

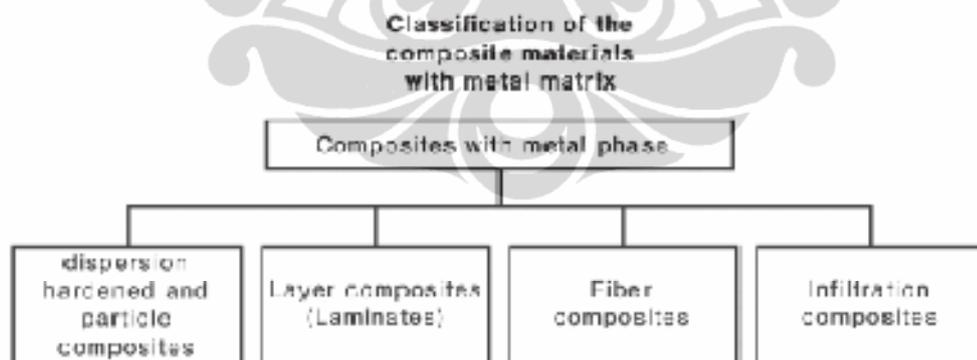
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. KOMPOSIT MatriK LOGAM

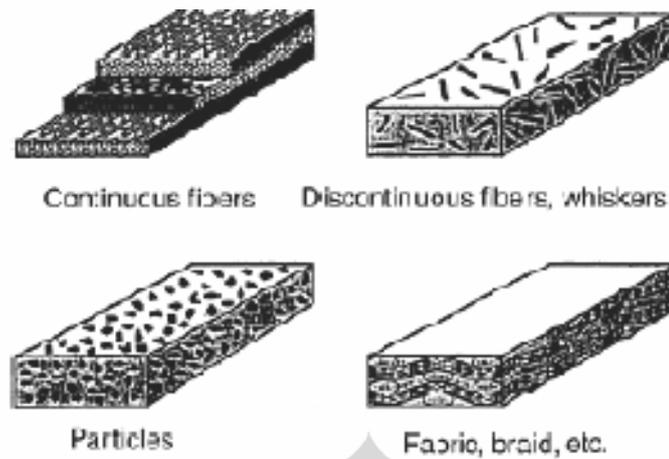
Komposit adalah perpaduan dalam skala makroskopis dari dua atau lebih material yang memiliki fasa berbeda, dipilih berdasarkan kombinasi fisik masing-masing material penyusun untuk menghasilkan material baru dengan sifat yang unik dibandingkan sifat dasar material sebelum dicampur dan terjadi ikatan permukaan antara material penyusun¹². Komposit terdiri dari dua penyusun, yaitu matrik dan penguat. Matriks adalah komponen penyusun dengan fraksi volume terbesar. Penguat adalah komponen yang dilingkupi oleh matrik, berfungsi sebagai penahan beban utama.

Komposit matrik logam dapat diklasifikasi dengan beberapa cara. Salah satu klasifikasi adalah berdasarkan jenis dan kontribusi komponen penguat (*reinforce*) yang dapat berupa partikel, layer, fiber dan penetrasi material komposit.



Gambar 2.1 Klasifikasi komposit matrik logam¹²

Klasifikasi lebih lanjut dari bentuk penguat dapat dilihat pada gambar 2.2.

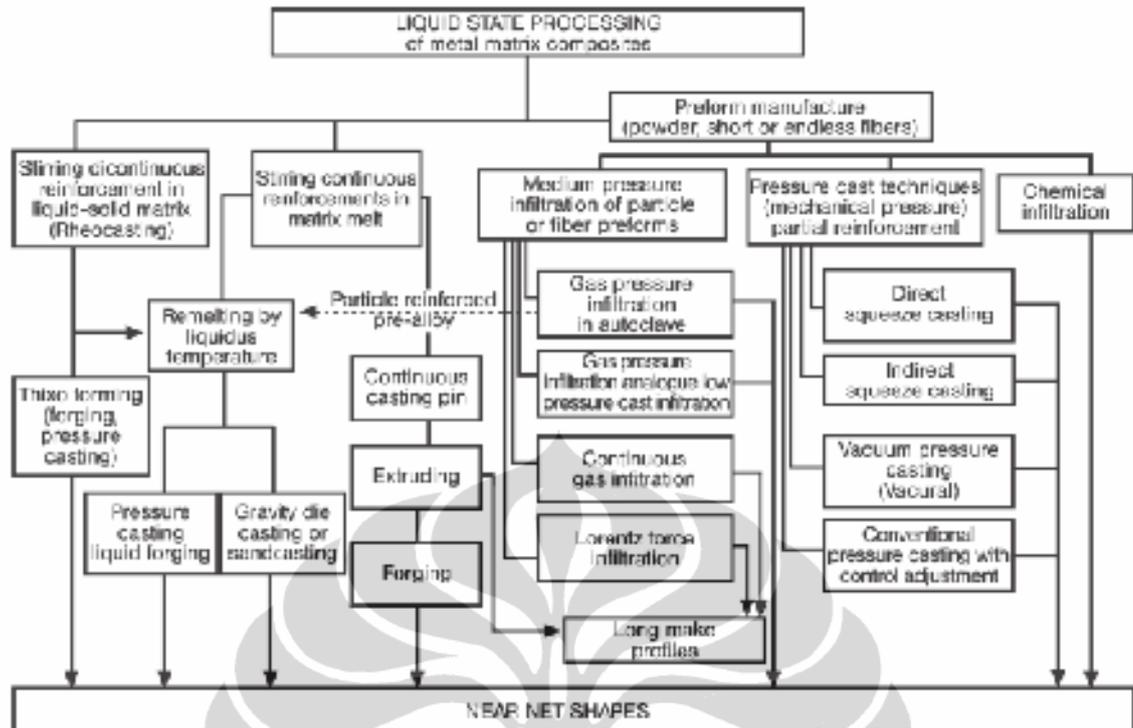


Gambar 2.2 Bentuk umum penguat *fiber*, dapat berupa *straight continuous fibers*, *discontinuous fiber* atau *whiskers*, *particles* atau *flakes*, atau *continuous fibers* yang dianyam.¹²

Untuk mendapatkan komposit matrik logam yang ringan dan unggul dalam aspek sifat material maka pilihan material matrik dan penguat harus disesuaikan. Material penguat diharapkan memiliki sifat :

- Densiti rendah
- Kesesuaian sifat mekanis
- Kesesuaian sifat kimia
- Stabilitas termal
- Modulus Young tinggi
- Kekuatan tarik dan tekan tinggi
- Mudah diproses
- Ekonomis

Hampir seluruh sifat diatas hanya dapat terpenuhi oleh material anorganik non logam. Cara yang paling banyak digunakan untuk pembuatan komposit matrik logam adalah dengan peleburan. Cara ini lebih ekonomis dan mudah dilakukan. Skema proses pembuatan material komposit logam ditunjukkan oleh gambar 2.3 .



