

**STUDI KOMPOSIT MATRIK ALUMINIUM
BERPENGUAT CNT UNTUK APLIKASI *BUSHING*
DENGAN METODE *STIR-SQUEEZE CASTING***

*Study Of Cnt-Reinforced Aluminum Matrix Composites For
Bushing Applications By Stir-Squeeze Casting Method*

**SUHARDI
D022211008**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PEMGAJUAN TESIS

**STUDI KOMPOSIT MATRIK ALUMINIUM
BERPENGUAT CNT UNTUK APLIKASI *BUSHING*
DENGAN METODE *STIR-SQUEEZE CASTING***

Tesis

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar megister
Program studi ilmu teknik mesin

Disusun dan diajukan oleh

**SUHARDI
D022211008**

Kepada

**FAKULTAS TENIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI KOMPOSIT Matrik ALUMINIUM BERPENGUAT CNT UNTUK APLIKASI *BUSHING* DENGAN METODE *STIR-SQUEEZE CASTING*

Disusun dan diajukan oleh

SUHARDI
D022211008

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

pada tanggal 19 Desember 2023

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr. Muhammad Syarif, S.T., M.T
NIP. 197707072005011001

Pembimbing Pendamping



Dr. Hairul Arsyad, S.T., M.T
NIP. 197503222002121001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli,
S.T., M.T., IPM., ASEAN. Eng
NIP. 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin



Dr. Eng. Novriany Amaliyah, S.T., M.T
NIP. 197911122008122002

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Suhardi
Nomor mahasiswa : D022211008
Program studi : Teknik Mesin

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “STUDI KOMPOSIT Matrik ALUMINIUM BERPENGUAT CNT UNTUK APLIKASI BUSHING DENGAN METODE STIR-SQUEEZE CASTING” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Muhammad Syahid, ST., MT dan Dr. Hairul Arsyad, ST., MT). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah diseminarkan pada konferensi internasional “The 1st International Conference on Research in Engineering and Science Technology (IC-REST) 2023”, dan akan dipublikasikan oleh Scientific.net (terindeks Scopus) sebagai artikel dengan judul “Effect Of Magnesium Addition Of Aluminum Matrix Composites CNT reinforced using Stir-Squeeze Casting Method”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 19 Desember 2023

Yang menyatakan



Suhardi

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan hikmatnya sehingga tesis ini dapat diselesaikan.

Ide utama dari tesis ini yaitu pembuatan Komposit Matrik Aluminium dengan penguat Carbon Nanotube (CNT) yang disintesis dengan metode Stir-Squeeze Casting dalam rangka pengembangan material ringan khususnya pada aplikasi bushing aluminium komposit.

Gagasan-gagasan tersebut bukan hal yang mudah untuk diwujudkan dalam sebuah susunan tesis, namun berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka tesis ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir Jamaluddin Jompa, M.Sc. selaku rektor universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program Magister. serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.
2. Prof. Dr. Eng. Jalaluddin, S.T., M.T selaku ketua Departemen Teknik Mesin
3. Dr. Eng. Novriany Amaliyah, S.T., M.T selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin
4. Dr. Muhammad Syahid, S.T., M.T selaku pembimbing I yang telah memberikan arahan dan bimbingan selama proses pengambilan data dan penyelesaian tesis ini
5. Dr. Hairul Arsyad, S.T., M.T selaku pembimbing II yang memberikan arahan dan bimbingan dalam penyelesaian tesis ini
6. Para Dosen, Tenaga Pendidik, laboran dan rekan-rekan dalam penelitian baik Mahasiswa S1, S2 maupun S3 Teknik Mesin Universitas Hasanuddin
7. Harjuma, S. S.T., M.T selaku Direktur Akademi Teknik Sorowako yang telah memberikan kesempatan untuk studi lanjut S2 di Universitas Hasanuddin. Serta memberikan pasilitas dalam pembuatan alat uji dan pembentukan bahan uji di Lab ATS.

8. Ketua VSDM bersama Tim, Dosen, Instruktur, Tim Permesinan dan Pabrikasi Produksi, Akademi Teknik Sorowako yang telah banyak membantu dalam pembuatan Alat dan bahan Uji.

Akhirnya kepada orang tua saya terkasih, istri tercinta Delvianti, anak tersayang Didier Giovanni Suhardi, seluruh saudara-saudara saya yang luar biasa serta semua keluarga yang telah mendukung dan memberikan dorongan moral, materi, Doa, motivasi dan dukungan yang tak ternilai selama saya menempuh pendidikan Magister di Universitas Hasanuddin. saya ucapkan terimakasih yang tak terhingga.

Gowa, 19 Desember 2023

Penulis

Suardi

ABSTRAK

SUHARDI. *Studi Komposit Matrik Aluminium Berpenguat CNT Untuk Aplikasi Bushing Dengan Metode Stir-Squeeze Casting* (dibimbing oleh **Muhammad Syahid** dan **Hairul Arsyad**)

Dalam dunia Industri khususnya bidang otomotif, banyak yang membutuhkan berbagai komponen dengan kekuatan yang tinggi namun berbahan ringan. Aluminium matrik komposit yang di perkuat partikulat dapat menjadi pilihan material pada komponen tersebut karena memiliki sifat-sifat yang ringan, oleh sebab itu perlu dilakukan studi pengembangan material komposit aluminium. Pada penelitian ini, matrik aluminium 6063 berpenguat dengan fraksi berat *CNT* 1%, dengan variasi penambahan fraksi berat magnesium (0, 2, 4, dan 6%), dibentuk menggunakan metode stir casting putaran 350 Rpm selama 2 menit dengan *squeeze casting* variasi tekanan (10, 20, dan 30 *MPa*) selama 75 menit. pada cetakan logam dengan suhu 450° C dah suhu tuang 750°C. dalam menganalisa sifat fisik dilakukan uji porositas dan densitas, uji kekerasan dan kekuatan tarik dilakukan untuk menganalisa sifat mekanik, serta pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan *SEM-EDS* untuk mengetahui distribusi unsur penyusun. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan fraksi magnesium dan tekanan pada proses pemadatan mempengaruhi sifat komposit matrik aluminium. Proses penekanan dan penambahan magnesium menurunkan porositas dan meningkatkan densitas. nilai kekerasan tertinggi yaitu 48,8 *HV* meningkat 74% dari raw material, dan nilai uji tarik tertinggi sebesar 241,04 *MPa* meningkat 129% dari raw material masing-masing pada penambahan 6% Mg. Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan penambahan Mg 6% yang berfungsi sebagai wetting agent dapat mendistribusikan *CNT* lebih baik bersama unsur penyusun lainnya dengan butir yang lebih rapat dan lebih halus, yang menjadikan sifat komposit matrik aluminium yang ringan dan specific strength yang baik sehingga dapat jadikan sebagai salah satu pilihan bahan untuk komponen otomotif.

