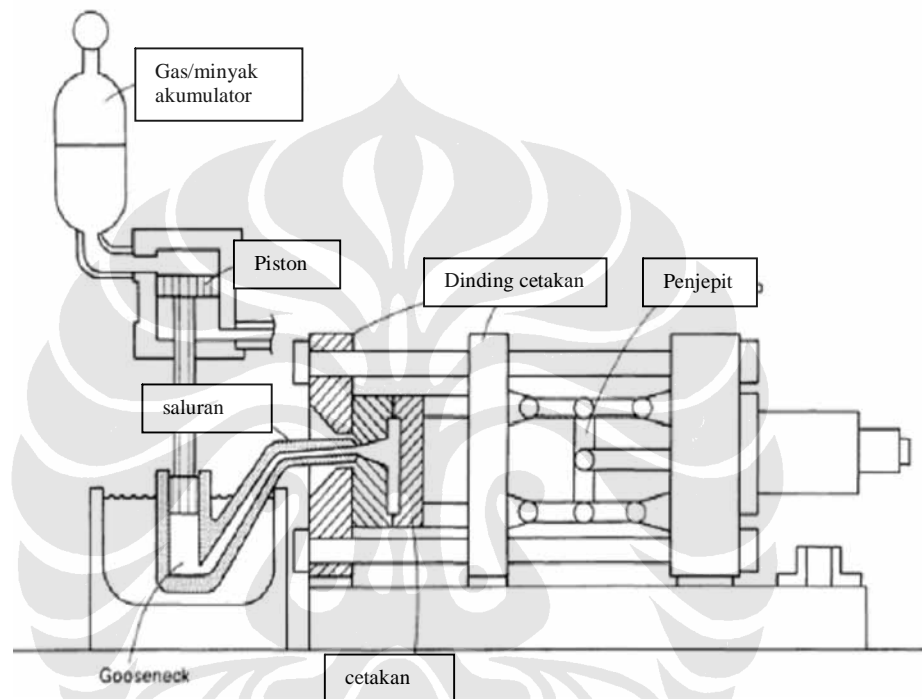
Proses ini merupakan proses pengecoran dimana logam cair diinjeksikan ke dalam rongga cetakan (*die*) dengan kecepatan dan tekanan tinggi. Tekanan yang diaplikasikan cukup tinggi (dapat mencapai 200 bar), sehingga gas-gas yang masih terperangkap dalam logam cair dapat keluar pada saat proses injeksi logam cair ke dalam cetakan. Pada umumnya, baik mesin maupun cetakan pada proses *high pressure die casting* ini sangatlah mahal, sehingga proses ini akan bernilai ekonomis untuk proses produksi dalam jumlah besar^[12].

Mesin *high pressure die casting* terdiri atas 2 plat vertikal dimana *bolster* ditempatkan untuk menyanggah cetakan. Salah satu plat dapat digerakkan sehingga cetakan dapat dibuka dan ditutup. Sejumlah logam dituang ke dalam *shot sleeve* dan kemudian dimasukkan ke dalam cetakan menggunakan piston yang digerakkan secara hidrolik. Sesaat logam membeku, cetakan terbuka dan benda coran diambil.

Berdasarkan klasifikasinya, maka mesin untuk proses *high pressure die casting* ini dapat dibagikan menjadi dua, yaitu ruang panas (*hot chamber*) dan ruang dingin (*cold chamber*). Perbedaan pokok antara kedua cara tersebut terletak pada penempatan tungku peleburan.

• Proses ruang panas (*hot chamber*)

Proses ini ditemukan oleh H.H Doehler dan biasa digunakan untuk material yang memiliki titik lebur yang rendah seperti seng (Zn), timbal (Pb), magnesium (Mg), timah (Sn) untuk mengurangi resiko terjadinya pembekuan terlalu cepat. Pada proses mesin cetak ruang panas, tungku peleburan terdapat pada mesin dan menempatkan sistem injeksi yang kontak langsung dengan logam cair. Proses ini meminimalisir paduan logam cair terhadap turbulensi, oksidasi udara, dan hilangnya panas (*heat loss*) selama proses injeksi.



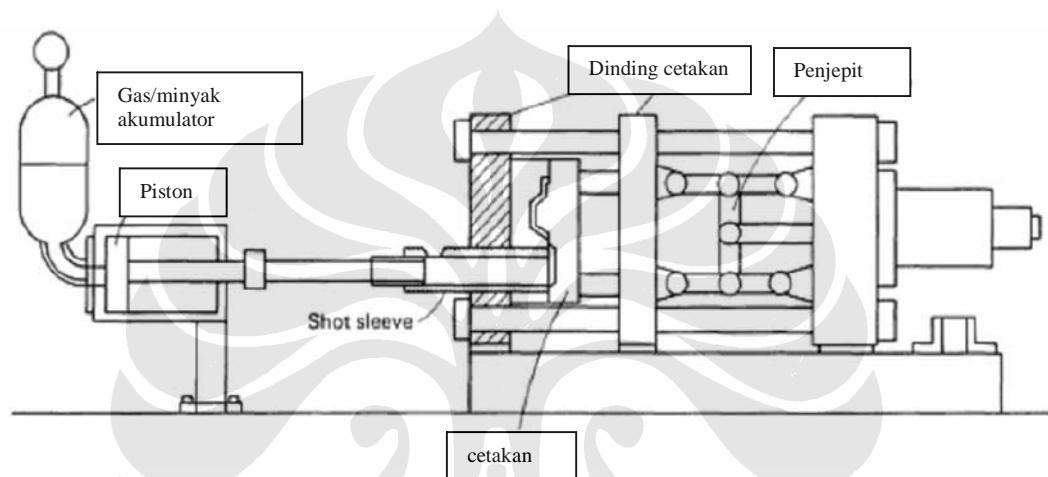
Gambar 2.3 mesin HPCD dengan ruang panas^[13]

Kekurangan dari proses *hot chamber* ini adalah biaya perawatan sistem yang tinggi dan kemungkinan terjadinya kontaminasi logam cair oleh kontainer atau sebaliknya yaitu terabrasinya kontainer oleh logam cair, hal ini akan sangat merugikan karena dapat mengurangi umur pakai mesin dan dapat menyebabkan *reject* pada produk yang dihasilkan.