Gambar 2.3 Metalurgi peleburan komposit matrik logam.¹²

2.2. ALUMINIUM Matrik Komposit

Paduan aluminium saat ini sangat banyak digunakan dalam berbagai aplikasi maju karena kombinasi dari kekuatan, densitas rendah, mampu mesin, ketersediaan dan biaya yang murah dibanding material lain.

Beberapa keunggulan komposit aluminium dibandingkan paduannya adalah¹⁴ :

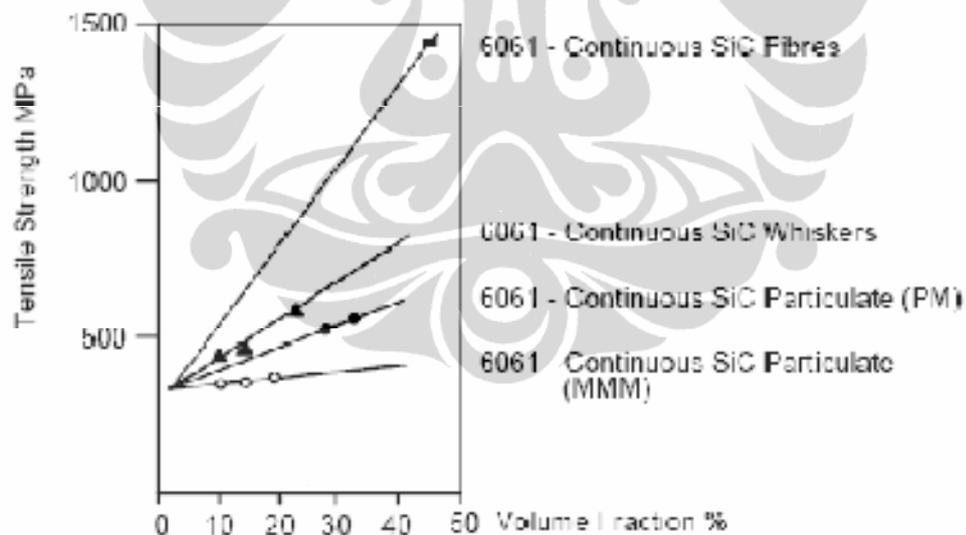
- Kekuatan lebih tinggi
- Kekakuan meningkat
- Densiti rendah
- Menaikan sifat tahan temperatur tinggi
- Memperbaiki koefisien panas ekspansi
- Memperbaiki sifat tahan gesekan dan ketahanan aus
- Memperbaiki sifat tahan getaran.

Berdasarkan jenis penguatnya, komposit matrik aluminium dapat dikelompokkan sebagai berikut¹⁴:

- a. Penguat partikel
- b. Penguat whisker atau pendek
- c. Penguat fiber kontinu
- d. Penguat mono filamen.

Komposit matrik aluminium dengan penguat partikel memberikan sejumlah alternatif penggunaan karena komposit ini memiliki keunggulan dari sisi kapasitas panas spesifik dan konduktivitas panas tinggi, densiti rendah, kekuatan spesifik tinggi, kekakuan spesifik tinggi, koefisien ekspansi baik, ketahanan fatik kestabilan dimensi.¹⁵

Pengaruh jenis penguat SiC terhadap kekuatan tarik paduan aluminium 6061 dapat dilihat pada gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4 Grafik kekuatan tarik dari jenis penguat dan fraksi volume yang berbeda¹³

Gambar 2.4 menjelaskan pengaruh dari berbagai geometri penguat berbeda terhadap kekuatan tarik. *Ductility* dan *failure toughness* komposit menurun jika volume fraksi penguat bertambah. Faktor ini menjadi penentu jumlah maksimum penguat dalam struktur komposit. Dari gambar 2.4 diketahui bahwa penguat

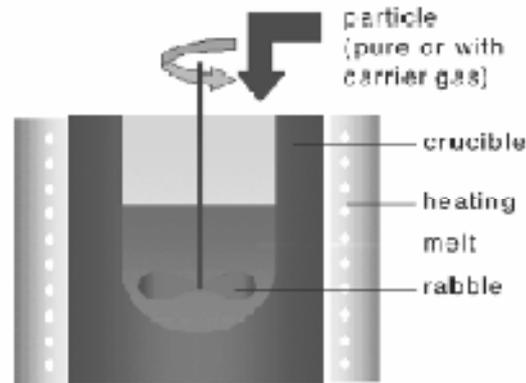
jenis serat SiC memiliki kekuatan tertinggi dan penguat jenis partikel SiC memiliki kekuatan tarik terendah.

Sejumlah teori dan penelitian menunjukkan bahwa sifat mekanis komposit aluminium dengan perbedaan jenis matrik dan penguat, berhubungan dengan struktur mikronya. Sehingga pemilihan jenis, geometri dan volume fraksi penguat sangat penting dalam menentukan kombinasi terbaik dari sifat-sifatnya dan harga yang murah. Proses pembuatan komposit aluminium dapat dilakukan dengan metalurgi serbuk, infiltrasi cairan logam, squeeze casting, pembentukan *semisolid*, dan lain-lain¹⁵.

Komposit dengan penguat partikel berukuran lebih dari 1 μm memiliki dua mekanisme penguatan yaitu partikel membawa beban dari matrik dan penguatan dengan formasi interface inkoheren antar partikel dengan matrik. Dengan demikian kekuatan komposit akan meningkat jika terdapat banyak dislokasi pada interface. Besarnya kekuatan komposit dipengaruhi oleh volume fraksi, distribusi dan bentuk partikel¹⁶.

