

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Material Komposit

Komposit merupakan material teknik yang tersusun atas dua atau lebih bahan yang memiliki fasa yang berbeda menjadi suatu material baru dengan sifat yang berbeda dan lebih baik dari keduanya^[18]. Definisi lain menyatakan bahwa komposit adalah perpaduan dari bahan yang dipilih berdasarkan sifat masing-masing bahan penyusun untuk menghasilkan material baru dengan sifat yang unik dibandingkan sifat material dasar sebelum dicampur dan terjadi ikatan permukaan masing-masing material penyusun^[19]. Berdasarkan definisi tersebut maka kondisi ikatan permukaan sangat berpengaruh terhadap kekuatan komposit. Persyaratan dasar kekuatan komposit terletak pada kekuatan antar muka matrik dan penguat. Ikatan antar muka inilah yang menjadi jembatan transmisi tegangan luar yang diberikan dari matrik menuju partikel penguat. Jika ikatan antarmuka terjadi dengan baik maka transmisi tegangan ini dapat berlangsung dengan baik pula. Material komposit tersusun atas 2 (dua) bagian yang berbeda yaitu matrik dan penguat. Matrik merupakan fasa utama dan kontinu, berfungsi menahan fasa penguat dan meneruskan beban. Sedangkan penguat merupakan fasa kedua dan diskontinu yang dimasukkan kedalam matrik. Matrik memiliki sifat ulet, sementara itu penguat umumnya memiliki kekuatan lebih tinggi dari pada matrik, sehingga disebut fasa penguat (*reinforcing phase*).

Bahan komposit dikembangkan sebagai bahan alternatif untuk mendapatkan sifat yang lebih baik seperti *high strength/modulus* dan densitas rendah yang sangat sesuai diterapkan dalam industri penerbangan, antariksa serta industri otomotif. Pada industri tersebut memang membutuhkan komponen yang lebih ringan namun memiliki karakteristik yang handal. Secara prinsip bahwa penguat yang kontinu memberikan sifat kekuatan spesifik lebih baik. Namun sayangnya, *high strength fibre* dan metode pembuatannya lebih mahal dibanding jenis komposit lainya dan hal inilah yang membatasi penggunaannya dalam industri. Oleh karena keterbatasan dari *continous reinforce* tersebut maka sekarang banyak dan intensif dikembangkan jenis komposit lain, yaitu komposit

dengan *discontinuous reinforce*^[5]. Meskipun komposit dengan penguat diskontinu tidak menghasilkan sifat yang sama dan cenderung lebih rendah, akan tetapi biaya lebih murah, metode pembuatannya lebih mudah dan dapat diterapkan pada metode pembuatan yang konvensional. Kelebihan lainnya dari komposit dengan penguat diskontinu memberikan sifat yang isotropik, yaitu sifat yang sama dalam segala arah. Komposit dapat digolongkan berdasarkan jenis matrik dan bentuk penguatnya.

Klasifikasi Komposit Berdasarkan Matrik

- ✚ *Metal matrix composites* (MMCs), yaitu komposit yang memiliki matrik berupa logam.
- ✚ *Ceramic Matrix Composites* (CMCs), yaitu komposit dengan matrik dari bahan keramik.
- ✚ *Polymer Matrix Composites* (PMCs), yaitu jenis komposit dengan matrik dari bahan polimer.

Klasifikasi Komposit Berdasarkan Penguat / *reinforcement*

- ✚ *Fibrous composite*
- ✚ *Particulate composit*
- ✚ *Flake composite*
- ✚ *Fillet composite*

2.2 Komposit Matrik Logam / *Metal Matrix Composites*

2.2.1 Bahan Penyusun MMCs

Metal matrix composites (MMCs) adalah material yang terdiri dari matrik berupa logam dan paduannya yang diperkuat oleh bahan penguat dalam bentuk *continous fibre*, *whiskers*, atau *particulate*. Sifat komposit tergantung dari beberapa faktor yang mempengaruhinya di antaranya adalah jenis material komposit yang digunakan, fraksi volume penguat, dimensi dan bentuk penguat dan beberapa variabel proses lainnya. Bahan matrik umumnya adalah aluminium dan paduannya, magnesium dan paduannya serta titanium dan paduannya. Karakteristik fisik dan mekanik matrik aluminium ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Sifat fisik dan mekanik logam aluminium^[20]

| | |
|----------------------------|--------------------------|
| Density, ρ | 2.7 g/cm ³ |
| Modulus of elasticity, E | 71 Gpa |
| Hardness | 19 VHN |
| Yield strength, σ_Y | 25 Mpa |
| Thermal conductifity, C | 237 W/mK |
| C.T.E | 2,4.10 ⁻⁵ /°C |

Sedangkan material penguat yang digunakan umumnya dari bahan keramik seperti SiC, SiO₂, Al₂O₃, B₄C, karbon, grafit dan lain-lain. Sifat-sifat beberapa penguat dengan bentuk berbeda-beda diperlihatkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Sifat beberapa jenis penguat bentuk *particulat* (p), *whisker* (w) *chopped fibre* (c)^[3]

| Property | Reinforcement | | | | | | |
|--|------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------------|
| | SiC _p | Al ₂ O _{3p} | TiB _{2p} | Si ₃ N _{4p} | Al ₂ O _{3c} | SiC _w | Si ₃ N _{4w} |
| Density,g/cm ³ | 3.21 | 3.87 | 4.5 | 3.18 | 3.3 | 3.19 | 3.18 |
| Diameter, μ m | | | | | 3-4 | 0.1-1.0 | |
| CTE, 10 ⁻⁵ .K ⁻¹ | 4.3-5.6 | 7.2-8.6 | 8.1 | 3.0 | 9 | 4.8 | 3.8 |
| UTS, Mpa | 100- 800 | 70-1000 | 700- 100 | 250-100 | >2000 | 3000- 14000 | 13800 |
| Young's modulus, GPa | 200- 480 | 380 | 514- 574 | 304 | 300 | 400- 700 | 379 |
| Elongation, % | ... | | | | 0.67 | 1.23 | |

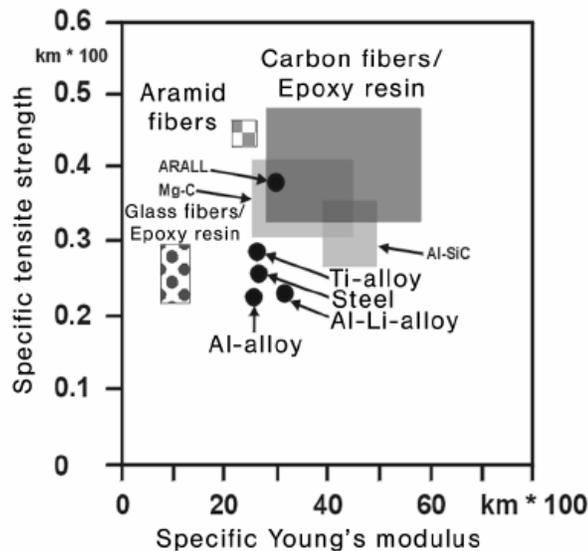
2.2.2 Karakteristik Mekanik MMCs

Kombinasi material matrik yang memiliki sifat keuletan tinggi, densitas rendah, titik lebur rendah dan penguat keramik yang keras dan getas ini akan menghasilkan karakteristik komposit MMCs yang mempunyai sifat lebih baik dari keduanya, yaitu kekuatan, modulus elastisitas, ketangguhan, ketahanan impak, konduktivitas listrik dan panas yang tinggi. Karakteristik mekanik dan termal MMCs secara umum dapat diperlihatkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Sifat Mekanik Komposit Matrik Logam^[21]

| Fiber | Matrix | Fiber Content (vol%) | Density (g/cm ³) | Longitudinal Tensile Modulus (GPa) | Longitudinal Tensile Strength (MPa) |
|---------|----------|----------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Carbon | 6061 Al | 41 | 2.44 | 320 | 620 |
| Boron | 6061 Al | 48 | — | 207 | 1515 |
| SiC | 6061 Al | 50 | 2.93 | 230 | 1480 |
| Alumina | 380.0 Al | 24 | — | 120 | 340 |
| Carbon | AZ31 Mg | 38 | 1.83 | 300 | 510 |
| Borsic | Ti | 45 | 3.68 | 220 | 1270 |

Seperti kita ketahui bahwa logam aluminium dan paduannya memiliki densitas sekitar sepertiga dari densitas baja ($2,7\text{kg/m}^3$ vs $7,8\text{kg/m}^3$) dan mempunyai kekuatan dan modulus yang rendah dibandingkan baja^[19]. Namun bila aluminium tersebut ditambahkan keramik sebagai penguat maka rasio kekuatan dan modulus material komposit ini akan meningkat secara signifikan bahkan melebihi sifat besi tuang dan baja, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.1

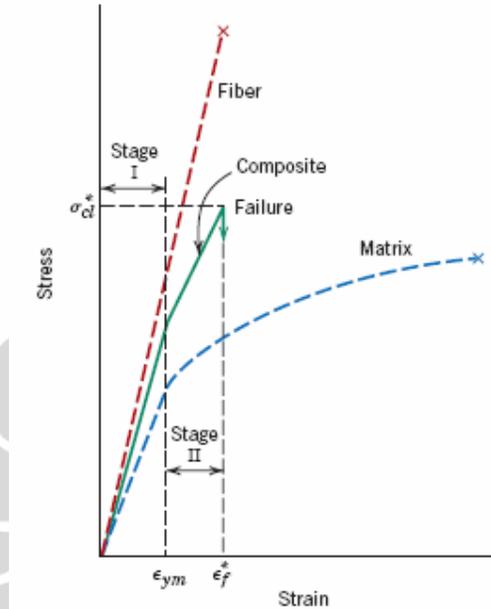
Gambar 2.1. Perbandingan *specific stiffness* bahan konvensional dan A-MMCs^[3]

Gambar 2.1 memperlihatkan perbandingan modulus spesifik dan kekuatan spesifik berbagai jenis logam dengan komposit. Nilai kekuatan dan modulus spesifik komposit SiC lebih tinggi dari pada paduan Al, baja dan paduan Ti.