Pada pengecoran *die casting* dengan menggunakan material logam cair aluminium proses ini tidak digunakan, karena kontainer yang biasanya terbuat dari material besi (Fe), akan sangat merusak produk yang dihasilkan jika aluminium cair yang digunakan sampai terkontaminasi oleh Fe. Hal ini dapat menurunkan keuletan, mampu cor, *shock resistance* dan mampu mesin produk.

- **Proses ruang dingin (*cold chamber*)**

Proses ini mempunyai tungku peleburan terpisah, silinder injeksi diisi logam cair, kemudian ditekan ke dalam cetakan secara hidrolis. Proses ini memerlukan pengukur untuk menentukan jumlah logam cair yang dimasukkan ke dalam cetakan, selain itu proses injeksi harus dilakukan dalam waktu yang sesingkat mungkin sehingga kontak antara logam cair dan sistem injeksi hanya terjadi dalam waktu singkat. Hal ini memungkinkan paduan dengan temperatur lebur tinggi seperti aluminium (Al), tembaga (Cu) dan beberapa paduan besi lainnya dapat diproses dengan menggunakan mesin ruang dingin.



Gambar 2.4 Mesin HPDC dengan ruang dingin^[14]

2.1.2 Material Cetakan Die Casting

Pada penelitian ini, digunakan baja perkakas H13 *as anneal* sebagai material cetakan. Baja AISI H13 adalah jenis baja yang dikenal luas pemakaiannya untuk proses pengerjaan temperatur tinggi seperti cetakan pada proses pengecoran cetak tekan (*die casting*), *mould* dan silinder untuk proses dari plastic serta berbagai penggunaan lainnya^[15].

Paduan utama dari baja jenis ini adalah unsur Cr yang menyebabkan tingginya daya tahan terhadap reaksi logam cair. Adanya unsur vanadium sebesar 1% mempunyai efek mencegah terjadinya pertumbuhan butir dan menaikkan sifat tahan baja terhadap efek pelunakan pada temperatur operasi. Adanya unsur lain seperti molybdenum dapat menaikkan sifat kemampukerasan dari baja perkakas tersebut^[16].

Tabel 2.2. Komposisi Kimia H13 Tool Steel^[17]

JS	AISI	VDEH	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V	Co
SKD61	H13	X40CrMoV51	0.32-0.42	0.8-1.2	0.5 max	0	4.5-5.5	1-1.5	0	0.8-1.2	0

Kekerasan adalah sifat yang harus dimiliki oleh baja perkakas sehingga baja perkakas tersebut harus mampu untuk tidak mengalami perubahan bentuk atau distorsi dan kerusakan lain akibat kekerasan perkakas lebih rendah dari kekerasan benda kerja karena penggunaan baja perkakas tersebut yang berulang kali. Data nilai kekerasan dari H13 dalam kondisi annealed dan heat treated dapat dilihat pada tabel 2.3 dibawah ini^[18].

Tabel 2.3 Sifat mekanik H13 Tool Steel pada temperatur ruang^[19]

Kondisi	HRC	Ultimate Strength		Yield Strength		Elongation in 2" (%)	Reduction Area (%)
		Psi	Mpa	Psi	Mpa		
Aneal	15	97000	668.8	54000	372.3	32	66
Heat treatment	46	218000	1503.1	204000	1406.6	13	47
Heat treatment	51	281000	1937.5	250000	1723.8	5	10

Sifat yang diharapkan dari baja ini adalah daya tahan terhadap deformasi pada temperature operasi, daya tahan terhadap kejutan termal dan mekanis (terutama bila dilakukan pendinginan air), tahan aus dan erosi pada temperature tinggi, tahan terhadap deformasi perlakuan panas, tahan terhadap kelelahan panas yang menyebabkan *heat cracking* (retak halus pada permukaan cetakan logam). Selain itu, H13 juga mempunyai ketahanan yang baik terhadap fatik termal. Ketahuannya terhadap fatik termal, erosi dan keausan membuat material ini dipilih sebagai material cetakan untuk aluminium dan magnesium *die casting*.