2.3. STIR CASTING

Secara umum, *stir casting* komposit matrik logam melibatkan peleburan matriks yang diikuti oleh pemberian material penguat ke dalam leburan dan penyebaran bahan penguatnya melalui proses pengadukan. Pengadukan dilakukan untuk membentuk *vortex* dimana partikel penguat dimasukkan pada tepi *vortex*. Pembentukan *vortex* akan menghambat tidak hanya partikel penguat tetapi juga pengotor yang terbentuk pada permukaan lelehan. Akan tetapi *vortex* akan menjebak udara ke dalam cetakan yang sangat sulit untuk dikeluarkan pada saat viskositas lelehan meningkat. Skema operasi dari *melt stirring* ditunjukkan gambar 2.5¹².



Gambar 2.5 Skema proses melt steering ¹²

Stir casting pada pasuan aluminium dengan serbuk alumina menggunakan pengaduk berbentuk turbin dengan blade bersudut 45° menghasilkan jumlah partikel pada bagian atas ingot bertambah secara relatif seiring dengan bertambahnya kombinasi gelembung partikel. rasio jumlah pori dan partikel dengan menggunakan pengaduk tipe turbin juga lebih tinggi jika dibanding pengaduk tipe rata ¹⁷.

Jumlah partikel mengalami peningkatan jika rasio antara diameter propeler (d) dan diameter crucible (D) meningkat dari 0,33 hingga 0,48. Untuk melakukan pengadukan komposit dengan partikel yang sifat wettingnya rendah direkomendasikan oleh persatuan insinyur kimia bahwa posisi propeler dari dasar crucible (h) dibanding tinggi crucible (H) adalah $h/H = 0,35$, namun rasio tertinggi dari jumlah partikel dan rendahnya pori diperoleh jika $h/H = 0,5$ ¹⁷.

2.4. MATERIAL PENYUSUN KOMPOSIT Matrik Logam

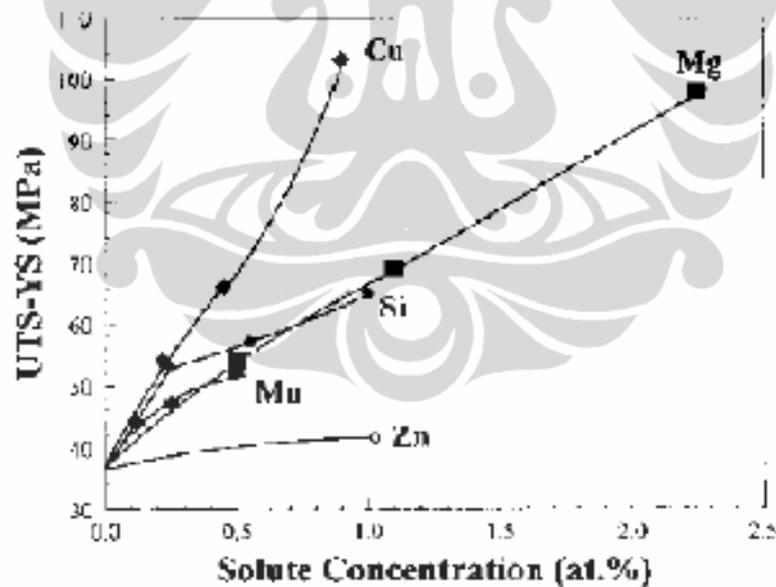
2.4.1 Paduan Al-Cu

Paduan aluminium secara umum dibagi menjadi 8 seri sebagaimana ditunjukkan pada tabel II.1. Pembagian paduan aluminium berdasarkan jenis unsur paduan utamanya. Kodifikasi ini terdiri dari 4 digit, yang dimulai dengan angka 1 (seri 1xxx) hingga 8 (seri 8xxx). Kedelapan seri ini menurut kemampuan

perlakuan panasnya, terbagi menjadi 2 ; dapat diberikan laku panas (*heat treatable*) dan tidak dapat di laku panas (*non heat treatable*).

Tabel II.1. Klasifikasi Paduan Aluminium¹⁸.

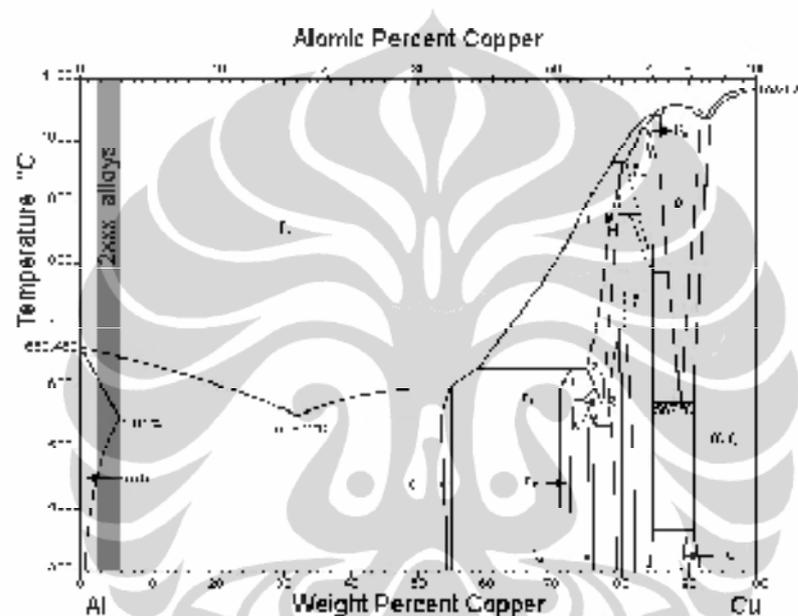
	Major alloying element	Atoms in solution	Work hardening	Precipitation hardening		
WRIGHT ALLOYS ¹⁾ EN AW	1XXX	None (min. 99.00% Al)	X	X	Non-heat treatable alloys	
	3XXX	Mn	X	X		
	4XXX	Si	X	X		
	5XXX	Mg	X	X		
	2XXX	Cu	X	(X)	X	Heat treatable alloys
	6XXX	Mg + Si	X	(X)	X	
	7XXX	Zn	X	(X)	X	
	8XXX	Other	X	(X)	X	



Gambar 2.6 Perbedaan kekuatan tarik maksimum dan kekuatan yield dari pengujian tarik terhadap sejumlah paduan aluminium¹⁹.

