

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu yang menjadi fokus dalam industri dirgantara dan otomotif adalah pengembangan material komposit, tepatnya, *Metal Matrix Composite* (MMC). Material jenis ini sering menjadi pilihan karena sifat-sifat mekanik yang sulit diperoleh dari material alami, dapat terpenuhi dengan menggabungkan beberapa material dengan sifat yang diinginkan. Karenanya, pengembangan MMC menjadi bidang yang cukup diminati dalam ilmu material (Boopathi, et al., 2013).

Aluminium Matrix Composite (AMC) merupakan salah satu MMC yang telah banyak digunakan di industri dikarenakan massa yang ringan, tahan lama, dan sifat mekaniknya yang luar biasa, seperti kekuatan dan ketahanan aus yang tinggi, ekspansi termal rendah, dan konduktivitas listrik yang baik membuat AMC dapat menggantikan aluminium paduan konvensional (Chandel, dkk., 2021).

Komposit matriks aluminium digunakan di bidang industri dirgantara dan otomotif karena berbagai manfaat ekonomi dan lingkungan. Salah satu alasannya adalah massanya yang ringan secara langsung dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan biaya produksi. AMC dapat diproduksi dengan pemrosesan padat (solid state process) atau pemrosesan cair (liquid state process). Fabrikasi AMC kebanyakan menggunakan pemrosesan cair, terutama stir casting dikarenakan kesederhanaan dan skalabilitasnya yang baik (Singh, L., dkk., 2021).

Berbagai kelebihan dari AMC merupakan hasil dari paduan material penguat. Beberapa penguat yang digunakan antara lain B₄C, TiC, SiC, Al₂O₃, ZrSiO₄, CNT, Fly Ash, dan Mg. Studi oleh Selvam, dkk. (2013) menunjukkan bahwa penambahan partikel 10% SiC meningkatkan kekerasan dan kekuatan tarik dari Al6061 sekitar 46% dan 42% berturut-turut. Studi lainnya oleh Zhu, dkk. (2020) meneliti pembuatan komposit Al6082 dengan penguat partikel nano SiC dengan stir-squeeze casting, kemudian dilanjutkan dengan perlakuan panas T6 yang terbukti meningkatkan kekuatan tarik dan luluh sebesar 29,81% dan 43,18% dibandingkan dengan material dasarnya. Dengan dilakukannya squeeze casting, cacat porositas dan penyusutan berkurang secara signifikan dibandingkan dengan gravity casting.

Dalam penelitian oleh Boopathi, dkk. (2013) dilakukan pengecoran komposit Al-Cu/SiC dengan teknik stir casting (200 rpm, 5 menit) dengan penambahan 1,5% Mg dan 10% SiC menghasilkan komposit dengan kekuatan tarik dan kekerasan sebesar 293 MPa dan 95,7 BHN berturut-turut. Gugulothu, dkk. (2022) mencoba untuk membuat AMC dengan variasi kecepatan pengadukan dan beban tekan. Diperoleh bahwa kecepatan pengadukan 300 rpm dan beban tekan 50 MPa memberikan hasil terbaik. Studi lainnya oleh Senthil & Amirthagadeswaran (2012) menunjukkan hasil optimal dengan beban tekan 50 MPa, sedangkan beban tekan

yang terlalu tinggi tidak memberikan perubahan yang signifikan pada sifat mekanik komposit yang dibuat.

Menurut Hanizam, dkk. (2019), penguatan komposit meliputi mempertimbangkan beberapa variabel seperti (1) metode persiapan untuk pemurnian dan pengaktifan material, (2) proses pencampuran (temperatur, teknik mencampur, komposisi penguat, dan agen pembasah), dan (3) metode lanjutan (menyinter, ekstrusi, kompaksi, thixo, dan perlakuan panas). Dalam studi ini juga didapati bahwa partikel penguat memberikan efek yang lebih kecil dibandingkan dengan parameter pengecoran (dalam hal ini durasi pengadukan). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa parameter pengecoran sangat berpengaruh pada hasil AMC yang dibuat.

Pengoptimalan parameter pengecoran seringkali dilakukan dengan membuat Design of Experiment (DOE). Salah satu DOE yang lazim digunakan ialah metode Taguchi. Gurkan dan Cebeci (2016) menyatakan bahwa metode Taguchi merupakan alat terbaik untuk mengoptimalkan parameter dalam pengembangan komposit. Shivalingaiah, dkk. (2022) menggunakan metode taguchi untuk mengoptimalkan beberapa faktor dengan pengujian eksperimental terbatas dengan tetap memastikan kualitas dari produk.

Berdasarkan uraian di atas dan literatur yang telah ditinjau sebelumnya, penulis tertarik untuk melakukan penelitian serupa untuk mengoptimalkan parameter stir-squeeze casting aluminium komposit berpenguat SiC dengan metode Taguchi dengan variasi kecepatan pengadukan, durasi pengadukan, dan tekanan, yang diharapkan dapat menjadi metode baru dalam pendistribusian SiC dalam paduan aluminium komposit. Untuk alasan itu, penulis mengangkat judul "Optimisasi Parameter Stir-Squeeze Casting Aluminium Komposit Berpenguat SiC dengan Metode Taguchi untuk Aplikasi Connecting Rod".

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka dapat dirumuskan beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi parameter *stir-squeeze casting* (kecepatan pengadukan, durasi pengadukan, dan tekanan) terhadap sifat fisik (densitas dan porositas) Al-Cu/SiC/Mg.
2. Bagaimana pengaruh variasi parameter *stir-squeeze casting* (kecepatan pengadukan, durasi pengadukan, dan tekanan) terhadap kekerasan Al-Cu/SiC/Mg.
3. Bagaimana pengaruh variasi parameter *stir-squeeze casting* (kecepatan pengadukan, durasi pengadukan, dan tekanan) terhadap kekuatan tarik Al-Cu/SiC/Mg.