Perilaku Tegangan – Regangan A-MMCs

Perilaku tegangan-regangan ideal A-MMCs untuk penguat *fibre unidireksional* ditunjukkan pada Gambar 2.2. Umumnya perilaku tegangan - regangan komposit terdiri dari 2 (dua) tahap. Pada tahap I, fiber dan matrik mengalami deformasi elastis secara bersamaan, kemudian pada tahap II, matrik

mengalami deformasi plastis sementara fibre masih deformasi elastis. Dalam tahap III, baik matrik maupun fiber mengalami deformasi plastis akan tetapi umumnya fibre akan patah atau putus sebelum deformasi plastis.



Gambar 2.2. Perilaku Tegangan – Regangan Bahan Komposit^[21]

Gambar kurva tegangan regangan diatas juga memperlihatkan karakteristik mekanik komposit dibanding bahan penguatnya. Komposit memiliki kekuatan tarik (UTS) lebih tinggi dan elongasi lebih rendah dibanding matriknya. Kekuatan tarik tinggi dan elongasi rendah menyebabkan komposit cenderung mengalami perpatahan getas/*brittle fracture*.

Modulus Elastisitas^[6]

Pada komposit isotropik partikulat atau *short fibre* penghitungan modulus elastisitas dapat digunakan persamaan Tsai Halpin. Dengan menerapkan faktor geometri partikel penguat yang diperoleh dari bentuk geometri partikel penguat sebagai fungsi dari arah beban, geometri dan orientasi penguat dapat menjadi pertimbangan faktor geometri.

$$E_c = \frac{E_m (1 + 2SqV_f)}{1 - qV_f} \quad (2.1)$$

Dimana :

$$q = \frac{(E_f / E_m) - 1}{(E_f / E_m) + 2S} \quad (2.2)$$

Dimana S adalah faktor geometri fiber atau partikel ($1/d$).

Komposit unidireksional merupakan komposit yang mempunyai orientasi penguat yang sama. Pemberian beban yang arahnya sama dengan orientasi penguat disebut beban longitudinal, maka komposit akan mengalami *strain* yang sama antara matrik dan penguat (*isostrain*). Modulus elastis komposit longitudinal E_c'' (*upper bond*) dapat dinyatakan dengan persamaan yang dikenal dengan hukum campuran (*rule of mixture*)

$$E_c'' = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.3)$$

Beban transversal pada material komposit *unidireksional* merupakan beban yang tegak lurus terhadap orientasi penguat. Pemberian beban tersebut mengakibatkan terjadinya elongasi yang berbeda antara penguat dan matrik, sementara besar beban eksternal yang dialami matrik dan penguat adalah sama besar (*isostress*). Oleh karena itu modulus elastisitas dengan beban tegak lurus penampang lintang (*lower bond*) dinyatakan dengan persamaan :

$$\frac{1}{E_c^\perp} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (2.4)$$

Dimana E adalah modulus elastisitas, V adalah fraksi volume, c adalah komposit, m adalah matrik dan f penguat. Kedua persamaan diatas dapat digunakan untuk menguji kualitas ikatan antar permukaan matrik dan penguat.

Berdasarkan *rule of mixture* juga dapat ditentukan persamaan untuk densitas, kekuatan tarik dan *coeffisien thermal expansion* (CTE) komposit.

Densitas teoritis komposit

Densitas teoritis komposit dapat dihitung dengan persamaan sbb :

$$d_c = d_m V_m + d_f V_f \quad (2.5)$$

Dimana :

d_c , d_m , d_f berturut-turut adalah densitas komposit, matrik dan fiber

V_m , V_f adalah fraksi volume matrik dan penguat

Coeffisient thermal expansion (CTE)

CTE arah longitudinal, α_{cl} (searah dengan orientasi fiber)

$$\alpha_{cl} = \frac{(\alpha_m E_m V_m + \alpha_f E_f V_f)}{(E_m V_m + E_f V_f)} \quad (2.6)$$

CTE arah transversal, α_{ct} (tegak lurus orientasi fiber)

$$\alpha_{ct} = (1 + P_m)\alpha_m V_m + \alpha_f V_f \quad (2.7)$$

Dimana P_m adalah *poisson ratio* matrik

Kekuatan tarik

Kekuatan tarik arah longitudinal, σ_{cl} untuk *long fibre*

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (2.8)$$

Kekuatan tarik arah longitudinal, σ_{cl} untuk *short fibre*

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \left(1 - \frac{L_c}{2L}\right) \quad (2.9)$$

Dimana L adalah panjang fiber

Kekuatan tarik arah transversal, σ_{ct} (*short fibre*)

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \frac{L \tau_c V_f}{d} \quad (2.10)$$

2.2.3 Aluminum – Metal Matrix Composites / A-MMCs

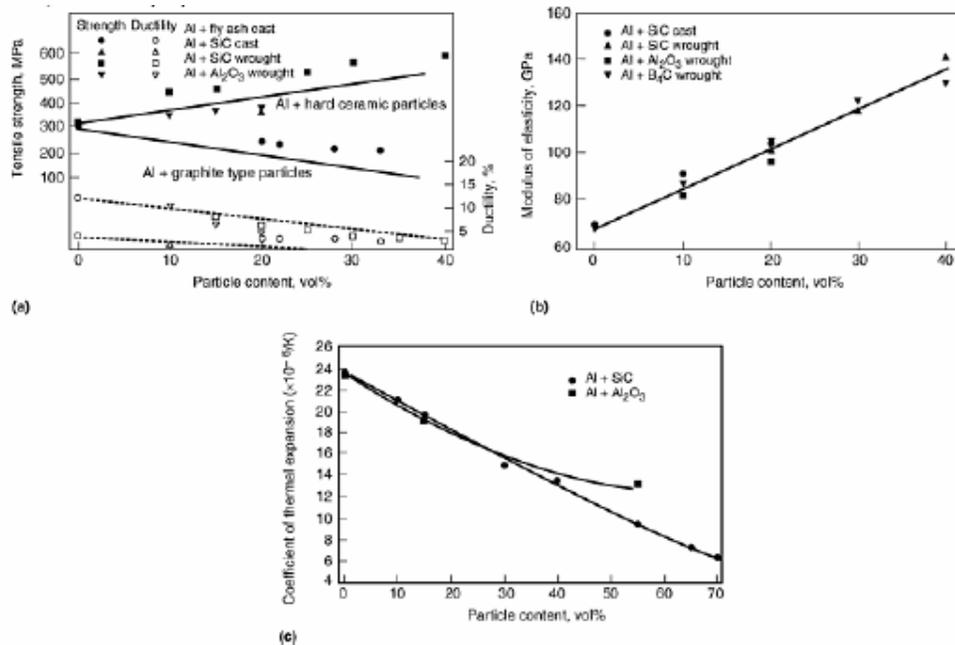
Salah satu jenis komposit matrik logam yang banyak dikembangkan industri otomotif dewasa ini adalah komposit yang matriknya berupa logam (MMC/*metal matrix composite*) yaitu komposit bermatrik aluminium (AMC/*aluminum matrix composite*). Matrik yang digunakan dalam A-MMC dapat berupa Al murni dan atau paduan Al seperti Al-Si, Al-Cu, 2xxx, 6xxx dan 7xxx, sedangkan penguat yang umum digunakan adalah SiC atau Al_2O_3 . Pemakaian bahan aluminium dan atau paduannya sebagai matrik karena memiliki sifat sangat menarik yaitu densitas rendah, memiliki kemampuan untuk dikuatkan dengan pengendapan presipitat, ketahanan korosi sangat baik, konduktivitas panas dan listrik tinggi dan *damping capacity* tinggi. A-MMCs dapat menghasilkan karakteristik mekanik yang bervariasi tergantung dari jenis paduannya.