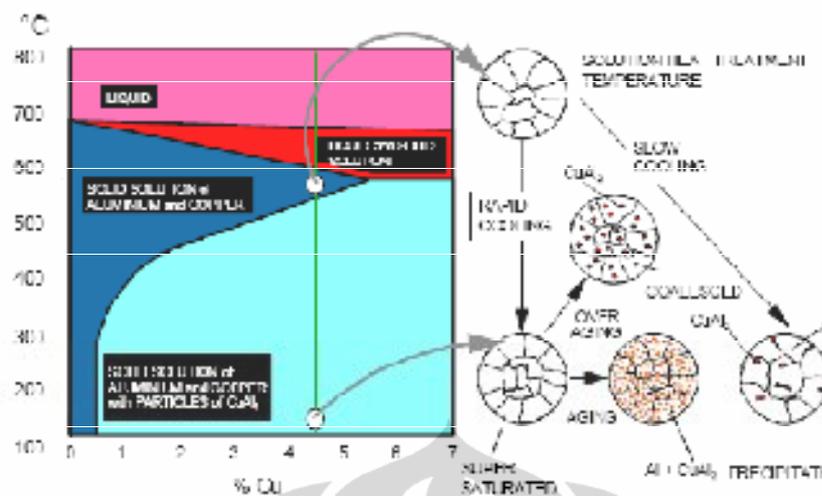
Paduan AlCu banyak digunakan dalam aplikasi industri karena memiliki kekuatan tarik dan yield yang tinggi dibanding paduan aluminium lainnya dan

memiliki kemampuan pengerasan presipitasi. Gambar 2.6 memperlihatkan perbedaan kekuatan tarik paduan aluminium dengan pada beberapa unsur paduan. Gambar 2.6 mengindikasikan bahwa unsur Cu paling efisien untuk meningkatkan *strain hardening* aluminium. Unsur Mg memiliki potensi *strain hardening* yang baik sedangkan unsur Zn hanya sedikit pengaruhnya terhadap peningkatan *strain hardening*.



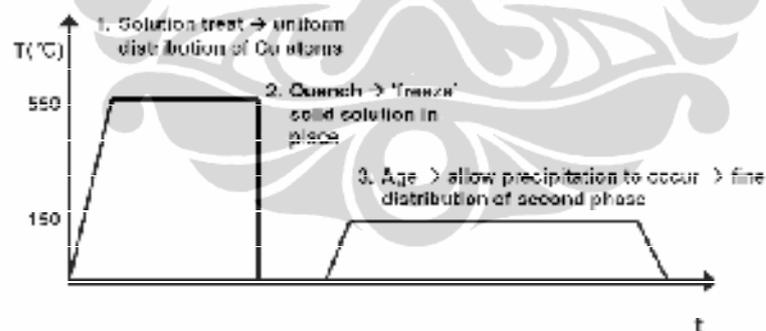
Gambar 2.7 Diagram fasa Aluminium-Tembaga, daerah diarsir adalah daerah paduan aluminium seri 2xxx dengan kemampuan dikeraskan secara presipitasi¹⁵

Paduan hipoeutektik ini lebih dikenal dengan paduan aluminium seri 2xxx, memiliki kandungan tembaga antar 2,3 – 6,3 %. Garis solvus pada diagram Al-Cu di gambar 2.7, menunjukkan kemampuan material untuk dikeraskan dengan metode presipitasi. Cara pengerasan tersebut adalah dengan memanaskan material pada temperatur disekitar daerah fasa solid dan kemudian di aging di temperatur rendah.¹⁵



Gambar 2.8 Mekanisme pengerasan presipitasi pada paduan Al5Cu.¹⁸

Proses pengerasan presipitasi secara skema sebagaimana gambar 2.8 merupakan salah satu cara untuk meningkatkan kekuatan atau kekerasan. Presipitasi dilakukan dengan cara pembentukan larutan lewat jenuh (*supersaturated*) dan kemudian dilakukan penyebaran endapan (*presipitat*).



Gambar 2.9 Diagram waktu dan temperatur proses pengerasan presipitasi paduan AlCu.¹⁸

Pengerasan presipitasi dilakukan dengan dua tahapan proses. Tahap pertama adalah pemanasan hingga kondisi lewat jenuh yang dinamakan solution treatment. Tahap kedua adalah proses aging yang dilakukan setelah pendinginan cepat (*quenching*). Aging adalah pemanasan untuk mempercepat pembentukan fasa kedua dan koherensi presipitat. Fasa koheren ini memperkuat paduan dengan mekanisme penghalangan gerakan dislokasi.

Solution treatment dilakukan dengan memanaskan paduan pada temperatur sedikit dibawah titik lebur paduan, kemudian temperatur ditahan hingga aluminium melarutkan sebagian besar unsur tembaga. Selanjutnya paduan didinginkan secara cepat agar diperoleh sebanyak mungkin unsur tembaga yang terjebak dalam aluminium hingga dihasilkan larutan padat lewat jenuh. Kondisi lewat jenuh ini tidak stabil. Proses selanjutnya adalah penuaan (*aging*) di atas temperatur ruangan (*artificial aged*), untuk mempercepat proses presipitasi. Rentang waktu dan temperatur *aging* tergantung pada jenis paduan.