2.3 FASA INTERMETALIK PADUAN Al-Si

2.3.1 Pembentukan Fasa Intermetalik Hasil *Die Soldering*

Lapisan intermetalik ($Al_xFe_ySi_z$) terbentuk pada permukaan cetakan ketika logam cair (aluminium) kontak langsung dengan cetakan (baja H13). Morfologi dari lapisan intermetalik tergantung pada komposisi logam cair dan cetakan, temperatur logam cair dan waktu kontak

Lapisan yang terbentuk merupakan hasil dari proses difusi dimana atom besi berdifusi keluar dari cetakan (baja) menuju aluminium cair. Lapisan

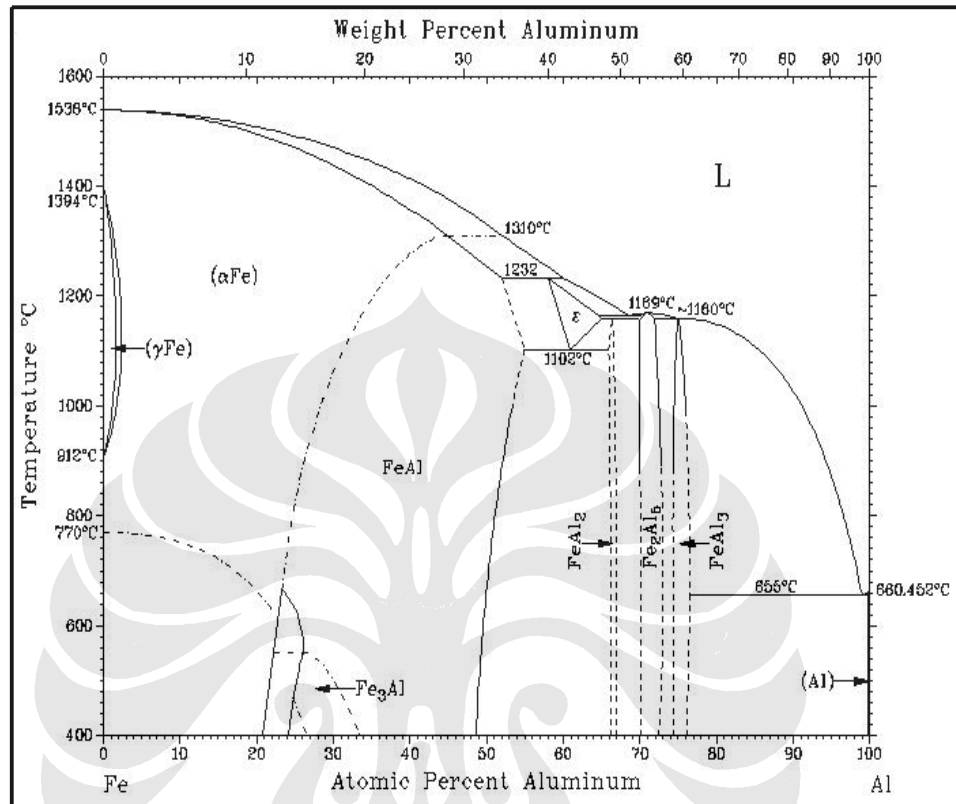
intermetalik dapat terbentuk pada permukaan cetakan melalui dua cara, yaitu *solid-state diffusion* atau reaksi dan difusi ke dalam logam cair^[20]. *Solid-state diffusion* terjadi ketika aluminium yang berasal dari logam cair lewat jenuh mengendap/menempel pada cetakan baja. Difusi aluminium-besi dalam keadaan solid (*solid-state diffusion*) dipengaruhi oleh temperatur dan konsentrasi. Difusi ini berlangsung secara lambat dan karenanya tidak sesuai dengan proses cetak tekan (*die casting*) dimana siklus injeksi berlangsung dalam milisekon. Di sisi lain, reaksi kimia dan difusi ke dalam logam cair memiliki waktu proses yang relatif singkat, dan ini merupakan mekanisme yang dominan terjadi pada pembentukan intermetalik dan *soldering*. Pergerakan dari difusi padat-cair menghasilkan pengurangan massa atau pelarutan.

Dalam penelitian G. B. Winkelman et al^[21], lapisan intermetalik hasil die soldering dikarakterisasikan menjadi beberapa lapisan, yaitu : *compact intermetallic layer* yang bersifat solid, kemudian lapisan kedua disebut *broken intermetallic layer* dan *floating intermetallic layer* yang bersifat semi solid, dan *Reaction Zone Boundary (RZB)*. *Compact intermetallic layer* adalah lapisan intermetalik yang mengalami kontak langsung dengan permukaan baja H13, kemudian lapisan intermetalik yang berbatasan dengan *compact intermetallic layer* adalah *broken intermetallic layer* dimana lapisan ini memiliki kepadatan yang lebih rendah daripada *Compact intermetallic layer*. Kemudian terdapat lapisan tipis selanjutnya yang mengandung banyak partikel-partikel individu intermetalik dan dibatasi oleh *Reaction Zone Boundary*, disebut *floating intermetallic layer*.

Walaupun Fe sangat larut dalam aluminium cair dan paduannya, Fe memiliki tingkat kelarutan yang sangat rendah pada aluminium yang telah membeku (~0,05% wt% pada kesetimbangannya), dan Fe cenderung untuk berkombinasi dengan unsur lain untuk membentuk fasa intermetalik dalam berbagai jenis. Sebagai hasilnya, hampir semua Fe di dalam paduan aluminium. Terdapat dalam jenis berbeda dari fasa kedua intermetalik diantara butir aluminium^[22].