Kata Kunci: *Aluminium matrik komposit, carbon nanotube (CNT), Magnesium, Stir-squeeze casting*

ABSTRACT

SUHARDI. *Study Of Cnt-Reinforced Aluminum Matrix Composites For Bushing Applications By Stir-Squeeze Casting Method* (supervised by **Muhammad Syahid, Hairul Arsyad**)

In the Industrial world, especially the automotive field, many require various components with high strength but lightweight materials. Aluminum matrix composites reinforced with particulates can be a material choice for these components because it has lightweight properties, Therefore, it is necessary to study the development of aluminum composite materials. In this study, the 6063 aluminum matrix is reinforced with 1% CNT weight fraction, with variations in the addition of magnesium weight fraction (0, 2, 4, and 6%), was formed using the stir casting method at 350 Rpm for 2 minutes with squeeze casting pressure variations (10, 20, and 30 MPa) for 75 minutes in a metal mold with a temperature of 450° C and a casting temperature of 750°C. In analyzing the physical properties, porosity and density tests were carried out, and hardness and tensile strength tests were carried out to analyze the mechanical properties of microstructure observation using optical microscopy and SEM-EDS to determine the distribution of constituent elements. The highest hardness value of 48.8 HV increased by 74% from the raw material, and the highest tensile test value of 241.04 MPa increased by 129% from the raw material, respectively at the addition of 6% Magnesium. The microstructure observation results show that the addition of 6% Magnesium, which functions as a wetting agent, can distribute CNTs better with other constituents with denser and finer grains, which makes the aluminum matrix composite properties lightweight and good specific strength so that it can be used as one of the material choices for automotive component.

Keywords: Aluminum matrix composite, carbon nanotube (CNT), Magnesium, Stir-squeeze casting

DAFTAR ISI

HALAMANA JUDUL	i
PEMGAJUAN TESIS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Aluminium Matrik Komposit (AMC)	5
2.2 Fabrikasi Aluminium Matrik Komposit	15
2.3 Karakterisasi Komposit Metalurgi Pengecoran	23
BAB III METODE PENELITIAN	30

3.1	Tempat dan waktu Penelitian.....	30
3.2	Persiapan Peralatan dan Bahan	30
3.3	Diagram Alir Penelitian	37
3.4	Prosedur Penelitian.....	39
BAB IV_HASIL DAN PEMBAHASAN		47
4.1	Pengamatan Visual Sampel omposit.....	47
4.2	Pengamatan Komposisi Komposit.....	48
4.3	Pengamatan Sifat Fisis Komposit	48
4.4	Pengamatan Sifat Mekanik	51
4.5	Pengamatan Struktur Mikro Komposit	55
BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN		62
5.1	Kesimpulan	62
5.2	Saran	62
DAFTAR PUSTAKA		63
LAMPIRAN		68

DAFTAR TABEL

Table 1 Sifat-sifat fisik aluminium	7
Table 2 Sifat-sifat mekanik Aluminium.....	8
Table 3 Karakteristik magnesium	9
Table 4 Propertis <i>Carbon Nanotube</i>	11
Table 5 Komposisi <i>Round Bar</i> aluminium.....	35
Table 6 Komposisi magnesium.....	36
Table 7 Komposisi <i>AMC</i> Penambahan Magnesium hasil uji <i>XRF</i>	48

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 <i>Single Walled Nanotubes (SWNT)</i>	12
Gambar 2 <i>Multi Walled Nanotubes (MWNT)</i>	13
Gambar 3 <i>Stir Casting</i>	18
Gambar 4 proses <i>ctir casting</i> dan <i>Squeeze casting</i>	23
Gambar 5 Skema Pengujian Kekerasan Vickers (ASTM E 92-82,1997).....	25
Gambar 6 Contoh kurva uji tarik	26
Gambar 7 Skema Interaksi antara Elektron	28
Gambar 8 Tungku <i>Krusibel</i>	31
Gambar 9 Burner	31
Gambar 10 Kowi (<i>Krusibel</i>)	31
Gambar 11 Pengaduk (<i>stir cast</i>)	32
Gambar 12 Cetakan sampel uji Tarik	32
Gambar 13 Dimensi Punch	32
Gambar 14 Dimensi Cetakan	32
Gambar 15 Cetakan <i>Bushing</i>	33
Gambar 16 Dimensi Cetakan <i>Bushing</i>	33
Gambar 17 <i>Base Pin</i>	33
Gambar 18 <i>Upper Punch</i>	33
Gambar 19 Timbangan digital	33
Gambar 20 Gergaji Tangan	34
Gambar 21 <i>Round Bar</i> Aluminium	35
Gambar 22 magnesium batang	35
Gambar 23 Serbuk <i>Nanotube</i>	36
Gambar 24 Proses <i>Stir Casting</i> untuk pencampuran Al,CNT dan Mg	40
Gambar 25 Dimensi <i>bushing</i>	41
Gambar 26 Skema pengujian porositas	42
Gambar 27 Dimensi <i>spesimen uji Tarik</i>	44
Gambar 28 <i>Microscope type Olympus Type OLS4100</i>	45
Gambar 29 <i>Microscope Optik type Raxvision MM10A</i>	45