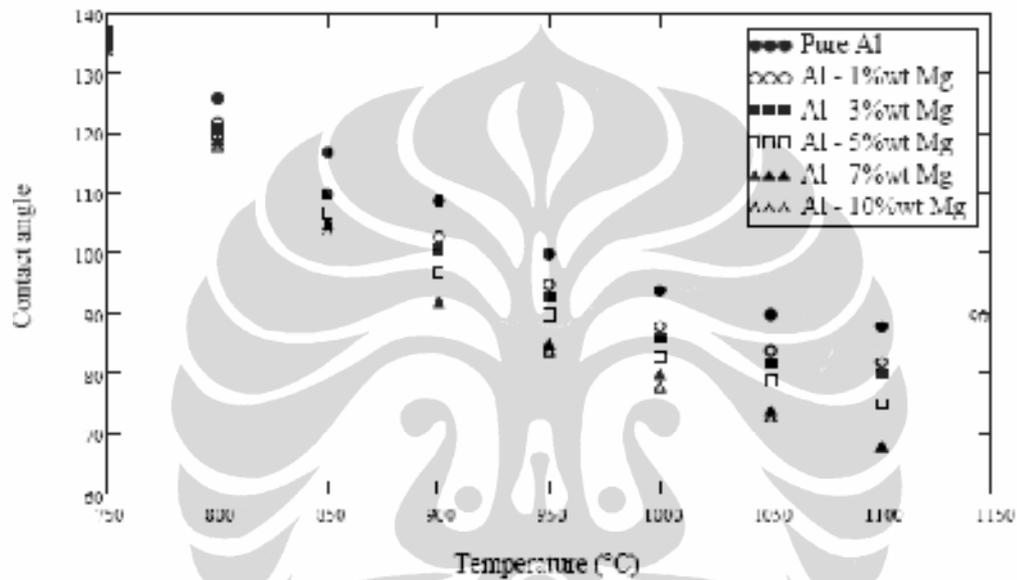
Pada proses *aging* yang di *solution treatment* pada temperatur $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 2 jam lalu di *quenching* di air dan di *aging* pada temperatur $190\text{ }^{\circ}\text{C}$, diperoleh hasil bahwa kekerasan tertinggi dicapai oleh paduan Al5Cu yang diaging selama 28 jam²⁰. Jenis perlakuan panas ini adalah Perlakuan panas T6 untuk paduan mampu dilaku panas sebagaimana pada tabel diatas¹⁸.

Tabel II.2 Kodifikasi temper paduan aluminium¹⁸

XXXX F -O	as fabricated annealed		
XXXX -H1 H2 T3	Work-hardened only Work hardened and partially annealed Work hardened and stabilized by low temperature treatment	NON HEAT TREATABLE ALLOYS	
-H32 H34 H36 T36	Quarter-hard Half hard Threequarter hard Fully hard		
	} Degree of cold working		
XXXX -T2 T4 T5 T6 T8	Cooled from an elevated temperature and naturally aged Solution heat treated and naturally aged Cooled from an elevated temperature of aging process and artificially aged Solution heat treated and artificially aged Solution heat-treated, cold worked and aged		HEAT TREATABLE ALLOYS

2.4.2. Alumina

Alumina dikenal dengan sifat wettingnya yang kurang baik. Untuk itu diperlukan perlakuan khusus atau penambahan unsur tertentu untuk meningkatkan sifat wetting alumina. Wetting pada Al/Al₂O₃ dapat terjadi pada temperatur diatas 1050 °C, namun jika ditambahkan magnesium Al-Mg/ Al₂O₃ temperatur wetting dicapai pada temperatur 900-1000 °C³.



Gambar 2.10 Pengaruh temperatur pada sudut kontak pada Al-Mg/Al₂O₃ dan Al/ Al₂O₃ murni³.

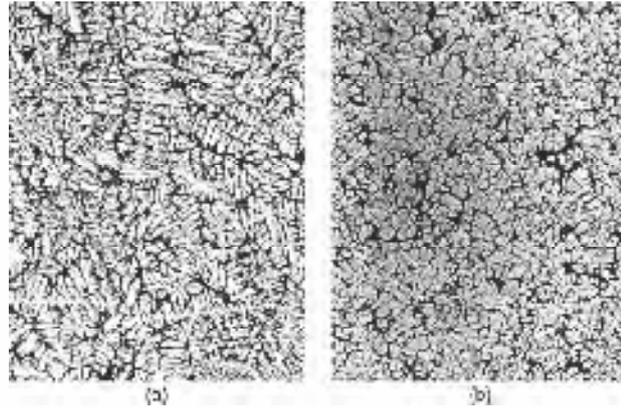
Variasi sudut kontak terhadap temperatur pada Al-Mg/Al₂O₃ dan Al/ Al₂O₃ dapat dilihat pada gambar 2.10. Ditemukan bahwa peningkatan temperatur memperkecil sudut kontak dengan alumina. Ditemukan bahwa paduan dengan kandungan Mg tinggi membutuhkan temperatur yang lebih rendah agar terjadi *wetting* pada alumina. Paduan Al-7%Mgdan Al-10%Mg dapat membasahi alumina pada temperatur 900 °C. Pada gambar 2.10 diketahui sudut kontak lebih kecil dari 90° untuk penambahan 5 % Mg baru tercapai di atas suhu 950 °C. Namun sudut kontak akan semakin kecil jika persentase magnesium ditingkatkan. Adapun karakteristik alumina dapat dilihat pada tabel di bawah.

Tabel II.3 Karakteristik alumina³

Properties	Unit	Category Mark Method	Alumina				
			AR-95.6	NRP1	AFW	ARK	AR-46
Purity (Al ₂ O ₃)	%	—	99.0	99.95	99.0	99.0	99.99
Color	—	—	Grey	Yellow	White	White	White
Density	g/cm ³	F 1508	3.94	3.96	3.96	3.95	3.94
Flexural Strength	MPa (3-point)	F 1501	370	425	400	370	390
Young's Modulus	GPa	F 1502	390	410	370	370	390
Hardness (HV)	GPa	F 1510	14.7	15.7	14.7	14.0	15.7
Porosity Ratio	—	F 1509	0.24	0.24	0.24	0.24	0.28
Fracture toughness	MPa·m ^{1/2}	F 1607 SEN3B	4.0	4.0	3.0	3.0	4.0
CTE	$\times 10^{-6}$ BT-810/°C	F 1518	7.7	7.8	7.7	7.7	7.7
Thermal Conductivity	W/m·K	F 1511	32.0	34.0	28.0	28.0	31.0
Specific Heat	J/kg·K	F 1511	0.75×10^3				
Reference Conduct	[1 MHz]	Non-destructive ultrasonic Method	10.2	9.5	9.7	9.6	9.6
Dissipation Factor	$\times 10^{-4}$ [1 MHz]	Non-destructive ultrasonic Method	6	5	5	5	5
1. Volume Absorbity	g/cm ²	D 2141	$>10^{14}$	$>10^{14}$	$>10^{14}$	$>10^{14}$	$>10^{15}$
Weighted Weight	W/cm	D 2110	130	150	147	147	130
Optical Reflectivity	% [1-240-2,300nm, 5000]	F 0106	—	—	—	—	—