1.3 Tujuan Penelitian

Setelah mengetahui latar belakang dan rumusan masalah di atas, adapun tujuan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi parameter *stir-squeeze casting* (kecepatan pengadukan, durasi pengadukan, dan tekanan) terhadap sifat fisik (densitas dan porositas) Al-Cu/SiC/Mg.
2. Menganalisis pengaruh variasi parameter *stir-squeeze casting* (kecepatan pengadukan, durasi pengadukan, dan tekanan) terhadap kekerasan Al-Cu/SiC/Mg.
3. Menganalisis pengaruh variasi parameter *stir-squeeze casting* (kecepatan pengadukan, durasi pengadukan, dan tekanan) terhadap kekuatan tarik Al-Cu/SiC/Mg.
4. Menganalisis struktur mikro spesimen hasil *stir-squeeze casting* Al-Cu/SiC dengan variasi kecepatan pengadukan, durasi pengadukan, dan beban penekanan.

1.4 Batasan Masalah

Berikut batasan-batasan masalah dalam penyusunan tugas akhir ini:

1. Aluminium yang digunakan ialah Al 2024.
2. Kandungan SiC adalah 15 wt.%.
3. Kandungan Mg adalah 3 wt.%.
4. Variasi kecepatan putaran 150 rpm, 350 rpm, dan 500 rpm.
5. Variasi durasi pengadukan 5 menit, 10 menit, 15 menit.
6. Variasi tekanan 0 MPa, 15 MPa, dan 25 MPa.
7. Pengujian tarik menggunakan 3 spesimen untuk setiap variasi.
8. Suhu cetakan 450 °C.
9. Suhu penuangan 650 °C.
10. Suhu peleburan aluminium 720 °C.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat mengetahui sifat mekanik dan kualitas bahan di setiap variasi.
2. Mengembangkan metode baru dalam mensintesis logam Al-Cu komposit berpenguat SiC.
3. Dapat diaplikasikan untuk praktikum sintesis logam dalam skala laboratorium
4. Diharapkan dapat bermanfaat sebagai bahan kajian atau informasi bagi dunia kerja khususnya dalam mensintesis aluminium komposit berpenguat SiC.
5. Sebagai bahan referensi untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium

Aluminium adalah unsur ketiga yang paling banyak jumlahnya di bumi (setelah oksigen dan silikon), tapi, sampai tahun 1800-an, merupakan material yang mahal dan sulit untuk diproduksi.

Bijih aluminium yang penting adalah bauksit yang mengandung aluminium oksida (Al_2O_3). Sayangnya, Al_2O_3 tak dapat direduksi menjadi logam dengan memanaskannya dengan kokas (seperti dalam pengolahan bijih besi), karena atom aluminium berikatan sangat kuat dengan oksigen untuk dapat diuraikan dengan karbon. Karena hal inilah, elektrolisis yang pada saat itu tergolong mahal harus digunakan untuk menguraikan aluminium dari bauksit. Karena setiap kilo aluminium membutuhkan 91 mega joule, maka lokasi *smelter* harus berada di dekat pembangkit listrik tenaga air yang seringkali jaraknya sangat jauh dari sumber bijih maupun pasar bijih bauksit.

Aluminium murni (99,99%) dicirikan memiliki densitas rendah ($2,7 \text{ g/cm}^3$ sedangkan densitas baja adalah $7,9 \text{ g/cm}^3$), konduktivitas listrik dan termal yang tinggi, dan daya tahan terhadap oksidasi dan korosi dalam beberapa kondisi lingkungan, termasuk kondisi ruang. Aluminium dan paduannya banyak digunakan dalam produk dan aplikasi yang berhubungan langsung dengan kehidupan sehari-hari kita, dari foil aluminium untuk kemasan makanan dan kaleng aluminium untuk minuman sampai ke bagian struktur pesawat untuk bepergian. (Hussein, N., 2019).

2.1.1 Aluminium dan Paduannya

Aluminium paduan (*alloy*) dapat dibedakan menjadi dua kelompok: *wrought* dan *casting alloy*, pembagian ini bergantung pada metode pembentukannya. *Wrought alloy* (paduan tempa) dibentuk dengan deformasi plastis sedangkan *casting alloy* (paduan tuang) dibentuk dengan, sesuai namanya, pengecoran. Kemudian paduan ini dapat dibedakan lagi menjadi dua anak kelompok yakni: dapat diperlakukan panas (*heat treatable*) dan tak dapat diperlakukan panas (*non-heat treatable*).

Paduan aluminium ditandai dengan sebuah sistem penomoran yang terdiri dari empat digit seperti terlihat pada **Tabel 1**, di mana angka pertama menandai bahan paduan utamanya, selanjutnya menunjukkan komposisi spesifik dari aluminium paduan, dan angka terakhir menunjukkan bentuknya. Perlu diketahui bahwa untuk penomoran aluminium tempa dan tuang dibedakan dengan adanya decimal di antara angka ketiga dan keempat (Hussein, N., 2019). Contoh dari aluminium tempa dan cor dapat dilihat di **Tabel 1** berikut.