Gambar 30 Bentuk visual spesimen hasil pengecoran	47
Gambar 31 Pengaruh penambahan Mg terhadap densitas <i>AMC</i>	49
Gambar 32 Pengaruh penambahan Mg terhadap porositas <i>AMC</i>	50
Gambar 33 Pengaruh penambahan Mg terhadap tingkat kekerasan <i>AMC</i>	51
Gambar 34 Pengaruh penambahan Mg terhadap kekuatan tarik <i>AMC</i>	53
Gambar 35 Bentuk visual bushing hasil pengecoran.....	54
Gambar 36 Pengaruh tekanan terhadap tingkat kekerasan <i>bushing AMC</i>	55
Gambar 37 fotografi OM hasil stir-squeeze casting pembesaran 200X.....	56
Gambar 39 Mapping unsur penyusun komposit S2(0% Mg, 1% <i>CNT</i>).....	60
Gambar 40 Mapping unsur penyusun S5 (6% Mg, 1% <i>CNT</i>).....	61

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan Beban Kompaksi	68
Lampiran 2 Perhitungan Komposisi Campuran	70
Lampiran 3 Resume Tabulasi Data Densitas	71
Lampiran 4 Resume Tabulasi Data Porositas	71
Lampiran 5 Resume Tabulasi Data Kekerasan Sampel	72
Lampiran 6 Resume Data Kekerasan Bushing.....	72
Lampiran 7 Resume Data Pengujian Tarik Sampel	73
Lampiran 8 Pengamatan Mikroskop Optik Sampel	88
Lampiran 9 pengamatan SEM-EDS untuk sampel S2 dan S5	90
Lampiran 10 Hasil pengamatan SEM Mapping untuk sampel S2, S5.....	91
Lampiran 11 Daftar mesin dan perlengkapan penelitian.....	92

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Paduan aluminium yang diperkuat dengan berbagai partikulat, yang secara umum disebut sebagai komposit matriks aluminium (*AMC*) telah menjadi subjek yang banyak diteliti dalam dua dekade terakhir karena sifat-sifatnya yang unggul. Paduan aluminium monolitik konvensional gagal memenuhi permintaan yang meningkat untuk kinerja tinggi di banyak aplikasi. *AMC* memiliki kombinasi yang tepat dari sifat-sifat seperti kekakuan yang lebih tinggi, kekuatan yang unggul, ketahanan yang lebih baik terhadap keausan dan koefisien ekspansi termal yang rendah, yang dijadikan sebagai bahan alternatif yang potensial untuk menggantikan paduan aluminium. (Moses, dkk 2016).

Komposit matrik aluminium (*AMC*) telah banyak digunakan di bidang otomotif, pertambangan, penerbangan, pertahanan dan lain sebagainya. material *AMC* pada beberapa komponen dituntut untuk mampu diaplikasikan pada tegangan tinggi, contohnya seperti di bidang otomotif yaitu sebagai komponen *drive shaft* dan piston, (Triyono, dkk 2020).

Beberapa komponen otomotif menggunakan material *AMC* yang memiliki *specific strength* baik; yaitu ringan tetapi memiliki kekuatan yang tinggi, sehingga konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan pada kendaraan juga semakin kecil, dan dapat bekerja dalam kondisi bergesekan, sehingga harus memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang tinggi yaitu komponen *bushing*.(Wardhana 2014) Komposit matrik aluminium (*AMC*) dikembangkan agar dapat memiliki masa pakai yang tinggi, keandalan pengoperasian, gesekan rendah pada komponen mesin seperti *bushing*(Rajesh, dkk. 2020)

AMC dapat dibuat dengan beberapa metode seperti metalurgi serbuk, metode logam cair, metode pencampuran (*Stirring Casting*), pengecoran semisolid, infiltrasi tekanan, infiltrasi tanpa tekanan, dan deposisi semprot. Dalam hal produksi massal dan hemat biaya, metode yang paling cocok untuk pengembangan *AMC* adalah *stir casting*.(Upadhyay and Saxena 2021) Proses *stir casting* merupakan salah satu proses pembuatan komposit dalam kondisi cair yang paling sederhana. 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 (Shubham Mathur1 2012). Untuk menghindari masalah dalam memperoleh distribusi homogen senyawa intermetalik dalam matrik dan fabrikasi komposit berbentuk kompleks, partikel Al_3Ni dibentuk dan terdispersi secara homogen dalam matrik aluminium dengan cara di aduk dan ditekan (*stir dan squeeze*). (Ramesh, dkk 2015)

Carbon Nanotubes (CNT) adalah salah satu bentuk karbon alotropik, yang memiliki beberapa karakteristik unik yang menjadikannya sebagai bahan penguat yang cocok untuk berbagai jenis komposit, diantaranya komposit matriks logam (*MMCs*) dengan logam dasar seperti aluminium. (Ramnath, dkk 2014)

Dari beberapa studi penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan kekuatan mekanik Aluminium dengan menggabungkan *CNT*, hambatan yang terjadi *CNT* tidak mudah tercampur dengan aluminium. (So, dkk 2011) Dalam aspek rasio, penggunaan *CNT* yang besar pada Aluminium Komposit, ditemukan *CNT* memiliki kecenderungan menggumpal dan dengan demikian sulit untuk menyebar. (Esawi, dkk 2010)

Untuk mendapatkan *wettability* yang baik pada komposit matrik aluminium dilakukan dengan cara penambahan unsur magnesium (*Mg*). Penambahan *Mg* pada *AMC* berpenguat SiO_2 mampu meningkatkan *wettability* matriks aluminium sehingga membuat densitas meningkat, dan porositas menjadi kecil. (Prabowo, dkk 2016) Penambahan partikel *Mg* sebagai *wetting agent* agar dapat meningkatkan keterbasahan antara matriks logam dan penguat dapat saling berikatan dengan baik. (Widodo and Sasmito 2021)