Senyawa intermetalik Al-Fe terdiri dari beberapa jenis, yaitu: γ -Fe, FeAl, Fe₃Al, Fe₂Al₃, FeAl₂, Fe₂Al₅ dan FeAl₃. Senyawa intermetalik Al-Fe yang

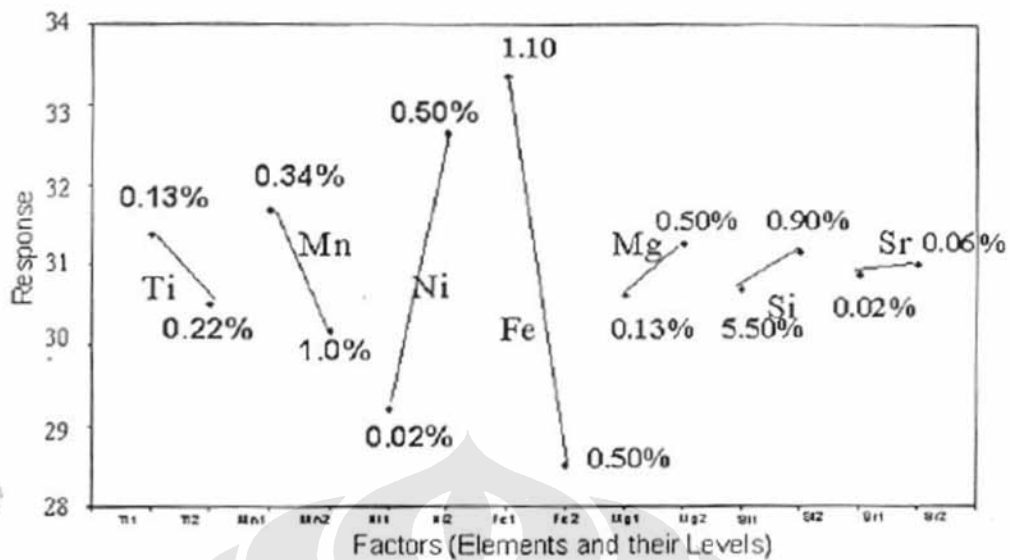
terbentuk bergantung pada temperatur dan komposisi dari unsur besi dan aluminiumnya. Untuk mengidentifikasinya dapat menggunakan diagram fasa Al-Fe dibawah ini ;



Gambar 2.5. Diagram fasa Al-Fe^[23]

2.3.2 Unsur-unsur Yang Mempengaruhi Pembentukan Fasa intermetalik Selama Pembekuan

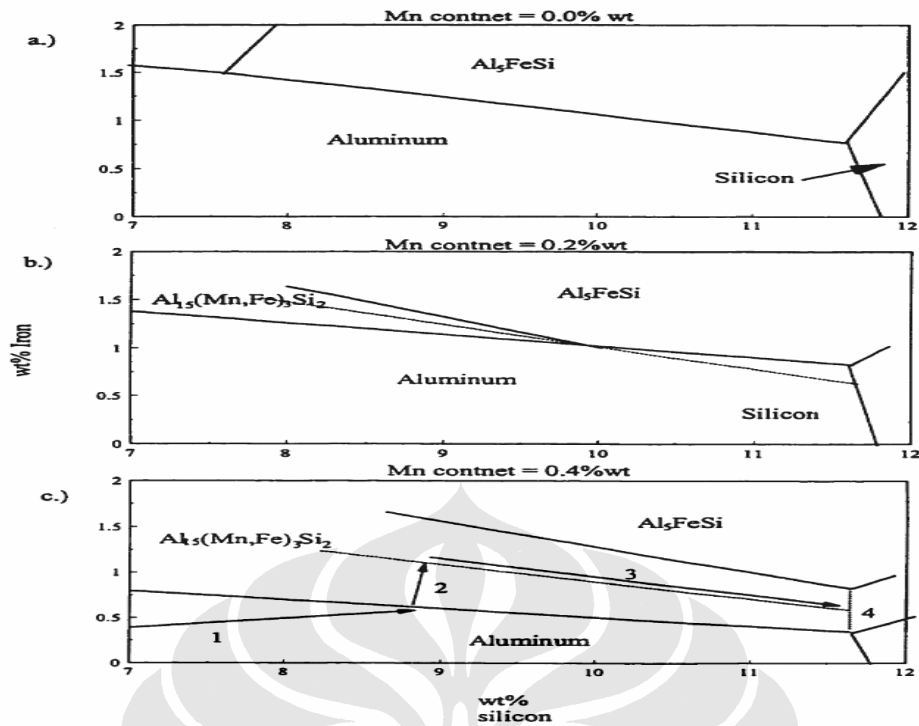
Fasa intermetalik merupakan fasa kedua yang mengendap pada struktur mikro pada paduan aluminium tuang, yang terbentuk sebagai akibat dari komposisi kimia yang melebihi batas kelarutannya. Fasa intermetalik terbentuk karena adanya unsur paduan atau pengotor pada suatu paduan aluminium. Keberadaan fasa ini sangat dipengaruhi oleh komposisi dan mekanisme pembekuan yang terjadi.