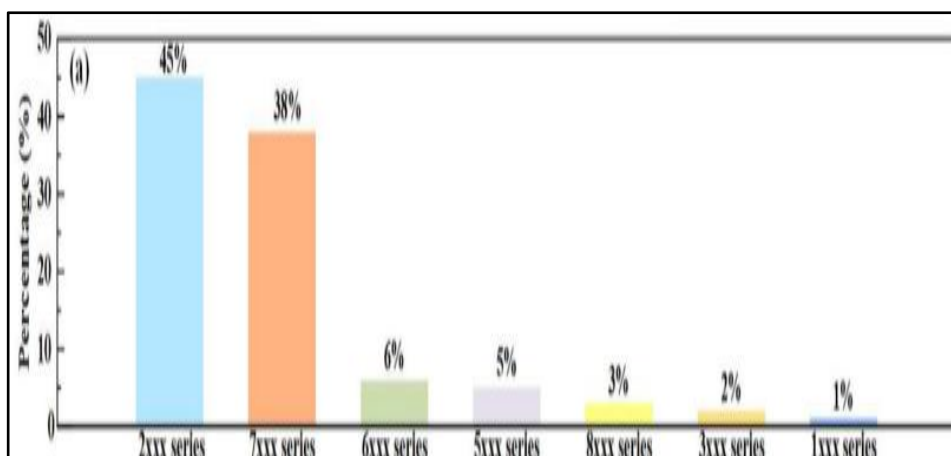
Tabel 1 Sistem penomoran paduan aluminium

Paduan Tempa		
Nomor Seri	Paduan Utama	Perlakuan Panas
1XXX	Al $\geq$ 99%	Tidak bisa
2XXX	Al-Cu(Mg)	Bisa
3XXX	Al-Mn	Tidak bisa
4XXX	Al-Si	Beberapa bisa (misalnya Al4032)
5XXX	Al-Mg	Tidak bisa
6XXX	Al-Mg-Si	Bisa
7XXX	Al-Zn-(Mg)-(Cu)	Bisa
8XXX	Al-(unsur lain)	Beberapa bisa (misalnya Al8090)
9XXX	Belum terpakai	
Paduan Tuang		
1XX.X	Al $\geq$ 99%	Tidak bisa
2XX.X	Al-Cu	Bisa
3XX.X	Al-Si (+Cu atau Mg)	Bisa
4XX.X	Al-Si	Tidak bisa
5XX.X	Al-Mg	Tidak bisa
6XX.X	Belum terpakai	
7XX.X	Al-Zn-(Mg)-(Cu)	Bisa
8XX.X	Al-Sn	Tidak bisa
9XX.X	Al-(unsur lain)	

Sumber: Lumley, R. N. (2011)

2.1.2 Aluminium 2024

Aluminium 2024 adalah aluminium paduan dengan tembaga sebagai unsur paduan utama. Aluminium jenis ini sering digunakan di bidang-bidang yang membutuhkan material dengan rasio kekuatan-massa yang tinggi dan juga memiliki ketahanan fatik yang baik. Aluminium ini hanya dapat dilas dengan las gesek dan sifat mampu mesinnya yang terbilang rata-rata (Kulkarni, 2015).



Gambar 1 Proporsi pengaplikasian paduan aluminium pada pesawat komersil.
Sumber: Li, dkk. (2023)

Aluminium 2024 diperkenalkan pada tahun 1931 dengan sifat mampu mesin yang baik, ketahanan fatik, kekuatan dan kekerasan yang tinggi, dan digunakan secara luas di industri dirgantara dan otomotif. Walaupun demikian, Al 2024 memiliki sifat tribologis yang rendah (ketahanan korosi rendah). Oleh karena itu, perlu pengembangan lebih lanjut agar komposisinya lebih tahan aus tanpa menghiraukan kekuatan keseluruhan komposisinya (Boopathi, dkk., 2013).

Telah banyak penelitian yang dilakukan untuk mengatasi hal tersebut, misalnya dengan mencampurkannya dengan silikon karbida (SiC), alumina (Al_2O_3), boron karbida (B_4C), dan *Fly Ash* (FA). Di antara partikel tersebut, SiC merupakan salah satu yang terbaik seperti biaya rendah, meningkatkan ketahanan aus, meningkatkan kekuatan tarik, dan mudah diperoleh (Reddy, P., dkk., 2017).

Tabel 2 Komposisi Kimia Al2024 (dalam wt.%)

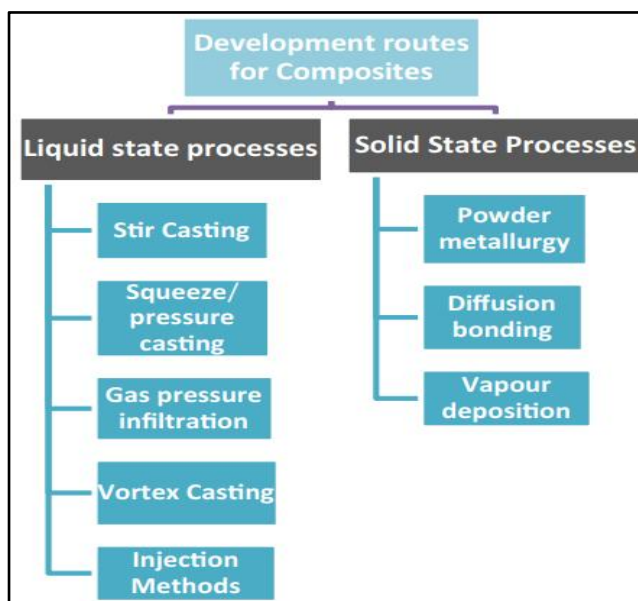
Al	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ni	Lainnya
92,19	4,76	1,63	0,53	0,36	0,34	0,18	0,002	0,348

2.2 Aluminium Matrix Composite

Metal matrix composite atau MMC adalah material komposit dengan setidaknya dua bagian konstituen, di mana salah satunya adalah logam. Material yang lain bisa jadi logam lain atau material lain seperti keramik atau bahan organik. Saat tiga atau lebih material digabungkan, sebutannya menjadi komposit hibrid.