Salah satu aplikasi yang membutuhkan kekuatan seperti yang dipaparkan pada latar belakang diatas adalah *bushing* komposit matrik aluminium (*AMC*) dan berdasarkan latar belakang tersebut, saya tertarik melakukan penelitian penambahan magnesium (*Mg*) untuk aplikasi *bushing* komposit maktrik aluminium (*AMC*) berpenguat *carbon nanotube (CNT)* dengan metode *stir-squeeze casting*.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh variasi penambahan magnesium dan tekanan pada proses *stir-squeeze casting* terhadap sifat fisis (densitas dan porositas), pada *bushing* aluminium matrik komposit berpenguat *CNT*.
2. Bagaimana pengaruh penambahan magnesium dan tekanan pada proses *stir-squeeze casting* terhadap sifat mekanik (kekuatan Tarik kekerasan dan keausan), pada *bushing* aluminium matrik komposit berpenguat *CNT*.
3. Bagaimana pengaruh penambahan magnesium dan tekanan pada proses *stir-squeeze casting* terhadap struktur mikro (*OM, SEM-EDS*) *bushing* aluminium matrik komposit berpenguat *CNT*.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Menganalisa pengaruh variasi penambahan magnesium dan tekanan pada proses *stir-squeeze casting* terhadap sifat fisis *bushing* komposit matrik aluminium berpenguat *CNT*
2. Menganalisa pengaruh variasi penambahan magnesium dan variasi tekanan pada proses *stir-squeeze casting* terhadap sifat mekanik dari *bushing* komposit matrik aluminium berpenguat *CNT*
3. Menganalisa pengaruh variasi penambahan magnesium dan variasi tekanan pada proses *stir-squeeze casting* terhadap struktur mikro dari *bushing* komposit matrik aluminium berpenguat *CNT*

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Rute proses dilakukan dengan teknik *stir-squeeze casting* dengan kecepatan putaran 350 rpm selama 2 menit
2. Bahan yang dipakai dalam penelitian ini adalah aluminium 6063
3. Unsur yang ditambahkan sebagai bahan penguat, yaitu *carbon nanotube (CNT)* dengan komposisi 1%
4. Penambahan Magnesium dengan komposisi 0%, 2%, 4% dan 6%.

5. Variasi tekanan 10 *MPa*, 20 *MPa* dan 30 *MPa*.
6. Temperatur tuang aluminium, yaitu 750° C
7. Temperatur cetakan, yaitu 450° C
8. Karakterisasi sifat komposit meliputi pengujian sifat fisik, sifat mekanik, dan struktur mikro.

1.5 Manfaat Penelitian

Dari hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Manfaat untuk penelitian dapat menjadi sumber literasi yang relevan dalam memahami perilaku komposit matrik aluminium berpenguat *CNT* yang disintesis melalui teknik *stir-squeeze casting*
2. Dapat memberikan kontribusi dalam mengembangkan material produk yang ringan, aman dengan sifat yang optimal khususnya pada aplikasi *bushing*
3. Diharapkan dari penelitian ini dapat menjadi referensi lebih lanjut berkaitan dengan komposit matriks aluminium berpenguat *CNT*

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan laporan penelitian ini dibagi dalam beberapa bab yang saling berhubungan. BAB I pendahuluan berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat penelitian. BAB II tinjauan pustaka berisi studi literasi yang mendukung penelitian. BAB III metodologi penelitian, berisi prosedur pelaksanaan penelitian. BAB IV hasil dan pembahasan, berisi data, analisa pembahasannya. BAB V kesimpulan berisi kesimpulan akhir berdasarkan hasil yang dicapai dalam penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium Matrik Komposit (AMC)

Material komposit merupakan material yang terbentuk dari kombinasi antara dua atau lebih material pembentuknya melalui pencampuran yang tidak homogen, dimana sifat mekanik dari masing- masing material pembentuknya berbeda. Material komposit memiliki sifat mekanik yang lebih bagus dari pada logam, memiliki kekuatan bisa diatur yang tinggi (*tailorability*), memiliki kekuatan lelah (*fatigue*) yang baik, memiliki kekuatan jenis (*strength/weight*) dan kekakuan jenis (*modulus Young/density*) yang lebih tinggi dari pada logam, tahan korosi, memiliki sifat isolator panas dan suara, serta dapat dijadikan sebagai penghambat listrik yang baik, dan dapat juga digunakan untuk menambal kerusakan akibat pembebanan dan korosi.(Prabowo, dkk 2016)

Komposit matrik aluminium (*AMC*) 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. Terdapat 3 elemen penting dalam fabrikasi komposit matrik aluminium yaitu logam aluminium sebagai matriks, partikel carbon nonotube (CNT) sebagai penguat dan penambahan Mg untuk meningkatkan sifat mekanis dan wettability.

Keuntungan utama dari aluminium matrik composit dibandingkan dengan logam-logam lain yang tanpa penguat yaitu (Surappa 2003) :

1. Memiliki kekuatan yang lebih besar.
2. Meningkatkan kekakuan.
3. Mengurangi densitas (berat)
4. Sifatnya meningkat pada temperatur yang tinggi
5. Mengontrol koefisien perpindahan panas
6. Meningkatkan dan menyesuaikan performansi listrik.
7. Meningkatkan resistensi keausan dan goresan/abrasi.
8. Sangat banyak mengontrol.
9. Meningkatkan kemampuan peredaman

Klasifikasi komposit berdasarkan penguatnya antara lain komposit berpenguat serat, struktural dan partikulat. Komposit yang akan dibahas dalam penelitian ini merupakan komposit berpenguat partikel (*particulate composite*) atau berdasarkan matriksnya dikelompokkan dalam komposit matrik aluminium (*aluminum matrix composite*). Bahan penyusun komposit ini terdiri dari aluminium, magnesium, dan *carbon nanotube*.

2.1.1 Aluminium

Aluminium merupakan salah satu jenis unsur kimia. Yang mana memiliki sebuah lambang Al dan bernomor atom 13. Material bahan ini merupakan jenis unsur yang jumlah sangat banyak ditemukan di kerak bumi, umumnya dalam bentuk senyawa berupa aluminium oksida.