2.2.3.1 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Kekuatan Komposit A-MMCs

A. Fraksi Volume Penguat

Pada aplikasi industri baik industri otomotif dan lainnya, pemakaian logam ringan dapat meningkatkan efisiensi mesin dan mengurangi konsumsi energi atau bahan bakar. Jenis paduan logam ringan dengan logam dasar aluminium dan magnesium mempunyai modulus elastik rendah, *coeffisien thermal expansion* (CTE) tinggi dan ketahanan aus rendah dibanding baja. Oleh karena itu paduan

tersebut digabung dengan bahan penguat keramik yang dapat berbentuk serat atau partikel yang memiliki sifat CTE rendah dan modulus elastik tinggi. Penyatuan partikel keramik seperti SiC dan Al₂O₃ dapat meningkatkan kekuatan (Gambar 2.3.a) dan modulus elastisitas (Gambar 2.3.b) matrik Al akan tetapi menurunkan CTE (Gambar 2.3.c).



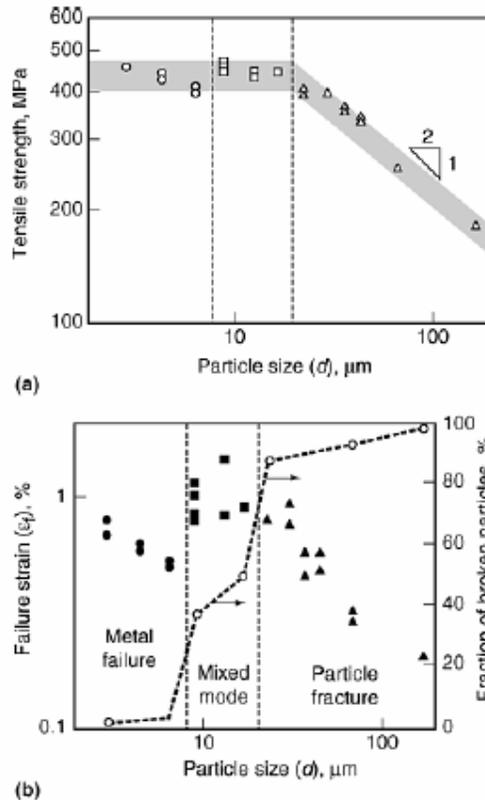
Gambar 2.3. Pengaruh partikel penguat terhadap sifat-sifat Al-MMCs. a) kekuatan dan keuletan. b) Modulus elastisitas. c) CTE^[5]

B. Ukuran Partikel

Metode proses *melting* dan *casting* komponen *aluminum – metal matrix composite* (AL-MMCs) relatif sama dengan paduan tanpa bahan penguat. Namun karena terdapat perbedaan densitas antara matrik dan penguat, maka pada saat *melting* dan solidifikasi akan mengakibatkan segregasi. Partikel penguat yang memiliki densitas lebih rendah dibanding logam cair (paduan Al) akan mengapung pada bagian atas, sedangkan partikel penguat dengan densitas lebih tinggi akan mengendap pada bagian bawah produk casting. Densitas fasa penguat seperti SiC dan Al₂O₃ lebih tinggi dibanding matrik Al, oleh karena itu partikel keramik cenderung mengendap dalam logam cair. Hal ini dapat dihindari dengan pengadukan yang optimum. Pengadukan (*stirring*) dapat mencegah pemisahan

atau segregasi antara matrik dan penguat, pada proses *investment-cast composite* dibatasi bahan penguatnya sekitar 30% .

Selain dipengaruhi oleh fraksi volume penguat yang ditambahkan, kekuatan komposit matrik logam juga dipengaruhi oleh ukuran bahan penguatnya. Pada Gambar 2.4 memperlihatkan korelasi antara ukuran bahan penguat SiC terhadap sifat mekanik.



Gambar 2.4. Pengaruh ukuran partikel SiC terhadap a) kekuatan dan b) Sifat kegagalan komposit Al-4Mg+50 vol% SiC^[5]

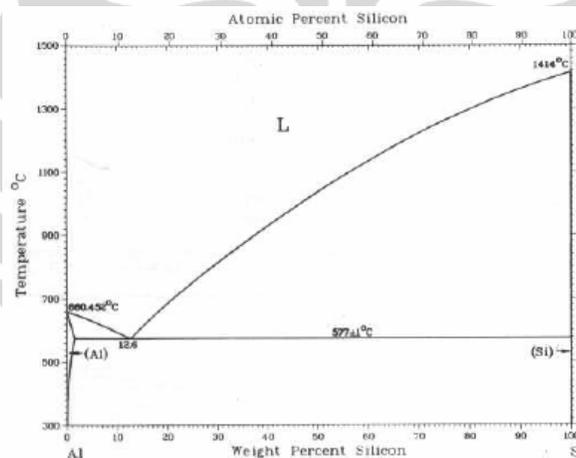
Ukuran bahan penguat SiC pada komposit Al-4Mg+50 Vol% SiC memiliki pengaruh yang kuat terhadap sifat mekaniknya. Kekuatan dan keuletan menurun dengan meningkatnya ukuran partikel. Pada ukuran partikel kecil (<6.5 μm), perputahannya disebabkan oleh kegagalan logam sedangkan untuk ukuran partikel besar (>23 μm), perputahan disebabkan oleh pecahnya partikel penguat. Untuk bahan penguat Al₂O₃ juga memiliki kecenderungan yang sama. Komposit 2014-55 vol% Al₂O₃ memiliki kekuatan dan keuletan menurun apabila ukuran

partikelnya semakin besar. Kekuatan tarik menurun dari 440, 360 dan 300 MPa seiring dengan naiknya ukuran partikel dari 5, 12.8, dan 29.2 μm ^[5].

2.2.3.2 Diagram Fasa Dan Struktur Mikro Paduan Al – Si (AC8H)

Aluminum casting tipe AC8H merupakan salah satu dari Al casting Al – Si dengan kandungan Si sekitar 11-12% dan tambahan elemen paduan lain seperti Cu dan Mg. Penambahan elemen paduan Cu dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan baik dalam kondisi *as-cast* maupun *heat-treated*. Tembaga juga dapat meningkatkan ketahanan korosi. Sementara itu penambahan magnesium dapat meningkatkan kekerasan dengan membentuk fasa Mg_2Si .

Diagram fasa biner Al – Si diperlihatkan pada Gambar 2.5. Pada diagram fasa biner Al – Si dengan kadar Si sebesar 12.6% (eutektik) memiliki titik lebur sekitar 577°C.

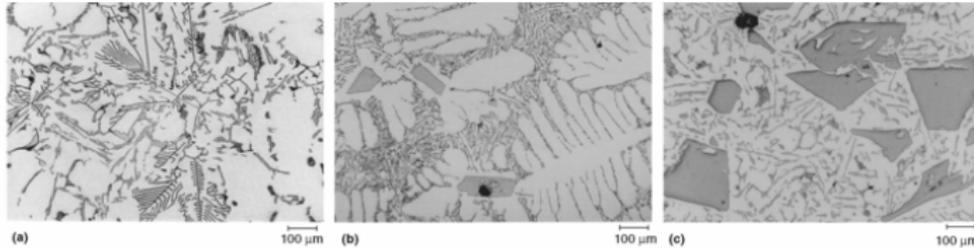


Gambar 2.5. Diagram fasa biner Al - Si^[21,22]

Pada proses peleburan, temperatur peleburan atau penuangan logam cair berpengaruh terhadap pembentukan porositas oleh gas hidrogen. Semakin tinggi temperatur logam cair, maka semakin tinggi pula kelarutan hidrogenya. Oleh karena itu perlu ditentukan temperatur yang optimum untuk proses stir casting mengingat sifat mampu basah logam cair terhadap partikel Al_2O_3 yang baik dicapai pada temperatur tinggi.