MMC dibuat dengan menyebarkan material penguat ke logam matriks. Hal ini dapat dilakukan dengan berbagai cara yang dapat dilihat di Gambar 1. Permukaan dari partikel penguat dapat dilapisi untuk mencegah terjadinya reaksi kimia dengan matriks. Contohnya, serat karbon sering digunakan untuk membuat AMC dengan densitas rendah dan kekuatan tinggi. Akan tetapi, karbon dapat bereaksi dengan aluminium membentuk Al_4C_3 di permukaan serat. Senyawa ini sifatnya getas dan dapat larut di air. Maka, untuk mencegah hal ini, serat karbon dapat dilapisi dengan nikel atau titanium borida (Kulkarni, 2015).

Material jenis ini sering menjadi pilihan karena sifat-sifat mekanik yang sulit diperoleh dari material alami, dapat terpenuhi dengan menggabungkan beberapa material dengan sifat yang diinginkan. Karenanya, pengembangan MMC menjadi bidang yang cukup diminati dalam ilmu material (Boopathi, et al., 2013).



Gambar 2 Beberapa metode pengembangan MMC. Sumber: Chandel, dkk. (2021)

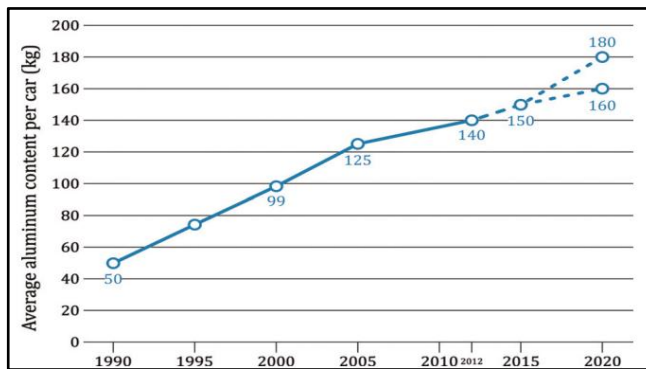
Aluminium Matrix Composite (AMC) adalah salah satu turunan dari MMC yang sesuai namanya, matriks utamanya adalah aluminium. Menurut Grand View Research (2014) dalam Singh, B., dkk. (2023), 30% dari seluruh permintaan material merupakan AMC. Disebutkan juga bahwa sampai 2023, AMC akan terus diminati dan menjadi “pemimpin” dari seluruh MMC. Material ini dapat diubah menjadi peralatan, eksterior pesawat luar angkasa untuk mengontrol radiasi nuklir, aplikasi panel surya, dan katalis reaksi kimia.

Dewasa ini, riset mengenai AMC telah menjadi area riset aktif selama beberapa decade. Material jenis ini dikenal akan sifat mekaniknya yang baik seperti kekuatan, kekakuan, dan ketahanan aus yang tinggi sehingga banyak digunakan dalam aplikasi dirgantara, otomotif, maupun militer.

2.2.1 Komponen Hasil Pengecoran AMC di Bidang Dirgantara dan Otomotif

Berbagai kelebihan dari AMC terutama biaya yang relatif rendah serta sifat alaminya yang ringan, tak heran jika AMC banyak diminati di industri seperti di bidang elektrikal, konstruksi dan bangunan, militer, dirgantara, dan juga otomotif (Chandel, dkk., 2021).

Hal ini didukung oleh riset oleh Stojanovic & Ivanovic (2015) yang menunjukkan bahwa terjadi pengurangan dari massa total sebuah mobil sebesar 2-2,5 kg tiap kilogram aluminium yang digunakan. Di lain sisi, peningkatan biaya bahan bakar di pasar dunia juga meningkatkan penggunaan aluminium dan mengurangi penggunaan baja yang lebih berat. Pengurangan massa mobil yang diperoleh ini secara langsung mengurangi konsumsi bahan bakar 5 sampai 7%.

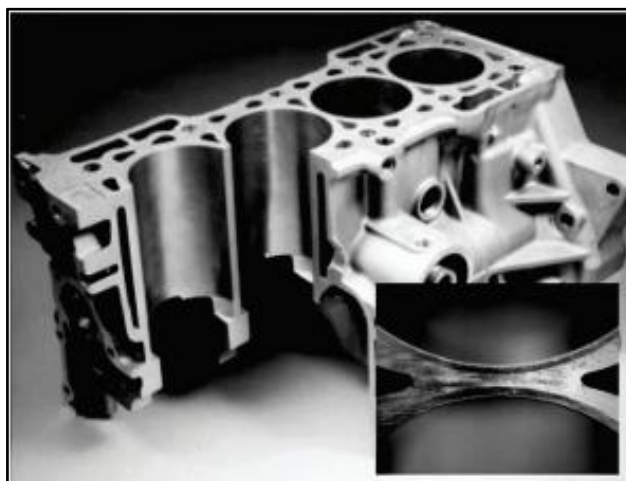


Gambar 3 Rata-rata kandungan aluminium pada tiap mobil di Eropa. Sumber: Srivyas & Charoob (2019)

Beberapa contoh dari hasil pengecoran aluminium di bidang dirgantara dan otomotif dapat di lihat di bawah ini.



Gambar 4 Piston dari AMC. Sumber: Stojanovic & Ivanovic (2015)



Gambar 5 Blok silinder dari AMC. Sumber: Stojanovic & Ivanovic (2015)



Gambar 6 *Connecting rod* dari AMC. Sumber: Stojanovic & Ivanovic (2015)



Gambar 7 Sistem pengereman dari AMC. Sumber: Stojanovic & Ivanovic (2015)



Gambar 8 *Head cone* pesawat dari AMC. Sumber: aero-parts.eu



Gambar 9 Impeller turbin pesawat dari AMC. Sumber: haworthcastings.co.uk

Salah satu contoh komponen yang dapat diproduksi dengan AMC adalah *connecting rod*. *Connecting rod* merupakan penghubung sekaligus menyalurkan gerakan bolak-balik piston menjadi gerak rotasi *crankshaft* sehingga gerakan *connecting rod* merupakan kombinasi gerak translasi dan rotasi. *Connecting rod* umumnya terbuat dari baja paduan. Bahan yang umum digunakan untuk *connecting rod* adalah AISI 4340 dan AISI 1045.