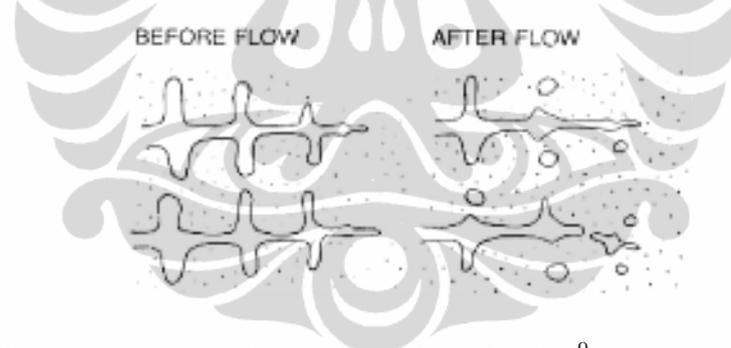
2.5. Metode Pembentukan Semi Solid

Proses pembentukan logam *semisolid* tergolong teknologi yang baru. Metode ini ditemukan oleh Flemings pada tahun 1971. Flemings dan rekannya meneliti sifat solidifikasi cairan logam yang partikel solidnya berbentuk globular, dimana pada kondisi normal mikrostruktur logam berbentuk dendritik seperti ditunjukkan gambar 2.11²². Proses pembentukan logam dalam keadaan *semisolid* atau fasa lumpur adalah melakukan pembentukan logam pada kondisi *semisolid* dimana dalam matrik fasa cairan tersebar partikel solid non dendritik atau globular²³.



Gambar 2.11 Struktur mikro a) dendritik and (b) globular ²³

Salah satu teori menjelaskan bahwa kondisi struktur logam *semisolid* merupakan perbanyakan jumlah butir dari dendrit yang terputus. Gambar 2.12 menunjukkan bahwa aliran yang terjadi selama pembekuan menyebabkan lengan dendrit mencair atau terputus, sehingga yang terbentuk selanjutnya adalah partikel inti kedua. Tingginya densitas partikel yang terbentuk membuat bertambah banyaknya partikel non dendritik sehingga dihasilkan *semisolid* logam.⁹



Gambar 2.12 Skema pemutusan dan perbanyakan dendrit⁹

Semisolid logam dapat dibagi menjadi dua macam ²³:

- a. Cairan seperti lumpur yang didalamnya tersebar partikel solid dan jika dikenai gaya dari luar memiliki sifat seperti fluida.
- b. Solid seperti lumpur yang terdiri dari putusan fasa solid memiliki sifat seperti solid.

Dari hasil observasi tentang sifat aliran logam pada kondisi *semisolid* diketahui beberapa hal yang mempengaruhi kondisi *semisolid* ²².

- Pengaruh fraksi *semisolid*

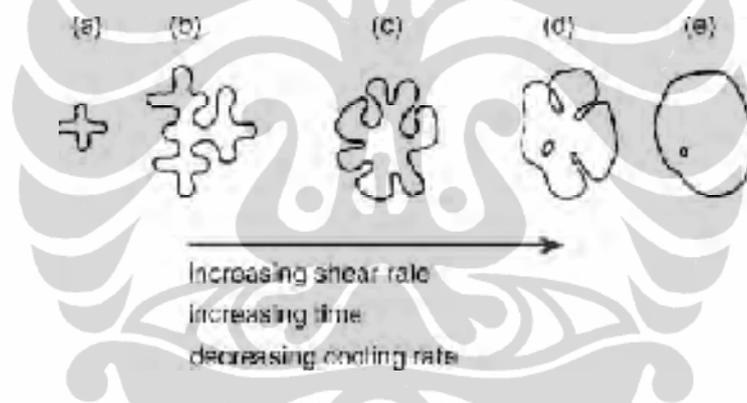
Viskositas *semisolid* dipengaruhi oleh besarnya volume fraksi partikel solid. Kondisi *semisolid* yang ideal biasanya jika terdapat lebih dari 35-50% partikel solid.

- Pengaruh laju geser (*shear rate*)

Viskositas sangat dipengaruhi oleh laju geser aktual

- Pengaruh waktu

Jika *semisolid* dibiarkan pada posisinya maka partikel globular akan menggumpal dan viskositas meningkat dengan waktu. Namun jika material tersebut dipotong maka gumpalan yang terbentuk akan putus dan viskositas menjadi turun. Sifat *thixotropic* yang tergantung waktu ini ditunjukkan pada gambar dibawah.

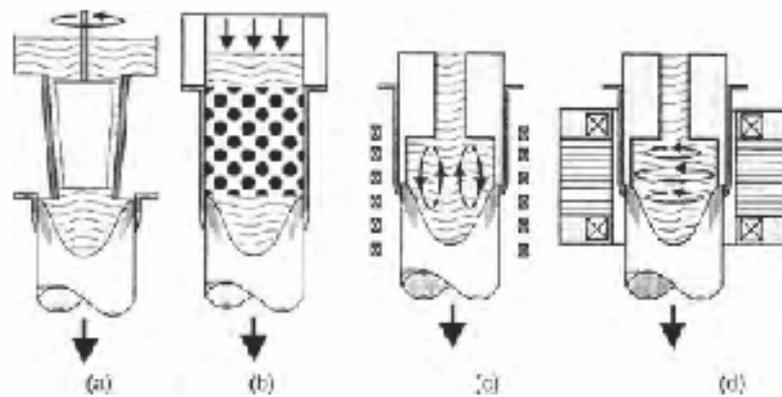


Gambar 2.13 Skema ilustrasi evolusi struktur pada proses pembekuan cairan dibawah kondisi steering.: (a) *initial dendritic fragment*; (b) *dendritic growth*; (c) *rosette*; (d) *ripened rosette*; (e) *spheroid*²³

Pembuatan komponen dengan *semisolid* terdiri dari tiga tahap²².

a. Pembuatan billet

Pembuatan billet ini ditujukan untuk membuat billet dengan mikrostruktur berupa butiran halus berbentuk bulatan kecil. Pembuatan billet dapat dilakukan dengan metode stir casting sebagaimana gambar 2.14.