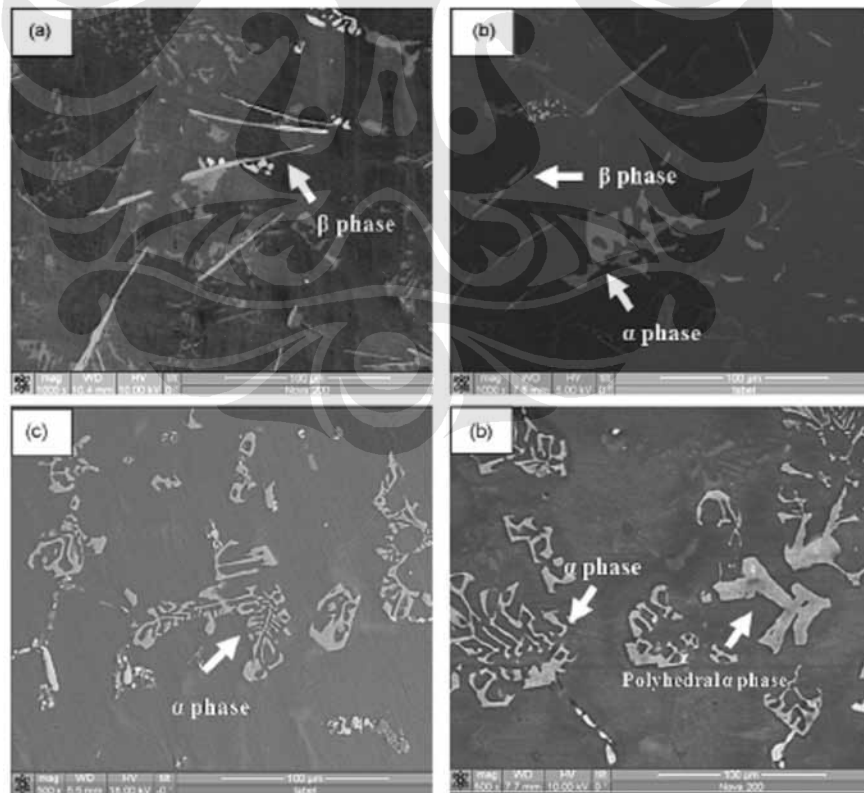
Gambar 2.6 Pengaruh unsur paduan dan kadarnya pada aluminium ^[24].

Pada gambar 2.6 dijelaskan pengaruh unsur dan kadarnya pada paduan aluminium. Kemiringan positif mengindikasikan bahwa penambahan unsur akan memicu timbulnya *soldering* sementara kemiringan negatif mengindikasikan hal yang sebaliknya. Jika kemiringan semakin besar, semakin besar pula pengaruh unsur pada pertumbuhan dari lapisan intermetalik. Dengan kata lain, peningkatan kadar nikel pada paduan aluminium akan meningkatkan ketebalan lapisan intermetalik dan kecenderungan terjadinya *soldering*. Sementara itu, penambahan besi, mangan dan titanium membantu menghindari terjadinya *soldering*.

Pengaruh Mn juga dijelaskan pada gambar 2.7 dibawah. Pada gambar tersebut, tampak dengan adanya unsur Mn pada paduan ini akan mengubah garis kesetimbangan yang ada. Pada gambar 2. 7. a, tanpa adanya penambahan Mn akan menyebabkan terbentuknya fasa β -AlFeSi meskipun pada kadar Fe yang cukup rendah. Ambil contoh pada 1.0 % Fe dan pada 11.0 % Si. Pada komposisi ini, akan terbentuk fasa monoklinik β -AlFeSi yang dapat menurunkan sifat mekanis dari paduan. Sementara pada gambar 2. 8, dengan adanya Mn yang cukup tinggi, maka *monoclinic* β -AlFeSi akan berubah menjadi fasa *cubic* α -AlFeMnSi, sehingga sifat mekanis dari paduan tidak serapuh pada paduan yang tanpa Mn^[25].



Gambar 2.7. Perubahan diagram fasa Al-Fe-Si pada penambahan Mn (a) 0 %, (b) 0.2 % Mn, dan (c) 0.4 % Mn^[26]



Gambar 2.8. Mikrostruktur SEM pada tipe paduan Aluminium 319 setelah dilakukan heat treatment T6 (a) Mn02, (b) Mn 30, (c) Mn 65 dan (d) Mn 85^[27]

Selain paduan-paduan utama diatas, pada tabel 2.5 dibawah dijelaskan tentang pengaruh penambahan elemen paduan terhadap ketebalan lapisan antara pada fenomena *die soldering*.

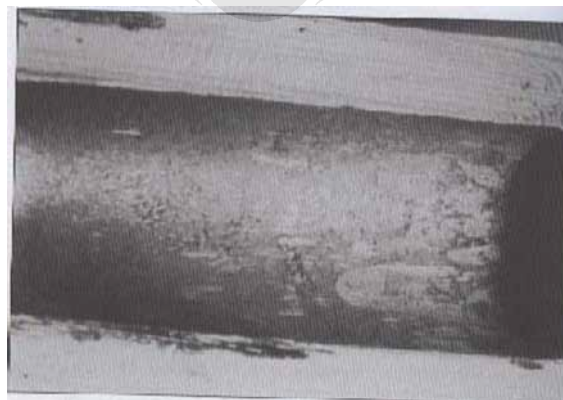
Tabel 2.4 Pengaruh berbagai unsur elemen paduan terhadap ketebalan lapisan antara dalam *die soldering*^[28]

Elemen	Jumlah	Pengaruh
Nikel	0.50%	Ketebalan meningkat sekitar 50% pada 720-730°C
Mangan	1-3%	Ketebalan meningkat sekitar 50% pada 720-730 °C
Berilium	0.3-2%	Ketebalan berkurang sekitar 7%
Tembaga	-	Tidak berpengaruh
Nitrogen bebas	0.002-0.0055%	Ketebalan berkurang hingga 70%
Cromium	2-20%	Ketebalan berkurang hingga 60%
Titanium	0.10%	Ketebalan berkurang hingga 85%
Silikon	-	Ketebalan berkurang jika kandungan Si meningkat

2.4 FENOMENA DIE SOLDERING

2.4.1 Definisi *Die Soldering*

Kerusakan cetakan pada industri *die casting*, terutama disebabkan karena *die soldering*, yaitu ketika aluminium cair melekat pada permukaan cetakan dan meninggalkan bekas setelah dikeluarkan dari cetakan. Merupakan suatu tantangan pada industri ini untuk meminimalisir waktu dari proses pengecoran sehingga produktivitas meningkat dan biaya produksi menurun. *Die soldering* merupakan penghalang terhadap tantangan tersebut karena dapat menyebabkan perbaikan dan penggantian cetakan sehingga produktivitas proses menurun.