Berdasarkan diagram fasa tersebut maka jenis paduan Al-Si dapat diklasifikasikan menjadi paduan hipoeutektik, eutektik dan hipereutektik. Paduan hipoeutektik adalah jenis paduan yang memiliki kadar Si < 12,6%. Untuk paduan eutektik diperoleh dengan kadar Si sekitar 11,7% sedangkan paduan hipereutektik

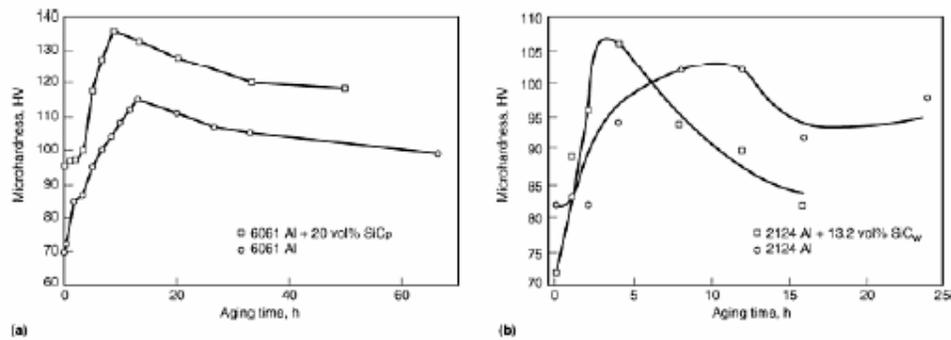
memiliki kadar Si > 12,6%. Contoh struktur mikro yang khas dari ketiga jenis paduan ini diberikan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Struktur mikro paduan hipoeutektik, eutektik dan hipereutektik komersial. (a) Paduan Al-Si hipoeutektik (Al-5.7Si-, paduan tipe A319). (b) Paduan Al-Si eutektik (Al-11.9Si, paduan tipe A339). (c) Paduan Al-Si hipereutektik (Al-15Si, paduan tipe A390)^[23].

2.2.3.3 Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Karakteristik Mekanik

Paduan aluminium dapat dikeraskan melalui dua mekanisme yaitu pengerasan regang (*strain hardening*) dan pengendapan presipitat (*precipitation hardening*)^[19,20]. Pengerasan regang dapat diperoleh dengan proses pengerjaan dingin sementara mekanisme pengendapan presipitat dicapai dengan proses perlakuan panas. Paduan Al hasil tempa tipe 1xxx, 3xxx, 4xxx dan 5xxx merupakan paduan Al yang peningkatan kekerasannya dengan pengerjaan dingin seperti proses pengerolan atau ekstrusi. Untuk paduan Al yang dapat dikeraskan dengan perlakuan panas adalah paduan Al seri 2xxx, 6xxx dan 7xxx. Peningkatan kekerasan terhadap paduan tersebut diperoleh melalui mekanisme *precipitation hardening*. Penambahan bahan penguat seperti SiC, Al₂O₃ dan B₄C kedalam matrik paduan Al yang dapat mempercepat kinetika aging seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7. Peningkatan aging ini didasarkan atas perbedaan CTE antara matrik dengan partikel penguat. Pada saat pendinginan, dihasilkan medan regangan oleh karena perbedaan CTE. Selain itu adanya partikel penguat dapat memicu timbulnya nukleasi presipitat pada matrik^[5].



Gambar 2.7. Pengaruh penambahan partikel terhadap kekerasan mikro sebagai fungsi waktu aging^[5].

2.3 Fabrikasi Komposit Al/Al₂O₃

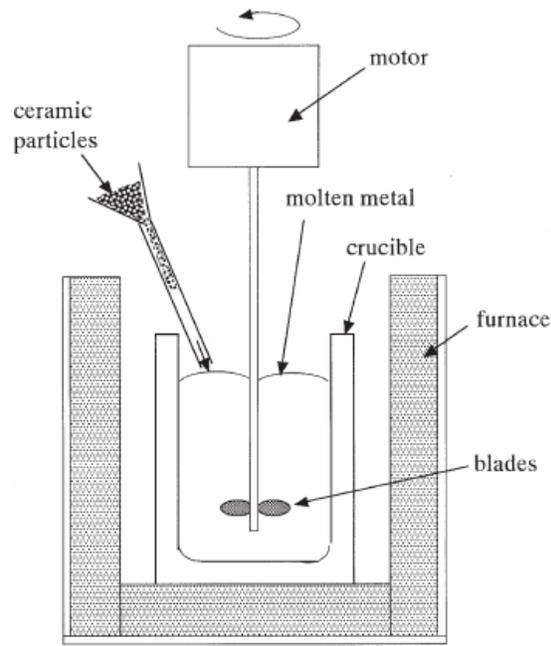
Secara garis besar metode pembuatan A-MMCs dibagi menjadi 2 (dua) bagian utama yaitu *solid-state* dan *liquid-state process*^[3]. Jenis *liquid-state* termasuk diantaranya adalah *stir casting*, *squeeze casting*, dan *compo casting*.

2.3.1 Proses Pembuatan MMCs Fasa Padat/Metalurgi serbuk^[24].

Metalurgi serbuk merupakan suatu proses pembuatan benda atau komposit dalam kondisi fasa solid/padat. Tahapan dari proses metalurgi serbuk secara umum dibagi menjadi 3 (tiga) bagian, yaitu pencampuran serbuk matrik dan penguat (*mixing*), penekanan dan pemanasan (*sintering*) pada suhu tinggi. Teknik pembuatan dengan metalurgi serbuk memiliki kelebihan dibanding proses lainnya, diantaranya adalah diperoleh distribusi partikel penguat lebih merata dan sifat mekanik yang lebih baik, produk lebih beraneka ragam dan temperatur proses lebih rendah. Sedangkan kekurangan dari proses metalurgi serbuk dibanding teknik pengecoran adalah biaya relatif lebih mahal, ukuran benda yang dibuat terbatas dan dihasilkan produk dengan porositas lebih tinggi. Oleh karena itu pembuatan komposit Al/Al₂O_{3p} banyak dikembangkan dengan teknik pengecoran (*liquid – state*).

2.3.2 Fabrikasi Komposit Al/Al₂O_{3p} Dengan Stir Casting

Proses stir casting merupakan salah satu proses pembuatan komposit dalam kondisi cair yang paling sederhana. Prinsip dari proses stir casting adalah penyatuan partikel penguat kedalam logam cair dengan pengadukan secara mekanik diatas garis *liquidus*, lalu dituangkan ke dalam cetakan. Skema dari proses stir casting dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Skematik proses stir casting^[6]

Keuntungan dari proses ini adalah mampu menggabungkan partikel penguat yang tidak dibasahi oleh logam cair. Bahan yang tidak dibasahi tersebut terdistribusi oleh adanya gaya pengadukan secara mekanik yang menyebabkan partikel penguat terperangkap dalam logam cair. Metode pembuatan ini merupakan metode yang paling sederhana, relatif lebih murah dan tidak memerlukan peralatan tambahan. Namun proses *stir casting* ini kadangkala mengalami beberapa kendala diantaranya adalah distribusi partikel yang kurang homogen dan *wettability* aluminium terhadap beberapa jenis keramik termasuk Al_2O_3 yang kurang baik. Ketidak homogenan mikrostruktur disebabkan oleh penggumpalan partikel penguat (*clustering*) dan pengendapan selama pembekuan berlangsung akibat perbedaan densitas matrik dan penguat, terutama pada fraksi volume partikel tinggi. Secara umum fraksi volume penguat hingga 30% dan ukuran partikel 5 – 100 μm dapat disatukan kedalam logam cair dengan metode *stir casting*. Namun untuk ukuran partikel *sub-mikron* tidak cocok diproses menggunakan stir casting, melainkan dengan *compo casting*^[18]. Metode *compo casting* yaitu pengembangan dari stir casting akan tetapi penyatuan partikel penguatnya dilakukan dalam kondisi *semi-solid*. Proses stir casting dalam kondisi

semi solid dapat menurunkan ukuran butir eutektik dan pada akhirnya meningkatkan sifat mekanis bahan komposit A-MMCs^[8]. Untuk mengatasi permasalahan yang berkaitan dengan *wettability* yang kurang baik, maka perlu dilakukan beberapa modifikasi diantaranya adalah melakukan *surface treatment* pada partikel atau menambahkan logam tertentu pada matrik dan melakukan preheating partikel sebelum dimasukkan dalam logam cair^[8].

Metode casting untuk bahan monolitik (Aluminium casting) seperti *gravity die casting, investment, squeeze* dan *high pressure die casting* pada prinsipnya dapat juga diterapkan untuk pengecoran bahan komposit matrik logam termasuk komposit Al/Al₂O₃. Akan tetapi berdasarkan pengalaman yang ada menunjukkan perlu ada beberapa modifikasi untuk proses peleburan/melting dan casting komposit supaya dihasilkan kualitas casting yang tinggi. Beberapa hal berikut ini adalah perbedaan dalam pengecoran komposit, yaitu sebagai berikut^[5]:

1. Proses peleburan dalam lingkungan gas inert menjadi pertimbangan yang harus dilakukan. Pada metode *degassing* konvensional seperti memasukkan tablet *degassing* atau injeksi gas argon dengan disertai pengadukan dalam logam cair dapat menyebabkan pembentukan gelembung gas pada permukaan partikel penguat dan pada gilirannya akan mengakibatkan *dewetting* partikel keramik.
2. Temperatur logam cair harus dikontrol dengan baik untuk mencegah *overheating* dan pembentukan *aluminum carbide*.
3. Logam cair harus diaduk secara perlahan selama casting untuk menjaga distribusi partikel penguat tersebar merata. Partikel penguat tidak melebur dan larut dalam matrik Al dan karena densitas partikel penguat lebih besar dibanding matrik Al, maka partikel penguat cenderung mengendap dibawah permukaan furnace atau krusibel.
4. Turbulensi selama casting harus dihindari untuk mencegah terperangkapnya gas.