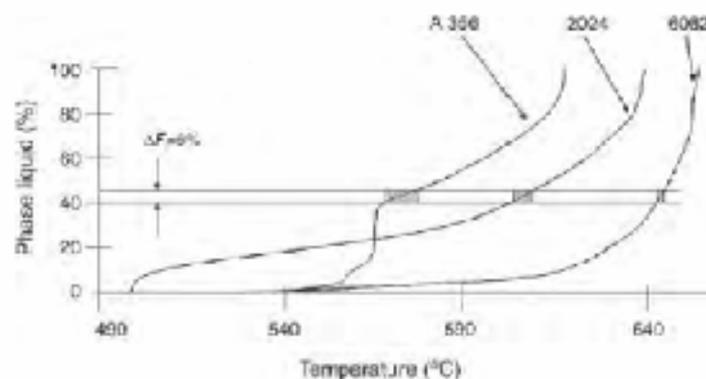
Gambar 2.14 Jenis stiiring: (a) *mechanical stirring*; (b) *passive stirring*; (c) *electromagnetic .vertical. stirring*; (d) *electromagnetic .horizontal. stirring*²²

b. Pemanasan ulang untuk mencapai kondisi semi solid

Pemanasan bilet secara akurat dan homogen hingga mencapai *semisolid* membutuhkan strategi dan peralatan khusus yang dilengkapi dengan sistim kontrol. Biasanya yang digunakan adalah pemanas induksi. Pemanasan bilet harus memenuhi syarat:

- Cepat, untuk menghindari pertumbuhan butir
- Ketepatan dalam mencapai jumlah fasa cair yang diinginkan
- Homogen pada seluruh volume bilet untuk menghindari perbedaan sifat.

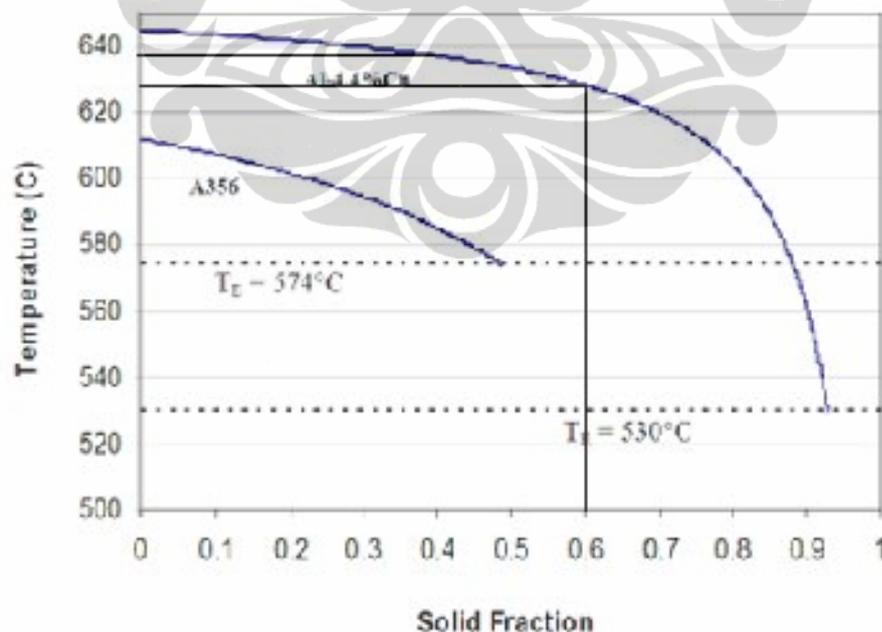
Pada gambar 2.15 terlihat daerah interval temperatur *semisolid* sangat kecil, sehingga perubahan kecil pada temperatur mengakibatkan perubahan signifikan pada fraksi cairan yang terbentuk.



Gambar 2.15 Fungsi volume fraksi likuid sebagai fungsi temperatur pada beberapa paduan aluminium.²²

Pengukuran suhu dengan termokopel masih tidak memadai untuk mengukur rentang temperatur *semisolid* yang tepat. Sejumlah pengujian telah menunjukkan keberhasilan dalam pencapaian fraksi solid tertentu dengan menggunakan sensor elektromagnetik. Sensor ini dipasang pada wadah billet untuk mendeteksi perubahan konduktivitas elektrik billet aluminium yang sedang dicairkan. Sinyal dari sensor diproses oleh alat kontrol untuk mengatur waktu penahanan pada siklus pemanasan tersebut. Namun nilai keluaran yang diperoleh dipengaruhi oleh komposisi kimia billet, sehingga diperlukan adjustment instrument untuk setiap komposisi berbeda.

Setiap paduan memiliki kurva fraksi volume berbeda. Kurva pada gambar 2.16 menunjukkan bahwa kedua paduan tersebut dapat diproses *semisolid* pada kondisi fraksi solid yang tinggi dalam rentang 40-60%. Pada penelitian tentang fraksi volume solid paduan A356 dan Al4.4Cu sebagaimana gambar 2.16. , diketahui kecilnya rentang temperatur 40-60% solid untuk paduan Al4.4Cu, yaitu pada rentang temperatur 625-635 °C.