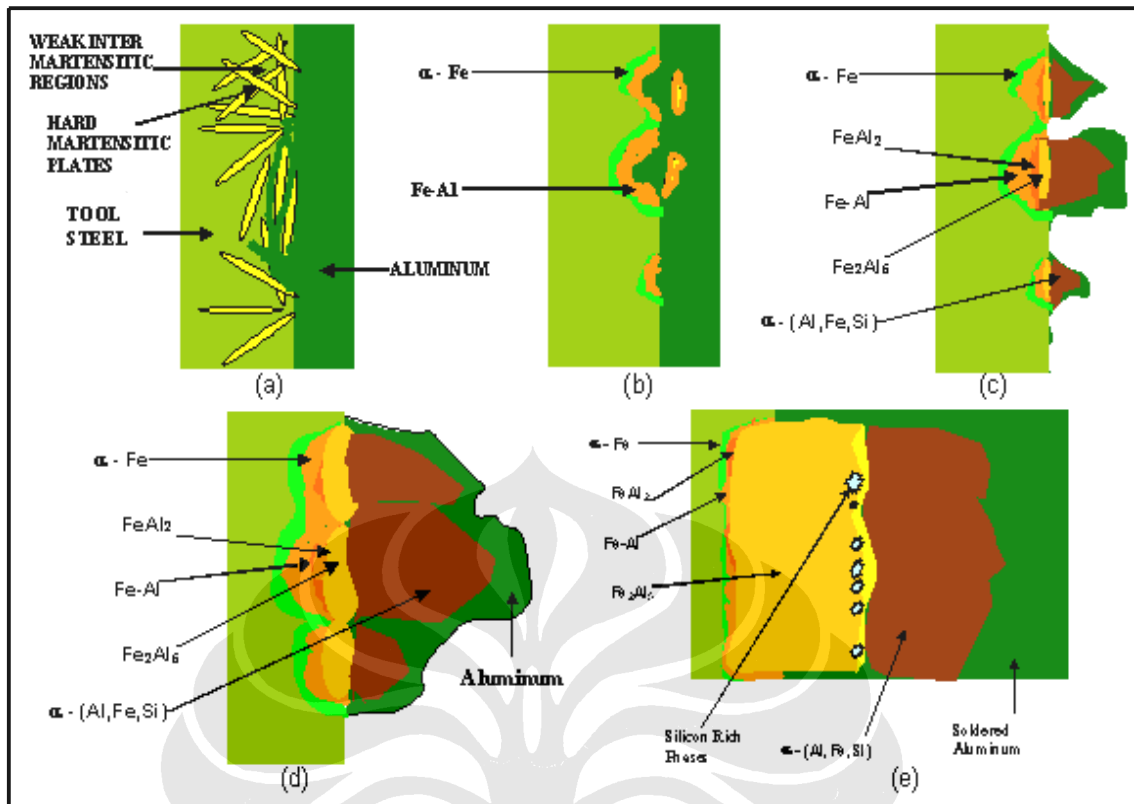
Gambar 2.9 Contoh *die soldering* yang terjadi pada cetakan aluminium^[29]

Soldering atau *die sticking* terjadi pada *die casting* ketika aluminium cair melekat pada permukaan cetakan sehingga mengakibatkan kerusakan cetakan dan rendahnya kualitas permukaan komponen. *Die soldering* merupakan hasil dari reaksi yang terjadi pada permukaan antara aluminium cair dan cetakan selama aluminium cair memasuki cetakan pada temperatur tinggi. Oleh sebab itu, aluminium cair akan kontak langsung pada permukaan cetakan. Selanjutnya besi yang terkandung pada cetakan larut ke dalam aluminium cair dan membentuk lapisan intermetalik.

Pada *soldering*, lapisan terjadi pada level atomik sehingga sulit dicegah. Afinitas aluminium terhadap besi tinggi, sehingga reaksi kimia akan terjadi pada permukaan cetakan ketika aluminium cair kontak langsung dengan cetakan. Reaksi ini menghasilkan senyawa intermetalik aluminium silikon pada permukaan cetakan sehingga komponen (benda cor) melekat pada lapisan intermetalik ini. Berdasarkan literatur, *soldering* lebih sering terjadi di sekitar saluran (*gate*) yang disebabkan tingginya temperatur dan kecepatan aluminium cair masuk ke cetakan^[30].

2.4.2 Mekanisme *Die Soldering*

Mekanisme terjadinya *soldering* hanya bergantung pada difusi dan reaksi kimia dari elemen yang terdapat pada cetakan dan logam cair. *Soldering* merupakan reaksi difusi – besi yang terkandung pada cetakan, masuk ke dalam aluminium cair, bereaksi membentuk lapisan intermetalik.