Teknik dan peralatan proses peleburan A-MMCs sama dengan proses peleburan untuk paduan Aluminium. Peleburan untuk bahan monolitik seperti dapur induksi, *electric-resistance* dan burner bisa juga digunakan untuk peleburan komposit MMC. Jika digunakan gas pelindung seperti argon maka krusibel

terlebih dahulu di isi dengan gas *inert*. Ingot A-MMCs terlebih dahulu dikeringkan diatas temperatur 200°C untuk membuang atau melepaskan uap air yang tidak diinginkan. Peralatan peleburan seperti skimmer, ladle dan termokopel harus dicoating dan dikeringkan sebelum digunakan. Proses penuangan A-MMCs sama seperti penuangan paduan Al, akan tetapi temperatur logam cair dijaga agar tidak *overheating* karena dapat mengakibatkan pembentukan aluminim karbida (Al_4C_3). Reaksi tersebut terjadi sangat lambat pada temperatur sekitar 780°C akan tetapi dapat dipercepat bila temperatur naik hingga sekitar 780 – 800°C. Karbida Al_4C_3 mengendap sebagai kristal yang berpengaruh buruk terhadap fluiditas logam cair, menurunkan kekuatan material dan menurunkan ketahanan korosi hasil casting.

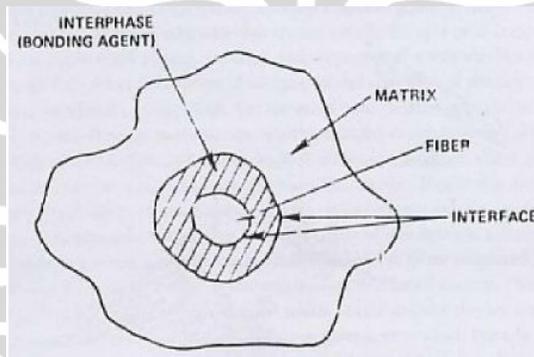
Untuk mendistribusikan partikel penguat secara merata dalam matrik Al maka dilakukan proses pengadukan dengan parameter tertentu. Proses pengadukan itu sendiri dilakukan secara perlahan untuk mencegah terjadinya aliran vortex pada permukaan logam cair dan memecah lapisan permukaan karena dapat mengakibatkan masuknya dross atau kotoran kedalam logam cair. Pengadukan secara mekanik menggunakan impeler akan menghasilkan sifat mekanik optimum jika dilakukan secara terus menerus. Berbagai jenis dan bentuk serta posisi impeller dicoba dan digunakan untuk mendapatkan hasil stir casting yang optimum. Parameter proses pengadukan dan casting lain seperti kecepatan pengadukan, perbandingan diameter impeller dengan krusibel, perbandingan kedalaman impeller terhadap krusibel juga sangat mempengaruhi kualitas casting terutama porositas dan homogenitas partikel.

Melt-particle slurry dapat dicetak menggunakan teknik pengecoran logam konvensional seperti gravity, pressure die, sentrifugal casting dan sebagainya. Pemilihan teknik pencetakan dan konfigurasi cetakan adalah sangat penting dan menentukan kualitas komposit. Partikel penguat seperti grafit, mika, talk, porous alumina yang memiliki densitas lebih ringan dibanding logam cair, maka akan cenderung mengalami segregasi pada bagian atas, sedangkan untuk partikel penguat seperti SiC, dan Al_2O_3 yang memiliki berat jenis lebih tinggi dari logam cair akan mengalami segregasi pada bagian bawah. Distribusi partikel hasil casting menentukan karakteristik produk komposit. Distribusi partikel tergantung

dari kualitas *melt-particle slurry* sebelum dicetak dan dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti kecepatan pendinginan, viskositas logam cair, bentuk, ukuran dan fraksi volume penguat, densitas matrik dan penguat serta adanya segregasi atau *clustering* partikel penguat.^[5]

2.4 Antarmuka/Interface Matrik Dan Penguat

Interface merupakan daerah planar dengan ketebalan hanya beberapa mikron dan pada daerah ini terjadi perubahan sifat dari matrik ke penguat. Interface matrik dan penguat ditunjukkan pada Gambar 2.9. Pengertian klasik dari antarmuka yaitu permukaan yang terbentuk diantara matriks dan penguat dan mengalami kontak dengan keduanya dengan membuat ikatan antara keduanya untuk perpindahan beban.



Gambar 2.9. Skematik interface matrik – penguat^[25]

Interface dari komposit sangat mempengaruhi karakteristik komposit, karena *interface* berpengaruh terhadap proses tranfer beban antara matrik dan penguat. Interface yang kuat memberikan kekuatan yang tinggi begitu juga sebaliknya. Sifat-sifat seperti ketahanan creep, kekuatan fatik dan ketahanan korosi juga dipengaruhi oleh interfacenya.

2.4.1 Mekanisme Adhesi Pada Interface

Interface atau Antarmuka mempunyai sifat fisik dan mekanik yang unik dan tidak merupakan sifat masing-masing matriks maupun penguatnya. antarmuka biasanya diusahakan 'tanpa ketebalan (atau volume)' dan mempunyai ikatan yang sangat bagus. Konsep dua dimensi dari antarmuka sekarang berubah menjadi tiga dimensi yang sering disebut '*interphase*'. *Interphase* yaitu permukaan dari

matriks-penguat klasik dengan ketebalan tertentu dimana sifat fisik, kimia, dan morfologinya berbeda dari *bulk material*-nya. Pada daerah ini terjadi reaksi kimia, tegangan sisa, dan terjadi perubahan volume. Pengertian tersebut yang sekarang sering disebut dengan antarmuka. Antarmuka bisa berupa ikatan atom yang sederhana (antara alumina dan aluminium murni), bisa juga berupa reaksi antar matriks (aluminium karbida antara aluminium dan serat karbon), atau penguatan pada pelapisan. Untuk mengontrol antarmuka agar mempunyai sifat mekanis yang bagus maka perlu untuk mempelajari mekanisme adhesi dan mekanika perpindahan beban pada antarmuka. Antarmuka sangat berpengaruh terhadap kekuatan, kekakuan, ketangguhan, ketahanan mulur, dan degradasi terhadap lingkungan. Secara umum terdapat beberapa teori tentang mekanisme adhesi yaitu adsorpsi dan pembasahan, gaya tarik muatan listrik, interdifusi, ikatan kimia dan ikatan mekanik^[26,27], yang dapat dijabarkan sebagai berikut.

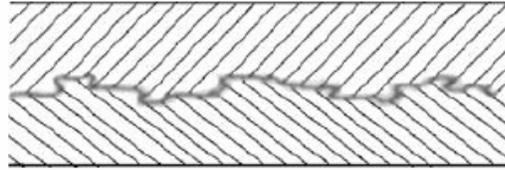
2.4.1.1 Adsorpsi dan Pembasahan

Adsorpsi adalah suatu proses yang terjadi ketika suatu cairan berkumpul di atas permukaan suatu benda padat atau suatu cairan. Adsorpsi terjadi apabila lelehan logam membasahi permukaan penguat keramik sehingga terjadi suatu ikatan. Terjadinya pembasahan akibat adsorpsi apabila lelehan logam dalam hal ini aluminium mempunyai energi permukaan lebih rendah dibanding penguat keramik. Pada umumnya aluminium tidak dapat membasahi dengan baik partikel keramik seperti SiC dan Al₂O₃. Beberapa teknik dapat digunakan untuk meningkatkan pembasahan (*wettability*) antara matrik dan partikel penguat, diantaranya adalah dengan menambahkan elemen reaktif seperti magnesium, kalsium atau titanium pada lelehan logam sehingga energi permukaan lelehan aluminium rendah.

2.4.1.2 Mechanical Bonding

Mekanisme penguncian (*interlocking*) terjadi antara 2 (dua) permukaan, yaitu penguat dan matrik. Kondisi permukaan yang kasar dapat menyebabkan *interlocking* yang terjadi semakin banyak dan *mechanical bonding* menjadi semakin efektif. Ikatan menjadi efektif jika beban yang diberikan paralel terhadap

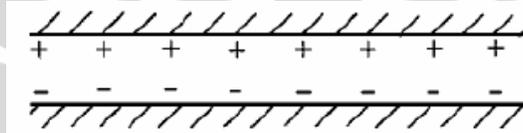
interface. Mekanisme *mechanical bonding* dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Mekanisme *mechanical bonding*^[26,27]

2.4.1.3 Electrostatic Bonding

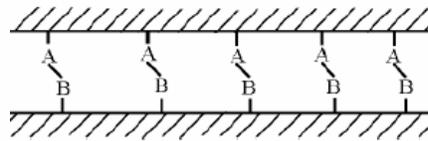
Electrostatic bonding, yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 merupakan ikatan yang terjadi akibat gaya tarik menarik antara permukaan yang berbeda tingkat kelistrikanya, yaitu adanya muatan positif (+) dan muatan negatif (-) dan terjadi dalam skala atomik. Efektifitas terhadap jenis ikatan ini akan menurun jika ada kontaminasi permukaan dan kehadiran gas yang terperangkap.