Aluminium adalah jenis logam yang mempunyai ketahanan korosi yang baik dan hantaran listrik yang baik serta sifat yang baik lainnya sebagai sifat logam. Aluminium mempunyai manfaat dan kelebihan yaitu ringan, tahan terhadap korosi, kuat, tahan terhadap suhu rendah, mudah diolah, penghantar panas yang baik, non-magnetik, konduktor panas yang baik, mudah di daur ulang, perawatan yang mudah, non-sparking (tidak menimbulkan percikan api ketika material saling digosokkan (Surdia T., dkk. 1999).

Aluminium merupakan unsur non ferro yang paling banyak terdapat di bumi yang merupakan logam ringan yang mempunyai sifat yang ringan, ketahanan korosi yang baik serta hantaran listrik dan panas yang baik, mudah dibentuk baik melalui proses pembentukan maupun permesinan, dan sifatsifat yang baik lainnya sebagai sifat logam. Di alam, aluminium berupa oksida yang stabil sehingga tidak dapat direduksi dengan cara seperti mereduksi logam lainnya. Pereduksian aluminium hanya dapat dilakukan dengan cara elektrolisis. Sebagai tambahan terhadap kekuatan mekaniknya yang sangat meningkat dengan penambahan Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni, dan sebagainya, secara satu persatu atau bersama-sama, memberikan juga sifat-sifat baik lainnya seperti ketahanan korosi, ketahanan aus, koefisien pemuaian rendah dan sebagainya.

Logam aluminium tergolong logam yang ringan dan memiliki massa jenis 2,77 gr/cm³. Struktur kristal aluminium murni adalah *FCC (Face Centered Cubic)*, dengan jejari atom 0,134 nm dan mempunyai *yield strength* sebesar 60 x 10³ psi.

Di udara terbuka, aluminium bereaksi dengan oksigen membentuk lapisan tipis Al_2O_3 yang melindungi dari korosi. Sifat fisis yang dimiliki aluminium antara lain (Mufidah 2015):

- Ringan dan Elastis, material ini memiliki berat yang jauh lebih ringan dibandingkan dengan baja yaitu sekitar $1/3$ dari berat jenis baja, sifatnya mudah untuk dibentuk, tahan korosi maka banyak digunakan untuk komponen otomotif.
- Reflektif dan tidak berbau, mampu melepas sebuah racun atau rasa, dalam bentuk aluminium foil digunakan sebagai pembungkus makanan, obat atau rokok.
- Konduktif, unsur didalamnya mampu menjadikan sebagai penghantar listrik yang baik, Daya hantar listrik dua kali lebih besar dari Cu, maka Al cocok digunakan sebagai saluran transmisi listrik.
- Kekuatan Aluminium, Ketika berada pada suhu rendah aluminium cenderung menjadi lebih kuat, Paduan Al dengan logam lainnya menghasilkan logam yang kuat seperti duralium (campuran Al, Cu, Mg) untuk pembuatan badan pesawat.
- Sebagai zat reduktor untuk oksida MnO_2 dan Cr_2O_3 .

Tabel 1 Sifat-sifat fisik aluminium

Sifat-Sifat	Kemurnian Aluminium (%)	
	99,996	>99,0
Massa jenis 20° C (g/cm^3)	2,7	2,71
Titik cair	660,2	653-657
Panas jenis ($cal/g \cdot ^\circ C$) (100° C)	0,2226	0,229
Tahanan listrik (%)	64,94	59
Hantaran listrik koefisien temperature ($1^\circ C$)	0,00429	0,0115
Koefisien pemuaian (20 – 100° C)	$23,86 \times 10^{-6}$	$23,5 \times 10^{-6}$
Jenis Kristal, konstanta kisi	fcc, a=4,013 kX	fcc, a=4,04 Kx

Tabel 2 Sifat-sifat mekanik Aluminium

Sifat-Sifat	Kemurnian Aluminium (%)			
	99,996		>99,0	
	Dianil 75%	dirol dingin	Dianil	H18
Kekuatan Tarik (kg/mm ²)	4,9	11,6	9,3	16,9
Kekutan mulur (0,2%) (kg/mm ²)	1,3	11,0	3,5	14,8
Perpanjangan (%)	48,8	5,5	35	5
Kekerasan Brinell	17	27	23	44

2.1.2 Magnesium

Magnesium adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang *Mg* dan nomor atom 12. Ia berupa padatan abu-abu mengkilap yang memiliki kemiripan fisik dengan lima unsur lainnya pada kolom kedua (golongan 2, atau logam alkali tanah) tabel periodik: semua unsur golongan 2 memiliki konfigurasi elektron yang sama pada kelopak elektron terluar dan struktur kristal yang serupa.

Magnesium adalah unsur yang dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada kondisi perlakuan panas. Pembuatan komposit, Magnesium berfungsi sebagai *wetting agent* untuk meningkatkan pembasahan antara matrik dan penguat dengan cara menurunkan tegangan permukaan antara keduanya dan menghaluskan butiran kristal secara efektif pada aluminium. Selain itu *Mg* juga meningkatkan ketahanan terhadap korosi paduannya namun menurunkan sifat mampu cor. Penambahan *Mg* digunakan untuk meningkatkan daya lekat dan mampu basah antar material komposit dan menghaluskan butir, *Mg* yang digunakan jenis *Mg* dengan kadar kemurnian sebesar 98,5%, supaya paduan cepat tercampur *Mg* yang digunakan berupa serbuk. (Prabowo, 2016)

Kemampuan basah (*wettability*) atau keterbasahan diartikan sebagai kemampuan cairan (*liquid*) untuk melekat pada permukaan suatu padatan. Pembasahan hanya akan terjadi jika viskositas matrik tidak terlalu tinggi. Pembasahan mengakibatkan penurunan energi bebas sistem dan dipengaruhi oleh

temperatur, waktu kontak dan tekanan atmosfer. Kemampubasahan sangat berpengaruh pada proses terjadinya ikatan partikel partikel pada suatu komposit. Rendahnya keterbasahan pada komposit, menyebabkan rendahnya terjadinya ikatan antarmuka pada partikel partikel komposit dan sebaliknya.