Gambar 2.10 . Mekanisme terbentuknya die soldering^[31]

Keterangan :

- a. Serangan awal pada batas butir oleh aluminium, membentuk pitting pada permukaan die.
- b. Pembentukan fasa intermetalik Fe-Al didalam pit dan disekitar butir yang rusak dekat permukaan die.
- c. "Pyramid" tumbuh pada fasa (Al,Fe,Si), pit berekspansi dan menjadi lebih dalam. Aluminium mulai menempel setelah lapisan tipis ini terbentuk akibat terjadinya *soldering*.
- d. Pertumbuhan lapisan intermetalik dan menyatukan pit disebelahnya. Aluminium cair menyentuh permukaan die melalui retakan dan pit.
- e. Memperkuat pit dan menutup gap antara pit. Rasio antara ketebalan lapisan intermetalik dan aluminium yang menempel adalah ~1:5. Mekanisme reaksinya menjadi sangat lambat. Silikon diendapkan pada batas butir fasa Fe₂Al₅ dan pada batas antara dua lapisan intermetalik.

Gambar 2.10 menunjukkan skema mekanisme die soldering secara mikrostruktural pada aluminium die casting. Mekanisme terjadinya die soldering ini terdiri dari enam tahapan proses, yaitu^[32] :

1. Erosi batas butir pada permukaan cetakan

Aluminium cair kontak dengan permukaan cetakan secara berulang pada setiap siklus pengecoran. Ketika proses pengecoran, aluminium cair menyerang daerah yang lebih lemah dari permukaan cetakan. Daerah lemah ini berada diantara hard martensitic plates dan partikel karbida yang merupakan daerah intergranular. Ketika aluminium cair mengerosi daerah lemah pada permukaan cetakan, akan terbentuk solid solution primer dari Fe oleh aluminium cair. Fasa solid solution ini direpresentasikan dengan α -Fe. Ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 2.10.(a).

2. Pembentukan celah kecil (pit-pit) pada permukaan cetakan

Mula-mula batas butir dan fasa yang lemah pada permukaan cetakan diserang oleh aluminium, sehingga terbentuk lubang yang hemispherical.

3. Pembentukan Senyawa Fe-Al

Aluminium bereaksi dengan permukaan butir yang lemah, dan pada permukaan terbentuk pit yang memiliki kandungan fasa biner Fe-Al seperti FeAl, FeAl₂, Fe₂Al₃, dan FeAl₃. Pembentukan lapisan senyawa biner ini disebabkan oleh reaksi dari setiap fasa dengan aluminium cair secara kontinu dan Fe berdifusi keluar dari permukaan.

4. Pembentukan Struktur Piramid dari Fasa Intermetalik

Fasa AlFe₃ bereaksi dengan Al dan Si pada molten sehingga membentuk Fasa FeAl fasa ternary -(Al, Fe, Si). Lapisan intermetalik yang terjadi selama tahapan ini, mempunyai morfologi seperti pyramid. Hal ini dikarenakan pertumbuhan radial dari fasa intermetalik keluar dari pit pada permukaan cetakan. Fasa ternary mempunyai ketebalan yang lebih tinggi dibandingkan fasa lain. Karena volume aluminium cair berlebih, maka reaksi antara fasa intermetalik dan molten mendominasi difusi Fe dari permukaan cetakan. Bagaimanapun, keseluruhan tebal dari lapisan intermetalik pada permukaan cetakan dikontrol dengan difusi Fe dari permukaan cetakan. Silikon dan unsur minor lainnya (Cr, Mn, V, dll.) dari cetakan dan aluminium cair membentuk endapan pada batas butir dari fasa

intermetalik FeAl . Silikon berukuran besar yang kaya akan presipitat juga ditemukan pada butir antara fasa biner dan ternary. Zn membentuk presipitat pada batas butir dari lapisan fasa ternary $-(Al, Fe, Si)$. Ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 2.10.(c).

5. Penggabungan struktur piramid dari fasa intermetalik yang ada pada permukaan cetakan

Reaksi yang terakhir antara Fe dan Al cair adalah fasa ternary $-(Al, Fe, Si)$. Setelah lapisan intermetalik berbentuk pyramid terbentuk pada permukaan cetakan, kelebihan Al akan menempel pada lapisan ini, lihat Gambar 2.9.(c). Penempelan awal disebabkan oleh penahanan reaksi antara Fe, Al cair, dan pengaruh energi permukaan dari lapisan intermetalik terhadap Al cair. Alasan mungkin lain untuk penempelan Al ke pyramid ini adalah karena konduktivitas termal yang rendah dari lapisan fasa intermetalik dibandingkan dengan permukaan cetakan. Oleh karena itu, ketika benda hasil cor telah memadat dan siap untuk dikeluarkan dari cetakan, molten disekitar lapisan intermetalik membeku. Hasilnya terjadi penempelan (sticking). Selanjutnya lapisan fasa intermetalik yang terbentuk tumbuh keluar dari erosion pits, dan akhirnya bagian dari aluminium yang membentuk lapisan intermetalik ini tersisa pada permukaan cetakan setelah produk casting dikeluarkan dari cetakan.

6. Penggabungan dan Penguatan serta Erosion Pits dari Fasa Intermetalik

Pada tahap ini, erosion pits melebar dan bersatu satu sama lainnya, sehingga menghasilkan straightening dari pit. Mula-mula lapisan initial dari lapisan intermetalik terbentuk disebelah pits, pits berhenti tumbuh kedalam permukaan baja dan tumbuh parallel pada permukaan die. Ketika pits mulai bersatu satu sama lainnya, supply dari Al cair ke permukaan baja terbatas ke gaps dan crack diantara lapisan intermetalik tumbuh keluar dari pits.