Tabel 3 Sifat-sifat mekanik AISI 4340 dan AISI 1045

Sifat	AISI 4340	AISI 1045
Modulus Young (GPa)	190	200
Rasio Poisson	0,27	0,29
Densitas (g/cm ³)	7,85	7,87
Kekuatan tarik (MPa)	745	565
Kekuatan luluh (MPa)	470	310

Sumber: Lubis & Andoko (2019)

2.3 Sintesis AMC dengan Metode Pengecoran

2.3.1 Metode *Stir Casting*

Stir casting merupakan salah satu metode sintesis AMC dengan proses cair (*liquid state process*) dengan cara mengaduk aluminium cair dengan partikel penguatnya dengan parameter yang telah ditentukan sebelumnya. Proses *Stir casting* adalah proses pengecoran dengan cara menambahkan suatu logam murni (biasanya aluminium) dengan sebuah komposit dengan cara melebur logam murni tersebut kemudian logam murni yang sudah mencair tersebut diaduk-aduk secara terus-menerus hingga terbentuk sebuah pusaran, kemudian komposit (berupa serbuk) tersebut dicampurkan sedikit demi sedikit melalui tepi dari pusaran yang telah terbentuk itu.

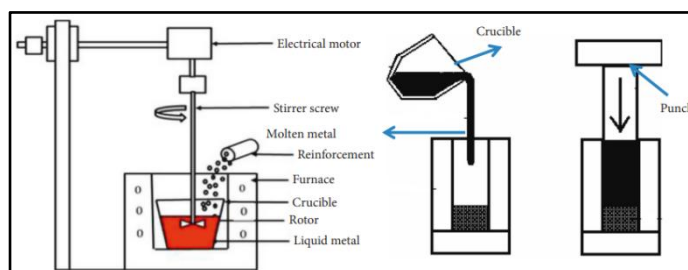
Metode ini sering dipilih untuk sintesis AMC dikarenakan fleksibilitasnya dan skalabilitasnya. Walaupun demikian, metode jenis ini membuka peluang untuk cacat pengecoran seperti penyusutan dan porositas dikarenakan masih mengandalkan gaya gravitasi untuk mengalirkan logam cair ke dalam cetakan (Vijayakumar, dkk., 2021).

2.3.2 Metode *Stir-Squeeze Casting*

Sintesis AMC dapat dilakukan dengan berbagai metode seperti yang telah disebutkan sebelumnya. Namun, metode yang dinilai paling tepat dan murah adalah *stir-squeeze casting* dikarenakan dengan adanya pengadukan, partikel penguat dapat terdispersi secara merata (Gugulothu, dkk., 2022).

Squeeze casting juga merupakan salah satu metode dalam sintesis AMC. Proses ini pada dasarnya menggabungkan keuntungan dari proses tempa dan pengecoran. Proses pemadatan dengan tekanan akan menghasilkan perpindahan panas yang cepat sehingga porositas akan menurun. *Stir-squeeze casting* merupakan metode gabungan yang terbilang saling melengkapi, dikarenakan kekurangan dari *stir casting* yakni kemungkinan terjadi porositas dan penyusutan akibat pengecoran, hal ini dapat diatasi dengan pemberian tekanan atau kompresi sehingga produk yang diperoleh menjadi lebih padat sehingga porositasnya berkurang serta kekuatan tarik dan luluh sebesar 29,81% dan 43,18% dibandingkan dengan material dasarnya (Zhu, dkk., 2020).

Arunachalam, dkk. (2019) meneliti parameter *stir-squeeze casting* Al-Si7Mg dengan penguat Al_2O_3 dengan metode Taguchi dan memperoleh parameter optimal, yaitu tekanan 100 MPa, suhu cetakan 250 °C, dan kecepatan *stir* 525 rpm yang terbukti meningkatkan kekuatan kompresi sebesar 18,5% dan menurunkan porositas sebesar 13,5%. Gugulothu, dkk. (2022) juga meneliti parameter *stir-squeeze casting* fabrikasi AMC hibrida dengan penguat $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiB}_2$ dengan metode Taguchi dan memperoleh parameter optimal untuk kekuatan tarik, yaitu tekanan 50MPa, kecepatan *stir* 300 rpm, temperatur leleh 750 °C, dan kandungan penguat 2 wt%. Pada penelitian ini parameter yang paling berpengaruh adalah (1) kandungan penguat (38,9%); (2) tekanan (28,4%); (3) kecepatan *stir* (13,6%); dan (4) temperatur leleh (12,16%). Studi lain oleh Vijayakumar, dkk. (2022) mencoba mencari parameter optimal untuk fabrikasi AMC hibrida berpenguat $\text{ZrSiO}_4/\text{TiC}$ dengan metode Taguchi dan memperoleh parameter optimal untuk kekuatan tarik, yaitu tekanan 80 MPa, durasi *stir* 10 menit, kecepatan *stir* 600 rpm, dan kandungan penguat 2,5 wt%. Pada penelitiannya, parameter yang paling berpengaruh adalah (1) kecepatan *stir* (41,8%); (2) tekanan (25,7%); (3) durasi *stir* (12,7%); dan (4) kandungan penguat (1,96%).



Gambar 10 Skema *stir-squeeze casting*. Sumber: Gugulothu, dkk. (2022)

2.3.3 Silikon Karbida

Silikon karbida (SiC) merupakan senyawa kimia yang mengandung silikon dan karbon. SiC dapat diproduksi dengan reaksi elektro-kimia bertemperatur tinggi partikel pasir dan karbon pada kondisi terkontrol. SiC memiliki ketahanan aus dan abrasi yang tinggi bahkan pada aplikasi temperatur tinggi. SiC juga digunakan untuk memperoleh konduktivitas listrik dan ketahanan panas. SiC terdiri dari ikatan tetrahedral atom karbon dan silikon dengan struktur kristal yang kuat yang menjadikan material ini keras dan kuat (Aswath & Xavier, 2016).