Magnesium dan paduannya adalah bahan yang paling ringan diantara logam-logam industri yang mempunyai massa jenis 1,8 yang biasanya digunakan untuk pesawat terbang dan mobil. Sifat-sifat mekanik dari paduan magnesium tidak kalah kuat dari pada paduan Aluminium, terutama mampu mesinnya yang baik. Kekurangan dari magnesium adalah tidak tahan terhadap korosi, oleh karena itu penggunaan secara praktis tidak terlalu banyak digunakan. Dalam perkembangan berikutnya magnesium kemudian dipadukan dengan paduan lain untuk menutupi kekurangannya dan membuat penggunaan magnesium dengan kekhasannya dapat diperluas.

Magnesium memiliki sifat antara lain dumping yang baik, massa jenis rendah serta ringan dan kuat apabila dipadukan. Penambahan unsur magnesium dalam konsentrasi tertentu dapat menaikkan nilai kekerasan dan kekuatan tarik pada paduan aluminium..(Shomad dkk 2020)

Tabel 3 Karakteristik magnesium

Sifat-Sifat	Nilai
Struktur Kristal	HCP
Densitas pada 20°C (103 kg/m ³)	1,74
Titik Cair (oC)	649
Koefisien mulur panas kawat 20o -100oC (10 ⁻⁶ /K)	24,8
Konduktivitas Panas 20o -400oC (W/m.K)	156
Tahanan Listrik 20 oC (10 ⁻⁶ , KΩ.m)	4,39
Modulus Elastisitas (GPa)	45
Modulus Kekakuan (GPa)	17

2.1.3 Carbon Nanotube (CNT)

Carbon Nanotube (CNT) adalah serat karbon ultra tipis yang diameternya berukuran nanometer dan panjang berukuran mikrometer. *CNT* pertama kali

ditemukan oleh seorang ilmuwan Jepang, Sumio Iijima, pada katoda karbon yang digunakan untuk proses pelepasan busur mempersiapkan gugus karbon kecil yang diberi nama *fullerene*. *CNT* memiliki sifat yang unik dan berbagai aplikasi sehingga menjadi salah satu bahan yang paling aktif dieksplorasi dalam beberapa tahun terakhir. Produksi *CNT* dalam skala besar secara ekonomis sangat penting untuk mewujudkan aplikasi ini. (Anggoro dkk 2021)

Carbon Nanotubes (CNT) merupakan salah satu bentuk karbon alotropik, yang memiliki beberapa karakteristik unik yang menjadikannya sebagai bahan penguat yang cocok untuk berbagai jenis komposit. Komposit yang diperkuat *CNT* mendapatkan lebih banyak perhatian saat ini. Penguatan dengan *CNT* mengarah pada peningkatan kekuatan tanpa peningkatan berat yang signifikan. Banyak komposit matriks logam (*MMCs*) dengan logam dasar seperti aluminium, magnesium, tembaga, nikel dll, dan komposit matriks polimer (*PMCs*) telah dibuat dan bereksperimen dengan *CNT* sebagai salah satu agen penguat mereka dan hasil yang sesuai telah dicatat. Makalah ini mengulas beberapa rekaman ini pada *MMC Al* dan *Mg* dan juga beberapa pengembangan di masa depan di bidang ini (Ramnath dkk. 2014)

Aluminium Matriks Komposit yang diperkuat *CNT (AMCs)* banyak digunakan dalam berbagai aplikasi teknik seperti pada komponen mesin, struktur ruang angkasa dll. Untuk mencapai pembuatan yang efisien dan berkinerja tinggi dari *AMC* dua kondisi berikut harus dipenuhi yaitu, Dispersi *CNT* yang seragam dalam matriks *Al* dan antarmuka ikatan yang kuat antara penguat *CNT* dan matriks *Al*. (Silvestre, dkk. 2014)

Ilmu nano merupakan studi fenomena dan manipulasi bahan pada skala atom, molekul dan makro molekul, dimana sifat-sifat bahan sangat berbeda dibandingkan bahan tersebut pada skala yang lebih besar, molekulnya yang berukuran antara 1 hingga 100 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), Bahan berstruktur nano merupakan bahan yang memiliki paling tidak salah satu dimensinya (panjang, lebar, atau tinggi). *Carbon nanotube* merupakan salah satu bidang penelitian yang menarik dalam ilmu pengetahuan modern.

1. Sifat-sifat penting carbon nanotube adalah :
 - a. Reaktifitas Kimia

Reaktivitas kimia *carbon nanotube* akan meningkat sebanding dengan hasil kenaikan arah kurvatur permukaan *carbon nanotube*. Oleh karena itu, reaktivitas kimia pada bagian dinding *carbon nanotube* akan sangat berbeda dengan bagian ujungnya. Diameter *carbon nanotube* yang lebih kecil akan meningkatkan reaktivitas

b. Konduktivitas Elektrik dan Panas

Carbon nanotube dengan diameter yang lebih kecil dapat menjadi semi konduktor atau menjadi metalik tergantung pada vektor khiral. Perbedaan konduktivitas ini disebabkan oleh struktur molekul. Ketika *nanotube* bersifat sebagai konduktor, *nanotube* memiliki konduktivitas yang sangat tinggi. Diperkirakan pada saat nanotube bersifat sebagai konduktor maka ia mempunyai konduktivitas listrik sebesar 1 milyar Ampere per 1 cm².

c. Kekuatan Mekanik

Carbon nanotube mempunyai *modulus Young* yang sangat besar pada arah aksialnya. *Nanotube* menjadi sangat fleksibel karena ukurannya yang panjang. Carbon *nanotube* sangat potensial untuk aplikasi material komposit sesuai dengan kebutuhan.

d. Sifat CNT (*Carbon Nanotube*)

Sifat CNT (*Carbon nanotube*) dijelaskan pada Tabel 4 dibawah ini :