Gambar 2.11. Mekanisme *electrostatic bonding*^[26,27]

2.4.1.4 Chemical Bonding

Chemical bonding seperti pada Gambar 2.12 dibentuk oleh grup-grup yang bersifat kimia pada permukaan penguat dan matrik. Kekuatan ikatan ditentukan oleh jumlah kimiawi menurut luas dan tipe ikatan kimia itu sendiri. Ikatan kimia ini terbentuk karena ada *wetting agent*.



Gambar 2.12. Mekanisme *chemical bonding*^[26,27]

2.4.2 Pengaruh Antarmuka Terhadap Karakteristik Mekanik Komposit

Berdasarkan jenis bentuk penguatnya, komposit dapat diklasifikasikan menjadi beberapa tipe komposit yaitu partikulat, *short fibre* dan *long fibre*. Adapun sifat komposit dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah jenis material komposit yang digunakan, fraksi volum penguat, jenis penguat, dimensi

dan distribusi penguat, dan beberapa variabel proses lainnya. Komposit matrik logam dikembangkan untuk meningkatkan kekuatan spesifik dan modulus spesifik dan terutama untuk aplikasi pada temperatur tinggi dengan matrik dari paduan logam ringan (Al, Mg, Ti). Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan penguat dari keramik dalam bentuk partikulat atau serat, akan tetapi kombinasi matrik dan penguat pada MMC secara termodinamika tidak stabil dan bereaksi. Matrik logam seperti paduan Al, Mg dan Ti umumnya memiliki *wettability* dan adhesi rendah^[20]. Kemampuan membasahi (*wettability*) matrik seperti aluminium terhadap penguat SiC yang rendah karena keramik mempunyai sifat inert pada temperatur rendah, sehingga proses difusi antar atom pada permukaan sulit terjadi. Pada komposit Al/SiC juga dapat terbentuk *interphase* yang keras dan getas. *Wettability* yang kurang baik dan adanya *interphase* ini akan mempengaruhi karakteristik mekaniknya seperti modulus elastisitas dan kekuatan tarik. Salah satu upaya untuk memperbaiki *wettability* adalah dengan melakukan pelapisan pada partikel atau penguat SiC. *Wettability* ditentukan antara cairan dan padatan berdasarkan pengujian *sessile drop* dapat ditunjukkan pada Gambar 2.13. Sedangkan perhitungan sudut kontak dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

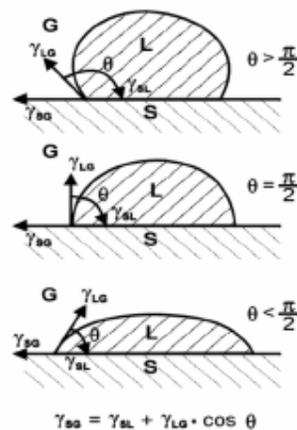
$$\cos\theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (2.11)$$

Diman θ : sudut kontak

γ_{sv} : tegangan permukaan solid - uap

γ_{sl} : tegangan permukaan solid - liquid

γ_{lv} : tegangan permukaan liquid - uap



Gambar 2.13. Variasi Sudut kontak komposit Al/Al₂O₃^[3].

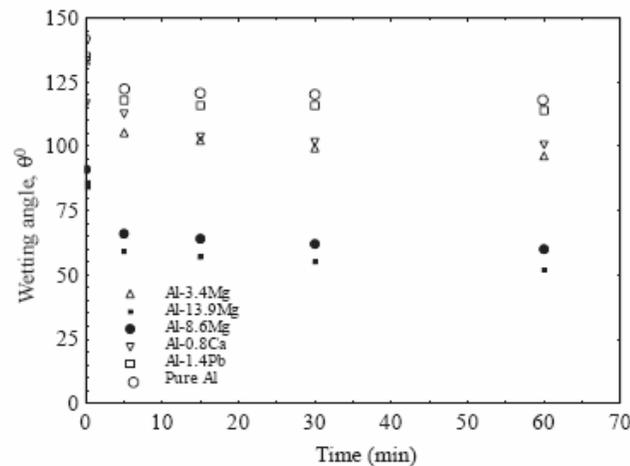
Sudut kontak $> 90^\circ$ adalah *non-wetting*, sedangkan sudut kontak $< 90^\circ$ memiliki *wettability* yang baik. *Wettability* adalah suatu fenomena kompleks yang tergantung dari beberapa faktor di antaranya adalah geometri dari antar muka, temperatur proses dan waktu. Sebagai contoh *wettability* komposit Al/SiC kurang baik karena terjadi reaksi kimia antara Al dan SiC membentuk *interphase* dengan reaksi sbb :



Reaksi tersebut jika berlangsung terus menerus akan menurunkan karakteristik komposit karena fasa Al₄C₃ yang rapuh atau getas pada interface Al/SiC. Studi mengenai *wettability* dari AL terhadap penguat SiC telah banyak dilakukan baik melalui modifikasi terhadap matrik Al maupun adanya perlakuan permukaan dengan pelapisan terhadap penguat SiC. Moraes et.al^[28], melaporkan bahwa kadar Si dan Mg ternyata mempengaruhi *wettability* atau sudut kontak antara matrik dan penguat dan juga perlakuan panas terhadap paduan tersebut. Bahan yang digunakan adalah paduan Al dengan kadar Mg dan Si bervariasi. Kadar Mg dan Si tinggi menghasilkan sudut kontak relatif lebih kecil dibanding dengan paduan Al dengan kadar Mg dan Si rendah. Unsur Si tinggi dapat meningkatkan fluiditas paduan sedangkan elemen pepadu Mg dapat mempengaruhi sudut kontak karena mampu meningkatkan *driving forced* pembasahan.

Penelitian pengaruh penambahan elemen Ca, Pb dan Mg telah dilakukan oleh Ercan CANDAN^[29]. Sudut kontak menurun sebanding dengan penambahan

0,8%Ca atau 1,4%Pb dan Mg dengan kadar 3,4; 8,6 dan 13,9%. *Wettability* yang baik dicapai pada kadar Mg 8,6 dan 13,9%. Pada Gambar 2.14 memperlihatkan pengaruh elemen paduan terhadap sudut kontak. Kadar unsur Mg 8,6 dan 13,3% menghasilkan sudut kontak kurang dari 90° . Untuk Al murni, paduan Al-3,4Mg, Al-0,8Ca, dan paduan Al – 1,4Pb memiliki sudut kontak lebih dari 90° . Sedangkan struktur mikro antarmuka komposit Al/SiC diperlihatkan pada Gambar 2.15.



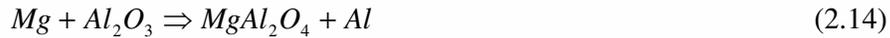
Gambar 2.14. Sudut kontak paduan Al dengan metode uji *sessile drop*^[29].



Gambar 2.15. Mikrograf antar muka matrik paduan Al dengan partikel SiC (a) Al murni – SiC (b) paduan Al-13,9Mg dengan partikel SiC^[29].

Adanya kadar Mg tinggi sehingga dapat menurunkan sudut kontak karena magnesium merupakan logam yang sangat reaktif dan memiliki tegangan superfisial dan sudut kontak paling rendah di bandingkan Al dan SiC sehingga keberadaannya sangat penting pada saat proses infiltrasi Al dan SiC karena dapat

mencegah terbentuknya interphase Al_4C_3 . Magnesium berfungsi sebagai surfaktan, akan bereaksi dengan alumina membentuk spinel $MgAl_2O_4$ pada interface Al/SiC seperti diperlihatkan dengan persamaan dibawah.



Oksida logam yang dilapiskan pada partikel SiC dapat mempengaruhi modulus elastik komposit Al/SiC^[8]. Proses pelapisan oksida logam tersebut dilakukan dengan metode *electroless coating*. *Elektroless coating* merupakan salah satu metode pelapisan dengan cara mendepositkan logam dalam larutan menggunakan zat pereduksi. Kation logam dalam larutan akan direduksi dan mengendap pada permukaan partikel SiC. Partikel SiC dilapis menggunakan larutan elektrolit HNO_3 yang ditambahkan unsur Al, Mg dan Cu lalu dioksidasi dalam *furnace* hingga terbentuk oksida Al_2O_3 , MgO dan CuO ^[9].