Sifat-sifat SiC antara lain massa jenis rendah, kekuatan tinggi, modulus elastis tinggi, konduktivitas termal tinggi, ekspansi termal rendah, kelembaman kimia baik, ketahanan *thermal shock* baik, dan sifat lainnya tertulis dalam tabel 4 sedangkan komposisi kimia dari SiC tertera dalam tabel 5

Tabel 4 Sifat-sifat fisik dan mekanik silikon karbida (SiC)

Warna	Hitam
Massa molar (g/mol)	40,1
Densitas (g/cm ³)	3,21
Kekerasan (HV)	2563
Rasio Poisson	0,14
Titik leleh (°C)	2730
Modulus Young (GPa)	410
Konduktivitas termal (W/m°K)	120
Panas spesifik (J/kg°K)	750

Sumber: Aswath & Xavier (2016)

Tabel 5 Komposisi kimia partikel SiC (dalam wt.%)

SiC	SiO ₂	C	Al ₂ O ₃	Si	Fe ₂ O ₃
98,08	0,71	0,89	0,18	0,59	0,05

Sumber: Purohit & Sagar (2001)

SiC merupakan salah satu penguat yang cocok untuk pembuatan AMC. SiC terbukti mampu meningkatkan nilai kekerasan dan kekuatan tarik secara linear dengan penambahan kandungan partikelnya. Akan tetapi, pada studi oleh Ajagol, P., dkk. (2018) diperoleh bahwa peningkatan nilai kekerasan dan kekuatan tarik

dari penambahan 10 wt% SiC ke penambahan 15 wt% SiC tidak begitu besar, yakni pada 6,8% (kekerasan) dan 4% (kekuatan tarik).

Dalam studi lain oleh Kalkanli & Yilmaz (2008), Al7075 dibuat dengan *stir-squeeze casting* dengan variasi SiC 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, dan 30% massa, kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada sampel dengan kandungan SiC 10 wt% dan terus menurun sampai dengan 30 wt% SiC, sedangkan kekerasan tertinggi diperoleh pada sampel dengan 30 wt% SiC.

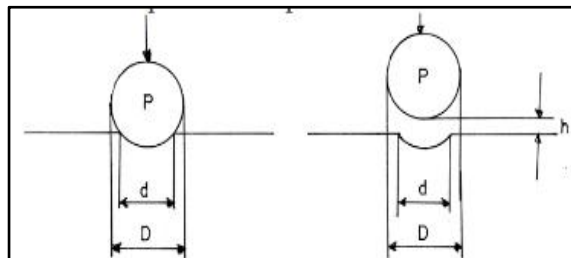
2.4 Pengujian Fisik dan Mekanik

2.4.1 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan adalah jenis pengujian mekanik yang penting untuk logam *ferrous* dan *non ferrous*. Tujuan pengujian kekerasan adalah untuk mengetahui ketahanan dari deformasi plastis, bila diberikan beban/gaya dari luar. Prinsip pengujian kekerasan terhadap spesimen uji yang permukaannya telah dipreparasi dilakukan penekanan dengan indenter. Beban yang digunakan untuk setiap jenis logam adalah berbeda, tergantung terhadap metode pengujian dan pengukuran yang digunakan. Ada tiga metode pengujian yang paling sering digunakan untuk logam yaitu, Metode *Brinell*, Metode *Vickers* dan Metode *Rockwell*.

a. Metode *Brinell*

Pengujian dengan metode ini dilakukan dengan indenter yang berbentuk bola dengan beban dan waktu tertentu, seperti terlihat pada **Gambar 11** harga kekerasan diperoleh dari persamaan berikut ini :



Gambar 11 Geometri Indentor Brinell

$$H = \frac{2P}{\pi D (\sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{P}{D \cdot h} \quad (1)$$

di mana:

- P = Beban bola penekanan yang diberikan (Kgf),
- D = Diameter bola penekanan (mm),
- d = Diameter jejak (mm).

Pemilihan diameter bola dan besar beban tergantung pada jenis logam serta ketebalannya. Perubahan indentor akan diikuti dengan perubahan beban akan didapatkan Hb yang sama.

$$\frac{P_1}{D_1^2} = \frac{P_2}{D_2^2} = \frac{P_3}{D_3^2} \quad (2)$$

Jika D terlalu besar dan P terlalu kecil, maka bekas lekukan akan terlalu kecil sehingga sukar diukur dan akan memberi informasi yang keliru. Jika D terlalu kecil dan P terlalu besar dapat berakibat amblesnya bola, sehingga memberikan harga kekerasan yang keliru.

Beberapa parameter penting yang mempengaruhi harga kekerasan *Brinell*:

- 1) Kekerasan permukaan.
- 2) Posisi spesimen saat pengujian.
- 3) Kebersihan permukaan spesimen.

b. Metode *Vickers*

Pengujian dengan metode ini prosesnya sama dengan metode *Brinell* yang berbeda hanya pada bentuk indenter yaitu berbentuk piramida bujur sangkar dengan sudut puncak 136° terbuat dari intan, seperti terlihat pada **Gambar 12**.