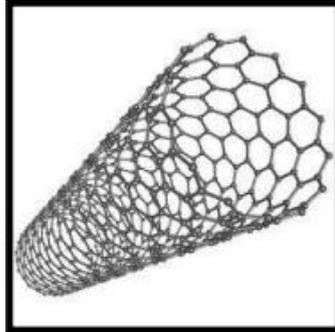
Tabel 4 Propertis *Carbon Nanotube*

Material	<i>Modulus Young</i> (TPa)	Kekuatan Tarik (GPa)	Perpanjangan saat patah (%)
SWNT ^E	1 (dari 1 ke 5)	13 – 53	16
Armchair SWNT ^T	0.94	126.2	23.1
Zigzag SWNT ^T	0.94	94.5	15.6 – 17.5
Chiral SWNT	0.92	-	-
MWNT ^E	0.2-0.8-0.95	11 – 63 - 150	-
Stainless steel ^E	0.186-0.214	0.38 – 1.55	15 – 50

2. Pengelompokan *Carbon Nanotube*

CNT secara umum dapat dikelompokkan menjadi dua macam, yaitu *CNT* berdinding tunggal (*single-walled CNT* atau *SWNT*) dan *CNT* berdinding banyak (*multi-walled CNT* atau *MWNT*).

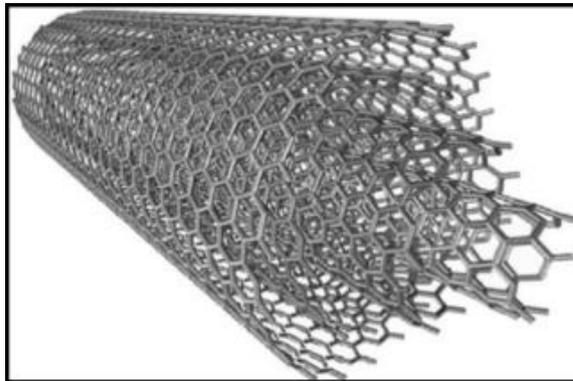
a) *Single Walled Nanotubes (SWNT)*



Gambar 1 *Single Walled Nanotubes (SWNT)*

Struktur ini memiliki diameter kurang lebih 1 nanometer dan memiliki panjang hingga ribuan kali dari diameternya. Struktur *SWNT* dapat dideskripsikan menyerupai sebuah lembaran panjang struktur grafit (disebut *graphene*) yang tergulung. Umumnya *SWNT* terdiri dari dua bagian dengan properti fisik dan kimia yang berbeda. Bagian pertama adalah bagian sisi dan bagian kedua adalah bagian kepala. *SWNT* memiliki beberapa bentuk struktur berbeda yang dapat dilihat bilamana struktur *tube* dibuka. *SWNT* memiliki sifat keelektrikan yang tidak dimiliki oleh struktur *MWNT*. Hal ini memungkinkan pengembangan struktur *SWNT* menjadi *nanowire* karena *SWNT* dapat menjadi konduktor yang baik. Selain itu *SWNT* telah dikembangkan sebagai pengganti dari *field effect transistors (FET)* dalam skala nano. Hal ini karena sifat *SWNT* yang dapat bersifat sebagai *n-FET* juga *p-FET* ketika bereaksi terhadap oksigen. Karena dapat memiliki sifat sebagai *n-FET* dan *p-FET* maka *SWNT* dapat difungsikan sebagai logic gate.

b) *Multi Walled Nanotubes (MWNT)*



Gambar 2 *Multi Walled Nanotubes (MWNT)*

MWNT dibentuk dari beberapa lapisan struktur grafit yang digulung membentuk silinder. Atau dapat juga dikatakan *MWNT* tersusun oleh beberapa *SWNT* dengan berbeda diameter. *MWNT* terbentuk dari 2 sampai 30 lapisan struktur grafit (*graphene*) yang 11 tergulung membentuk silinder dengan diameter 10-5- nm dan panjang lebih dari 10 mikrometer. *MWNT* jelas memiliki sifat yang berbeda dengan *SWNT*. Pada *MWNT* yang hanya memiliki 2 lapis dinding (*Double-Walled Carbon Nanotubes-DWNT*) memiliki sifat yang penting karena memiliki sifat yang menyerupai *SWNT* dengan *chemical resistance* yang lebih baik. Hal ini dikarenakan pada *SWNT* hanya memiliki 1 lapis dinding sehingga bilamana terdapat ikatan C=C yang rusak maka akan menghasilkan lubang di *SWNT* dan hal ini akan mengubah sifat mekanik dan elektrik dari ikatan *SWNT* tersebut. Sedangkan pada *DWNT* masih terdapat 1 lapisan lagi di dalam yang akan mempertahankan sifatnya.

3. Pembentukan *Carbon Nanotube*

Terdapat beberapa cara dalam pembentukan *nanotube*, namun secara umum yang banyak digunakan adalah metode pelepasan bunga api (*arc discharge*), *CVD* (*Chemical Vapour Deposition*), dan *laser ablation*.

a. Metode *Arc Discharge*

Metode ini menggunakan 2 buah batang carbon yang diletakkan saling berhadapan pada ujungnya dan dipisahkan sejarak kurang lebih 1 mm. Ruang yang terpisah ini kemudian dialiri gas seperti Helium dan Argon pada tekanan rendah (50-700 mbar). Kemudian arus listrik sebesar 50-100 A dan tegangan 20 volt diberikan sehingga menciptakan perubahan suhu yang tinggi diantara ujung elektroda sehingga akan terjadi penguapan di ujung batang tersebut. Kemudian proses ini akan dilanjutkan dengan pembentukan lapisan oleh uap dari penguapan batang tersebut pada ujung batang lainnya.

b. Metode *CVD (Chemical Vapour Deposition)*

Metode ini telah ada sejak tahun 1959 namun baru dipakai sejak tahun 1993 untuk proses pembentukan *nanotube*. Pada proses ini carbon disiapkan dengan lapisan partikel logam katalis, seperti nikel, kobalt, besi, atau kombinasinya dan dikondisikan pada suhu sekitar 700 °C. Sementara itu 2 jenis gas, yaitu gas untuk proses seperti ammonia, nitrogen, hydrogen dan sebagainya serta gas yang mengandung carbon seperti *acetylene*, *ethylene*, *ethanol*, *methane*, dan sebagainya, dialirkan ke dalam proses.