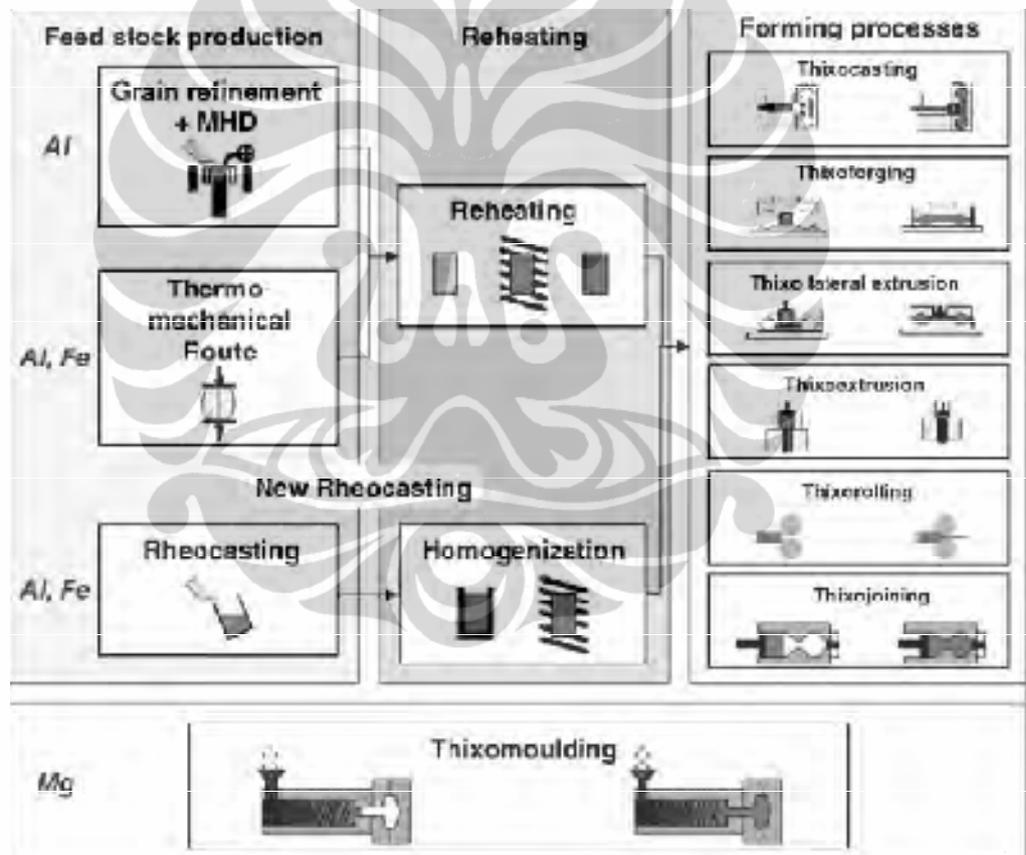
Gambar 2.16 Kurva fraksi volume solid pada paduan A356 dan Al4,4Cu. Garis putus-putus menunjukkan temperatur eutektik..⁹

Beberapa cara pembentukan fasa *semisolid* antara lain²² :

1. *UBE rheocasting*, proses ini berdasarkan prinsip pembuatan material *semisolid* dengan memanipulasi kondisi pembekuan. Logam cair dituangkan kedalam krusibel saat temperaturnya berada dekat daerah temperatur likuidus sehingga terjadi pengintian butir di dinding krusibel. Ukuran butir yang terbentuk menjadi halus karena dibuat disekitar temperatur likuidus.
2. *Cooling slope methode*, fasa lumpur dibuat dengan cara penuangan cairan superheat yang dialirkan melalui bidang miring dan selanjutnya membeku di cetakan. Kristal granular terbentuk dan tumbuh saat cairan melewati bidang miring dan selanjutnya digeser oleh aliran fluida untuk membeku dalam cetakan.
3. *Low superheat casting*. Cairan superheat dituangkan ke cetakan. Untuk paduan aluminium digunakan cetakan tembaga. Ada dua syarat pencetakan ingot untuk *thixoforming*: temperatur superheat tidak lebih dari 10°C dan logam cair membeku dengan cepat karena laju pendinginan material dalam cetakan dapat mempengaruhi bentuk kristal.
4. *Single slug production method*. Medan magnet mengaduk logam cair. Pertumbuhan dendrit diputuskan oleh gaya geser akibat aliran logam sehingga dihasilkan bilet dengan globular halus.
5. *The continuous rheoconversion process*. Berdasarkan metode pengadukan cairan pasif dimana nukleasi dan pertumbuhan butir fasa primer dikontrol oleh reaktor khusus.
6. *The SEED process*. Terdiri dari dua tahap. (1) Ekstraksi panas untuk mencapai campuran solid-liquid yang diinginkan dan (2) mengalirkan kelebihan cairan agar slug *semisolid* mampu mempertahankan kondisinya.
7. *Low superheat pouring with shear field*. Memanfaatkan kondisi pembekuan untuk mengontrol nukleasi dan pertumbuhan butir dengan penuangan superheat.
8. *The gas bubbles technique*. Mengalirkan gelembung gas kedalam cairan untuk menjadikan agitasi selama tahap utama pembekuan. Proses dilakukan hingga temperatur tujuan atau fraksi solid pada cairan telah tercapai.

9. Menggunakan *liquid electrolysed* aluminium. Metode ini membuat mikrostruktur globular paduan aluminium dengan menggunakan cairan elektrolisis aluminium. Kemudian cairan dituang ke dalam cetakan pada temperatur 0-10°C diatas temperatur *liquidus*.

Proses pembentukan *semisolid* yang terkini adalah dengan mengalirkan gelembung gas melalui objek berpori ke dalam cairan logam yang temperturnya ditahan dibawah temperatur *liquidus*, sehingga terbentuklah logam *semisolid* non dendritik.



Gambar 2.17 . Bagan proses pembuatan logam *Semisolid* ²².

c. Operasi pembentukan *Semisolid*

Setelah pemanasan ulang, billet *semisolid* dibentuk menjadi bentuk akhir dengan satu operasi. Ada dua jenis metode forming .

1. *Thixocasting*, bilet diinjeksikan ke cetakan tertutup sebagaimana *high pressure die casting*.
2. *Thixoforging*, bilet dibentuk dalam cetakan oleh cetakan atas dan bawah.

Thixocasting dilakukan saat fraksi cair bilet berada pada rentang 40-60% dengan ditekan oleh piston pada cetakan. Thixoforging dilakukan pada saat fraksi solid bilet berada pada rentang 30-40%, dengan memberikan tekanan pada tutup cetakan²².