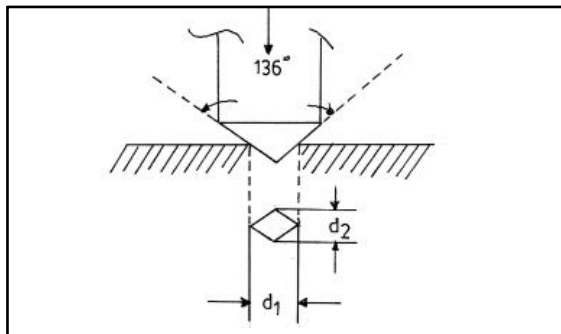
Harga kekerasan *Vickers* diperoleh dengan rumus:

$$H_v = \frac{2P \sin\left(\frac{O}{2}\right)}{L^2} = \frac{1,854 \cdot P}{L^2} \quad (3)$$

di mana:

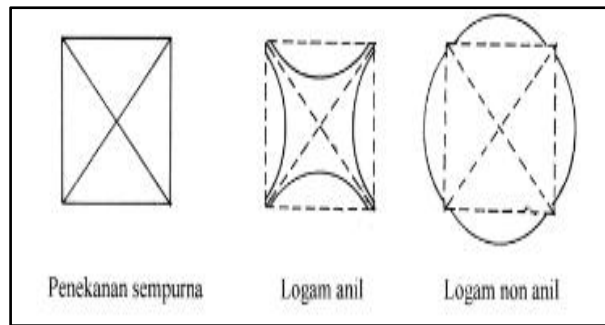
- P = Beban yang diberikan (kg),
 L = Diagonal rata-rata (mm) = $(d_1 + d_2)/2$,
 O = Sudut puncak 136° .

Uji kekerasan *Vickers* mempunyai kelebihan dalam jangkauan pemeriksaan yang luas dengan pemakaiannya beban tunggal (HV5–HV1500). Beban yang dipakai biasanya antara 1 (satu)–120 kg.



Gambar 12 Geometri indenter Vickers

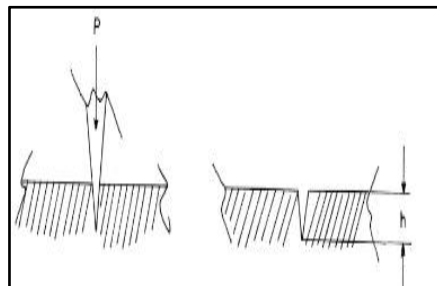
Hasil penekanan akan berbentuk bujur sangkar dengan diagonal yang akan diukur dengan mikroskop, seperti dalam **Gambar 13**.



Gambar 13 Jejak hasil penekanan indenter

c. Metode Rockwell

Pada metode ini digunakan indenter intan yang berbentuk kerucut, seperti terlihat pada **Gambar 14**. Kerucut akan menekan permukaan logam sedalam “h” dari permukaan. Jarak “h” menentukan kekerasan dari logam uji.



Gambar 14 Indentor rockwell

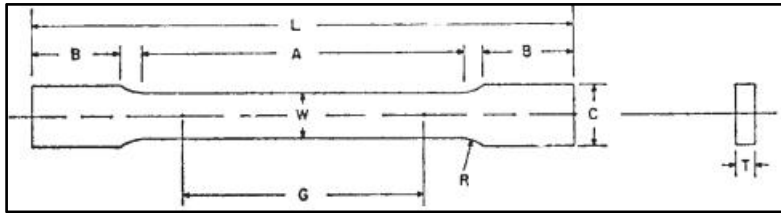
Harga kekerasan diperoleh dari pembacaan langsung pada skala alat pengujian *Rockwell* antara lain:

1. Metode *Rockwell C* (HRC), menggunakan indenter kerucut intan sudut 120° dengan diameter ujung 0,2 mm. Beban yang dipakai 150 kg dengan pre-load 10 kg. Pengujian untuk *steel* dan *hardened steel* dengan $h > (0,6-0,7)$ mm.
2. Metode *Rockwell A* (HRA), menggunakan indenter sama dengan *Rockwell C* dan beban yang sama pula 150 kg. pengujian untuk material $h < (0,4-0,6)$ mm.
3. Metode *Rockwell B* (HRB), menggunakan indenter baja bentuk bola dengan diameter $1/16''$ dan beban 100kg dipakai untuk material *unhardened steel* dan *non ferrous*.

2.4.2 Pengujian Kekuatan Tarik

Pengujian tarik merupakan salah satu pengujian material yang paling banyak dilakukan di dunia industri. Karena pengujian ini terbilang yang paling mudah dan banyak data yang bisa diambil dari pengujian ini. Diantaranya yang bisa didapat dari pengujian tarik ini adalah Kekuatan tarik (*Ultimate Tensile Strength*), Kekuatan

mulur (*Yield Strenght or Yield Point*), Elongasi (*Elongation*), Elastisitas (*Elasticity*) dan Pengurangan luas penampang (*Reduction of Area*). Seiring dengan berkembangnya teknologi, maka pada saat ini mesin uji tarik dilengkapi dengan perangkat-perangkat elektronik untuk memudahkan dalam menganalisis data yang diperoleh. *Load Cell* merupakan salah satu perangkat elektronik yang digunakan sebagai perangkat tambahan pada mesin uji tarik. *Load Cell* menggunakan system perangkat pengolahan data. Karena bagaimanapun juga faktor manusia sangat dominan untuk memperoleh hasil dari pengujian ini.