2.4.3 Parameter Yang Mempengaruhi Die Soldering

Beberapa hal yang dapat mempengaruhi terjadinya die soldering, antara lain^[33] :

1. Temperatur logam cair dan cetakan

Temperatur dari logam cair dan permukaan cetakan memegang peranan penting dalam menyebabkan *die soldering*. Tingginya temperatur cetakan dan

logam cair akan menurunkan kekerasan dan ketahanan aus sehingga cetakan akan mudah tererosi. Temperatur yang tinggi, baik untuk pertumbuhan fasa intermetalik karena laju difusi atom-atom besi dan aluminium meningkat. Oleh sebab itu, tingginya temperatur logam cair mempermudah terjadinya *soldering*^[34]. Tingginya temperatur juga akan merusak lapisan pelumas sehingga menurunkan kemampuannya untuk mencegah *soldering*. Oleh sebab itu, temperatur logam cair dan permukaan cetakan yang tinggi dapat menyebabkan terjadinya *soldering*. *Hot spot* juga harus dihindari pada permukaan cetakan atau dalam inti. Menurut Shankar^[35] menjaga temperatur logam cair konstan pada ~ 663°C (1225°F) dapat meminimalisir kemungkinan terjadinya *hot spot* pada logam cair. Temperatur pemanasan awal (*pre-heat*) cetakan harus antara 570°F dan 625°F. Temperatur logam dan cetakan juga jangan terlalu rendah karena dapat menyebabkan pengisian buruk dan terjadi *cold solder*.

Menurut Q.Han^[36], pembentukan fasa *liquid* merupakan kunci untuk terjadinya *soldering*. Jika fraksi *liquid* sangat kecil, maka ikatan antara cetakan dan logam cair lemah sehingga proses pengeluaran benda coran (*eject*) mudah dilakukan. Jika T_C merupakan temperatur dimana fasa *liquid* dapat terbentuk pada permukaan cetakan, maka kondisi dimana *soldering* dapat terjadi adalah

$$T_D > T_C$$

dimana T_D merupakan temperatur permukaan cetakan dan dipengaruhi oleh perpindahan panas (*heat transfer*) antara benda coran dan cetakan, temperatur tuang, geometri/bentuk benda coran dan cetakan.

Pada aluminium murni dan paduan aluminium 380, fraksi liquid meningkat seiring dengan peningkatan T_D . Hal ini mengindikasikan *soldering* lebih mudah terjadi pada temperatur tinggi.

2. Sifat dan karakteristik dari logam paduan dan lapisan intermetalik

Berdasarkan literatur, dapat disimpulkan bahwa pembentukan lapisan intermetalik murni berdasarkan difusi dan reaksi kimia dari elemen yang ada pada cetakan dan logam cair. Setiap jenis paduan aluminium memiliki kecenderungan berbeda terhadap *soldering*. Menurut Kajoch^[37], aluminium menunjukkan

kecenderungan yang kuat untuk melekat pada besi. Pada penelitiannya, dia menunjukkan adanya lapisan antara (*intermediate*) yang terdiri dari zona-zona senyawa intermetalik seperti Fe_2Al_5 , Fe_3Al and $FeAl_3$. Kajoeh juga menyebutkan bahwa kecenderungan terjadinya *soldering* pada aluminium primer adalah yang paling mungkin terjadi, diikuti oleh paduan Al-Mg, paduan hipoeutektik Al-Si, Al-Si-Cu, dan eutektik Al-Si, yang paling kecil kemungkinan mengalami *soldering*. Hal ini terjadi karena adanya silikon dalam jumlah yang banyak dalam aluminium yang dapat menurunkan laju lapisan intermetalik.

3. Pelumasan cetakan dan *coating*

Tujuan utama diaplikasikannya pelumas atau *coating* adalah untuk membuat sebuah pemisah antara logam cair dan permukaan cetakan. Hal ini akan mengurangi kecenderungan terjadinya *soldering* dengan mencegah kontak antara logam cair dan cetakan. Agar pemisahan logam cair dari permukaan cetakan berlangsung efektif, maka pelumas harus membentuk lapisan film pada permukaan cetakan. Lapisan ini harus benar-benar melekat pada permukaan cetakan dan cukup kuat untuk menahan serangan dari panas yang berasal dari logam cair. Selain itu, lapisan ini harus *uniform* dan menutupi seluruh permukaan, terutama di daerah dimana *soldering* biasa terjadi. Pelumas biasanya akan rusak pada temperatur tinggi. Ketika pelumas rusak pada daerah tertentu, kemungkinan terjadi pada daerah dimana kecepatan logam cair tinggi seperti bagian yang tipis atau saluran (*gate*), aluminium cair akan melekat pada permukaan cetakan. Ketika terjadi *hot spot* pada cetakan, energi permukaan dari material pelumas cenderung meningkat dan karenanya, menyebabkan pelumas terlepas dari cetakan dan mengalir ke daerah yang temperturnya lebih rendah. Permukaan cetakan yang tidak terlindungi oleh pelumas ini akan kontak langsung dengan logam cair dan menghasilkan *soldering*.

3. Kondisi cetakan dan parameter operasi

Pembentukan lapisan tipis *soldering* akan memperkasar daerah pada permukaan cetakan, dan kekasaran ini memicu *soldering* terjadi. Sekali *soldering* terjadi, pembentukan lapisan paduan aluminium di atas lapisan tersolder terjadi secara cepat. Hal ini disebabkan konduktivitas termal yang buruk dan kekerasan dari daerah yang tersolder pada cetakan.