2.5 Mekanisme Penguatan Pada Aluminium-Metal Matrix Composites

Karakteristik A-MMCs ditentukan oleh struktur mikro dan *intenal interface*, yang dipengaruhi oleh proses pembuatan dan termo mekaniknya. Struktur mikro meliputi struktur matrik dan penguat. Komposisi kimia, besar butir dan sub-butir, texture, perilaku pengendapan, dan cacat kristal adalah karakteristik penting dari matrik. Sedangkan untuk penguat dikarakterisasi oleh fraksi volume, jenis penguat, ukuran penguat serta distribusi dan orientasinya. Perbedaan CTE antara matrik dan penguat juga memberikan pengaruh terhadap karakteristik mekanik komposit.

Pengaruh partikel penguat terhadap sifat mekanis komposit dapat dideskripsikan menggunakan model *micromechanical* sebagai berikut^[30]:

$$\Delta R_{p,c} = \Delta \sigma_{\alpha} + \sigma_{KG} + \Delta \sigma_{SKG} + \Delta \sigma_{KF} \quad (2.15)$$

$\Delta R_{p,c}$ adalah kenaikan kekuatan tarik bahan aluminium akibat penambahan partikel penguat. Dari persamaan tersebut terlihat bahwa kenaikan kekuatan komposit dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah densitas dislokasi, ukuran butir, ukuran sub-butir dan strain hardening. Faktor-faktor peningkatan

kekuatan tersebut disebabkan oleh adanya penambahan partikel penguat dengan mekanisme penguatan yang dijabarkan sebagai berikut.

2.5.1 Penguatan Dislokasi / *Dislocation Strengthening*

Adanya partikel penguat dalam matrik dapat memperbesar densitas dislokasi. Densitas dislokasi yang lebih besar dari A-MMCs disebabkan oleh adanya nilai CTE yang berbeda antara matrik dengan penguat. Kenaikan densitas dislokasi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\Delta\rho = \frac{BV_f\varepsilon}{b(1-V_f)} \times \frac{1}{t} \quad (2.16)$$

Dimana B adalah konstanta geometri, b vektor burger, t adalah dimensi paling kecil dari inklusi dan ε adalah *misfit strain* yang dihitung dengan persamaan :

$$\varepsilon = \Delta CTE \left(\frac{t}{2} \right) \quad (2.17)$$

Peningkatan tegangan luluh matrik ditentukan dengan persamaan :

$$\Delta\sigma_\alpha^y = \beta\mu b\sqrt{\rho} \quad (2.18)$$

μ : modulus geser aluminium

β : konstanta dengan noilai 1.25 untuk aluminium

2.5.2 Penguatan Ukuran Butir / *Grain Size Strengthening*

Besar butir matrik AMC lebih kecil dibanding dalam paduannya. Hal ini disebabkan terjadi penghambatan pertumbuhan butir oleh adanya fasa atau partikel penguat yang terdispersi dalam matrik.

Pengaruh dari besar butir , $\Delta\sigma_{KG}$ diberikan oleh persamaan :

$$\Delta\sigma_{KG} = k_{Y1} \frac{1}{\sqrt{D}} \quad (2.19)$$

Dengan

$$D = d \left(\frac{1 - \Phi_p}{\Phi_p} \right)^{1/3} \quad (2.20)$$

Pengaruh besar butir diberikan oleh persamaan :

$$\Delta\sigma_{SKG} = k_{Y2} \frac{1}{\sqrt{D_s}} \quad (2.21)$$

Dengan

$$D_s = d \left(\frac{\pi d^2}{6\Phi_p} \right)^{1/2} \quad (2.22)$$

Dimana $\Delta\sigma_{SKG}$ kontribusi tegangan luluh karena perubahan ukuran sub-butir, k_{Y2} adalah konstanta ($0.05 \text{ MN m}^{-3/2}$) dan D_s adalah sub-butir yang dihasilkan.

2.5.3 Penguatan Partikel / *Particle Strengthening*

Penguatan oleh fasa terdispersi atau partikel dapat ditentukan dengan persamaan *rule of mixture* yang secara umum dinyatakan sebagai

$$P_{agg} = \sum_1^n (P_i \cdot f_i) \quad (2.23)$$

Dimana P_{agg} adalah sifat dari komposit seperti modulus elastisitas dan kekuatan luluh, P_i adalah sifat konstituen ke- i dan f_i adalah fraksi volume konstituen ke- i . Persamaan (2.23) tersebut umumnya digunakan untuk sifat kekuatan luluh. Partikel penguat dalam matrik berfungsi sebagai penghambat atau menghalangi pergerakan dislokasi. Peningkatan kekuatan luluh, $\Delta\sigma$ yang disebabkan oleh partikel penguat dinyatakan secara proporsional dengan persamaan sebagai berikut

$$\Delta\sigma \propto \frac{1}{\lambda} \quad (2.24)$$

Dimana λ adalah jarak antar partikel. Dari persamaan tersebut menunjukkan bahwa jarak antar partikel semakin kecil maka kenaikan tegangan luluh makin besar. Fraksi volume penguat juga berpengaruh terhadap kekuatan, namun lebih dominan oleh ukuran partikel. Untuk fraksi volume yang sama, ukuran partikel lebih kecil menghasilkan kekuatan lebih tinggi dari pada ukuran partikel besar. Interaksi dislokasi – partikel juga menimbulkan regangan mikro yang disebabkan oleh perbedaan regangan elastis antara matrik dan partikel. Peningkatan tegangan luluhnya dinyatakan dengan persamaan.

$$\Delta\sigma \propto \varepsilon \cdot f \quad (2.25)$$

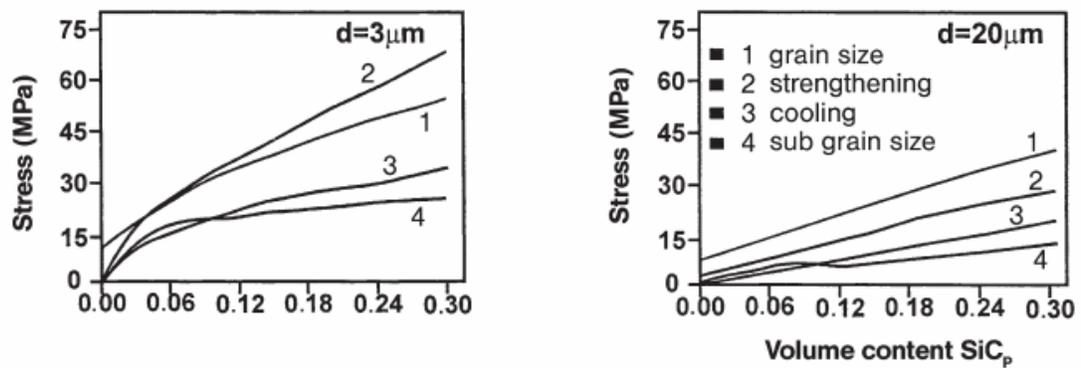
Dimana ε adalah medan regangan elastis dan f adalah fraksi volume partikel penguat. Persamaan (2.24) digunakan untuk kondisi *noncoherent particles* sedangkan persamaan (2.25) untuk *coherent particles*.

Pengaruh strain hardening diberikan oleh persamaan berikut :

$$\Delta\sigma_{KF.} = KG\Phi_p \left(\frac{2b}{d}\right)^{1/2} \cdot \epsilon^{1/2} \quad (2.26)$$

Dimana d ukuran partikel penguat dan ϵ elongasi.