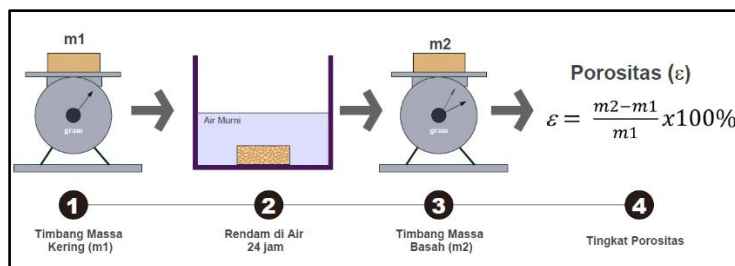


Gambar 15 Spesimen uji tarik ASTM E8. Sumber: ASTM

2.4.3 Pengujian Porositas

Porositas adalah suatu cacat atau *void* pada produk cor yang dapat menurunkan kualitas benda tuang. Salah satu penyebab terjadinya porositas ada penuangan paduan aluminium adalah gas hidrogen. Gas hidrogen ini dapat terbentuk karena logam cair saat proses pengecoran dimulai, dapat beroksidasi dengan gas karbon monoksida dan karbon dioksida. Porositas oleh gas hidrogen dalam benda cetak paduan aluminium silikon akan memberikan pengaruh yang buruk pada kekuatan serta kesempurnaan dari benda tuang tersebut. Cacat produk cor dapat dikategorikan atas: *major difect* dan *minor difect*. *Major difect* yaitu cacat produk cor yang tidak dapat diperbaiki, sedangkan *minor defect* adalah cacat yang masih dapat diperbaiki dengan perbaikan ekonomis.

Porositas berhubungan dengan massa jenis (densitas) material. Densitas adalah perbandingan massa terhadap volume. Sebelum dapat menentukan persentase porositas, terlebih dahulu menentukan densitas teoritis dan densitas aktual. Porositas dihitung melalui pengukuran massa jenis, melalui pengukuran berat spesimen di udara dan di dalam air murni. Massa jenis aktual spesimen ditentukan dengan menggunakan rumus Archimedes berdasarkan standar ASTM D3800 :



Gambar 16 Skema pengujian porositas

Untuk menentukan porositas spesimen dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

Komposit dibersihkan dan dikeringkan, selanjutnya ditimbang untuk mendapatkan massa kering (m_1).

Sampel direndam didalam gelas beaker berisi air (aquades) selama 24 jam pada suhu ruang agar air dapat mengisi pori-pori spesimen.

Setelah proses perendaman selesai, selanjutnya spesimen ditimbang untuk mengetahui massa basah (m_2)

Tingkat porositas komposit ditentukan dengan persamaan (4)

$$\varepsilon = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (4)$$

di mana:

- ε = porositas (%)
- m_1 = massa kering (gram)
- m_2 = massa basah (gram)

2.4.4 Pengujian Metalografi

Metalografi adalah suatu cabang ilmu pengetahuan yang berhubungan dengan struktur dan keadaan, serta hubungannya dengan sifat-sifat logam dan paduannya. Tujuan utama pengujian metalografi adalah untuk mengetahui keadaan/kondisi suatu logam dan paduannya ditinjau dari strukturnya dengan menggunakan mikroskop. Dengan pengujian metalografi, dapat diketahui kondisi suatu logam/paduannya (ulet/rapuh), geometri kristal, susunan atom dan lain-lain. Serta dapat digunakan sebagai salah satu sarana untuk mengetahui kerusakan kegagalan suatu komponen. Ruang lingkup yang dibahas hanya mencakup dasar-dasar metalografi yang menggunakan berkas kasat mata (terlihat mata). oleh karena itu disebut juga metalografi cahaya kasat mata atau metalografi optik.

Peralatan yang umum digunakan untuk kegiatan metalografi sebagai berikut:

1. Mesin amplas ukuran 100 - 1200 grid untuk meratakan dan menghaluskan.
2. Mesin poles ukuran 1500 - 5000 grid untuk menghaluskan
3. Mikroskop optik ukuran 1000X untuk mengetahui struktur mikro dan makro.

2.5 Metode Taguchi

Metode taguchi dikembangkan oleh Genichi Taguchi. Metode ini menggunakan desain susunan orthogonal untuk mengorganisir faktor-faktor yang ada dan mengurangi jumlah sampel yang diperlukan. Untuk menimbang parameter proses, metode taguchi menggunakan rasio *signal-to-noise*, yang mana merupakan rasio rata-rata sinyal (*signal*) dengan standar deviasi (*noise*).

Signal-to-noise ratio merupakan metode pengukuran kualitas sebuah instrumen dalam bidang rekayasa suara (*sound engineering*) di mana untuk mendapatkan hasil instrumen yang baik, maka *noise* haruslah seminimal mungkin.

Terdapat tiga karakteristik kualitas dalam optimasi dengan metode Taguchi, yakni (1) *nominal-the-best*, (2) *smaller-the-better*, (3) *larger-the-better*. Formula untuk menghitung S/N dengan karakteristik *larger-the-better* dapat dilihat pada persamaan (5) di bawah.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5)$$

Metode Taguchi umumnya digunakan untuk menghemat waktu dan biaya dengan hasil yang cukup akurat dengan cara mengurangi jumlah sampel yang diperlukan untuk suatu penelitian. Dalam metode Taguchi terdapat faktor yang dapat dikontrol (*control factor*) dan faktor yang tak dapat dikontrol (*noise factor*). *Control factor* merupakan parameter yang dapat diubah sesuai dengan kebutuhan peneliti sedangkan *noise factor* merupakan faktor yang muncul akibat eksternal yang berada di luar kendali peneliti. Untuk memproses data kemudian digunakanlah *signal-to-noise ratio* atau rasio S/N (Martijanti, dkk., 2020).

Dalam pengecoran, khususnya *stir-squeeze casting*, terdapat beberapa parameter yang sangat berperan dalam menentukan hasil coran yang akan diperoleh, seperti beban tekan, durasi pengadukan, kecepatan pengadukan, temperatur peleburan, temperatur cetakan, dan *pre-heating* partikel penguat. Di antara parameter ini, yang paling berpengaruh adalah beban tekan, durasi pengadukan, kecepatan pengadukan, dan temperatur cetakan. Dengan banyaknya variabel yang perlu dioptimalkan, diperlukan waktu dan biaya yang relatif banyak. Untuk tujuan mengurangi jumlah percobaan yang diperlukan, maka digunakan metode Taguchi (Arunachalam, dkk., 2019).