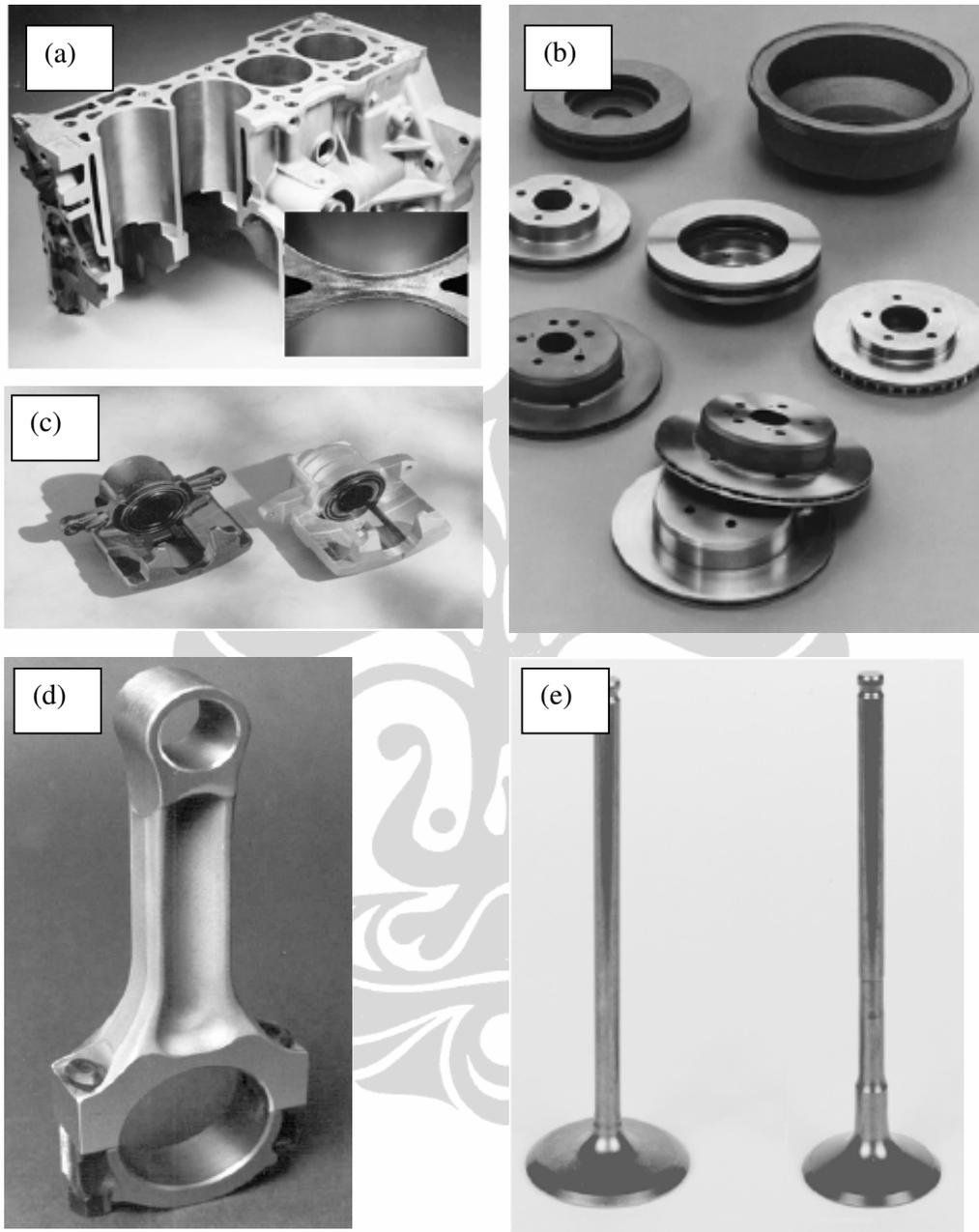
Dari persamaan-persamaan diatas bahwa ukuran partikel dan fraksi volume partikel sama-sama memberikan pengaruh terhadap kekuatan komposit yang dihasilkan. Akan tetapi pengaruh terhadap kekuatan dominan disebabkan oleh ukuran partikel. Umumnya kontribusi penguatan lebih besar dicapai oleh partikel lebih kecil dibanding partikel lebih besar. Untuk ukuran partikel yang lebih kecil, work hardening dan besar butir berpengaruh besar terhadap peningkatan kekuatan luluh (Gambar 2.16)



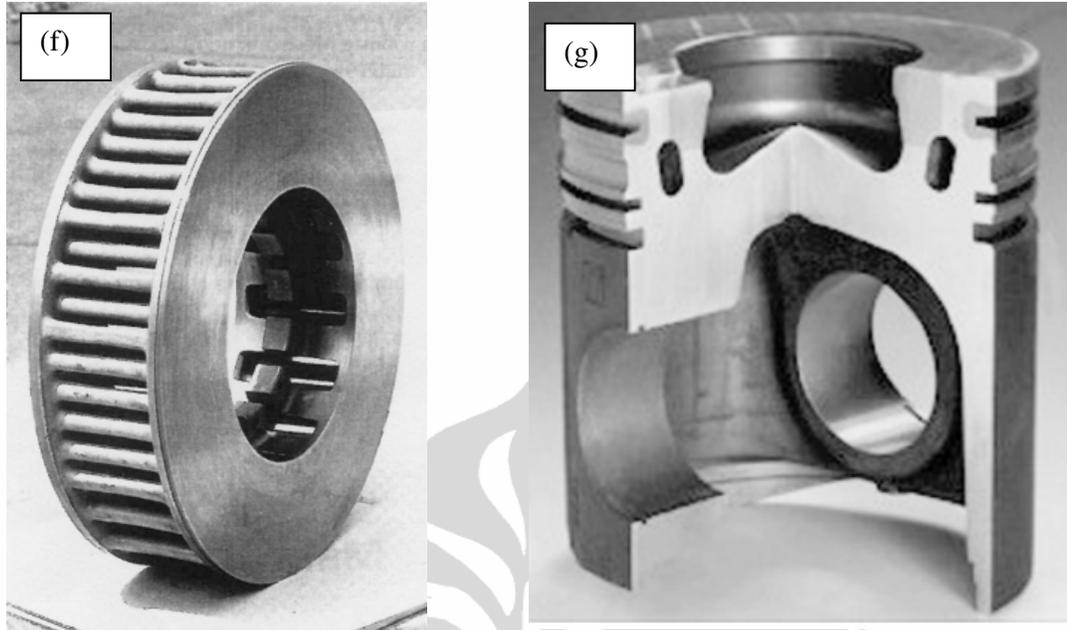
Gambar 2.16. Kontribusi regangan dengan mekanisme berbeda terhadap kekuatan tarik komposit Al-SiC^[30]

2.6 Aplikasi Aluminium – Metal Matrix Composites

Pada tahun 2004, lebih dari 3,5 juta Kg bahan AMCs telah digunakan pada berbagai industri terutama industri transportasi, penerbangan, elektronik, otomotif dan olah raga. Penggunaan AMCs tersebut dari tahun ke tahun akan terus meningkat cepat dengan laju pertumbuhan pertahun mencapai 6%^[4]. Di beberapa negara baik asia maupun eropa, AMCs telah banyak digunakan secara komersial pada komponen mesin seperti *piston, connecting rod, brake system (brake rotor dan brake drum), cylinder liner* dan *valves*^[5]. Gambar 2.17 memperlihatkan beberapa aplikasi material komposit dalam industri.

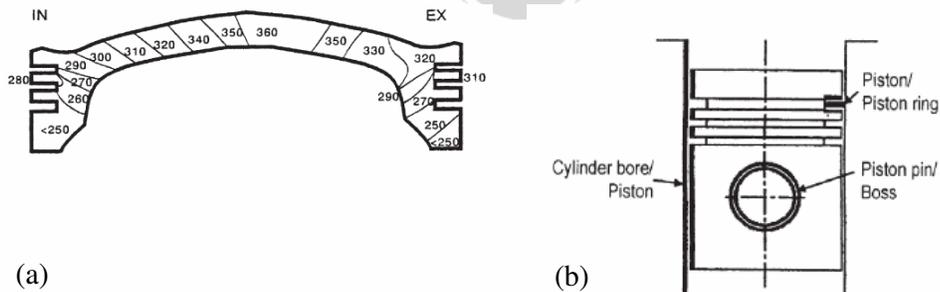


Gambar 2.17. Aplikasi komposit dalam industri (a) cylinder liner (b) brake rotor (c) calliper (d) connecting rod (e) valves^[3,5,6]



Gambar 2.17. Aplikasi komposit dalam industri (f) cast brake disc (g) piston^[3,5,6] (lanjutan)

Karakteristik yang harus dimiliki komponen tersebut dapat dipenuhi oleh AMCs, terutama sifat tahan temperatur tinggi, tahan aus dan *coefisien thermal expansion* rendah. Sebagai contoh untuk komponen piston dalam aplikasinya mengalami beban dinamis baik mekanik maupun termal, temperatur pada *piston dome* mencapai lebih dari 300°C (Gambar 2.18.a). Secara skematik sistem operasi piston dapat dilihat pada Gambar 2.18.b.



Gambar 2.18. Sistem operasi dan distribusi temperatur piston (a) distribusi temperatur pada piston dome (b) sistem tribologi pada sekitar *cylinder bore*^[6]

Piston mengalami beban dinamis hingga mencapai frekuensi sekitar 100 Hz^[6]. Sehingga diperlukan sifat ketahanan fatik yang baik dan merupakan persyaratan utama dari komponen tersebut. Sifat lain yang harus dimiliki adalah kestabilan dimensi, ketahanan aus dan *coefisien thermal expansion* (CTE) rendah, karena *gap/clearance* antara *cylinder bore* dengan piston sangat kecil. Selain itu juga konduktivitas panas harus tinggi guna mengurangi temperatur dan tegangan termal^[6]. Pada komponen sistem pengereman seperti *brake rotor* dan *brake drum*, memerlukan sifat tahan aus dan konduktivitas panas tinggi. Dengan menggunakan bahan AMCs persyaratan tersebut dapat dipenuhi dan dapat mengurangi berat komponen hingga 50-60% dibanding bahan besi tuang^[6,7]. Keuntungan lain dari AMCs untuk *brake rotor* adalah mengurangi *brake noise* dan keausan serta menghasilkan gesekan yang lebih seragam.