c. Metode *Laser Ablation*

Metode ini menggunakan laser untuk menguapkan grafit pada suhu 1200°C. Ruangan tempat berlangsungnya proses ini akan diisi dengan gas helium atau argon dan dijaga tetap pada tekanan 500 Torr. Pada keadaan ini maka akan terbentuk uap yang kemudian dengan cepat akan kembali dingin. Keadaan ini akan menyebabkan terbentuknya atom dan molekul carbon dan akan terbentuk kelompok yang besar. Kelompok-kelompok ini kemudian akan tumbuh menjadi *single-wall carbon nanotube*. Aplikasi *Carbon Nanotube* sudah cukup banyak penelitian yang telah dilakukan untuk komposit *Al/CNT* sejak awal keberadaannya dan dalam kebanyakan kasus, peningkatan yang signifikan dalam sifat mekanik atas logam murni telah ditemukan. Jumlah terbatas dari penelitian yang telah dilakukan untuk menggabungkan *nanotube* terhadap logam lain seperti titanium dan magnesium. Seperti yang telah disebutkan di atas sebelumnya, *carbon*

nanotube telah digunakan untuk meningkatkan sifat anti statis dari komponen *fuelhandling* dan panel bodi mobil. *Carbon nanotube* juga diaplikasikan dalam pembuatan frame sepeda serta raket tennis pada *nanolegde* perusahaan perancis. Gambar 2 *Multi Walled Nanotubes (MWNT)*

2.2 Fabrikasi Aluminium Matrik Komposit

Dalam proses pembuatan aluminium matrik komposit, *AMC* dapat dibuat dengan beberapa metode seperti metode metalurgi serbuk dan metode logam cair.

2.2.1 Metode metalurgi serbuk

Metode metalurgi serbuk (*PM*) digunakan untuk memperoleh distribusi karbon *nanotube (CNT)* yang seragam dalam komposit Aluminium yang berpenguat *CNT*. Dalam mengatasi ketidak sesuaian serbuk *Al* dengan *CNT*, adsorpsi seragam *CNT* ke permukaan nanoflake dengan pencampuran serbuk aluminium dan serbuk komposit *CNT / Al* yang disiapkan dengan ekstrusi panas. distribusi *CNT* yang homogen dalam bubuk Aluminium dapat dicapai hanya dengan pencampuran serbuk semi padat langsung. struktural *CNT* dipertahankan dengan baik dalam komposit. Hasilnya, komposit *CNT/Al* yang kuat dan ulet dengan kekuatan tarik 435 MPa dan plastisitas 6% telah dibuat, yang jauh melebihi nilai material yang dibuat dengan metode konvensional.(Jiang. dkk 2012)

(Bunakov. dkk 2016) melaporkan pembuatan komposit matriks aluminium dengan metode metalurgi serbuk yang mengandung tabung nano karbon multi-dinding (*MWCNTs*) yang diproduksi dengan metode *MOCVD* dan difungsikan melalui perlakuan asam oleh campuran *H2SO4/HNO3*. Efek penambahan 0,1-1% *nanotube (MWCNT)* pada Spesimen serbuk aluminium pada proses *SPS*. Terlihat peningkatan kekerasan mikro dan kekuatan tarik masing-masing sebesar 16% dan 30%. Peningkatan maksimal kekerasan mikro dan kekuatan tarik terdaftar pada penambahan *MWCNT* sebesar 0,1%.

(Liu dkk. 2012) Komposit Aluminium/karbon *nanotube (CNT)* dibuat dengan kombinasi metalurgi serbuk dan pemrosesan pengadukan gesekan (*FSP*). Pengamatan mikrostruktur menunjukkan bahwa *CNT* tersebar secara tunggal dalam komposit, ukuran butir jauh lebih halus, struktur lapisan *CNT* dipertahankan dengan

baik. Spektroskopi Raman juga menunjukkan bahwa kerusakan *CNT* selama *FSP* tidak parah. Dibandingkan dengan Al yang tidak diperkuat, kekuatan luluh komposit *CNT/Al* 1% dan 3% masing-masing meningkat sebesar 23,9% dan 45,0%.

2.2.2 Metode pengecoran

Berbagai penelitian coba dilakukan untuk menghasilkan komposit Aluminium berpenguat partikel diantaranya metode stir casting, metalurgi serbuk dan paduan mekanik. Metode ini memiliki masalah untuk mendapatkan distribusi yang homogen dari senyawa intermetalik dalam matriks dan pembuatan komposit berbentuk kompleks. Oleh karena itu, untuk menghindari masalah ini, Partikel penguat yang terbentuk dan dapat tersebar secara homogen dalam matriks Aluminium dilakukan dengan cara diaduk (*Stir Casting*) dan penekanan (*Squeeze casting*). Suhu pemrosesan lebih rendah dan waktu pengadukan lebih pendek dari pada metode putaran konvensional (Ramesh, dkk 2015)

Aluminium matriks komposit yang diperkuat dengan berbagai partikel diantaranya partikel berukuran nano, telah menarik banyak peneliti karena sifatnya yang unggul dibandingkan dengan partikel yang berukuran mikro. Sejak penemuan tabung nano karbon (*CNT*) oleh IJIMA, banyak aplikasi potensial telah diusulkan dan diselidiki untuk *CNT*. karena *CNT* mempunyai sifat seperti, Kekuatan tinggi, modulus elastisitas, fleksibilitas dan konduktivitas unik, serta banyak sifat menarik lainnya sehingga dapat digunakan dalam berbagai bahan komposit nano. Sejauh ini pembuatan komposit aluminium yang berpenguat *CNT* di produksi dengan proses keadaan cair (pengecoran) seperti *Squeeze casting*, dan *Stir casting*. (Abbasipour, dkk 2010) Aluminium komposit juga dapat di produksi dengan metode metalurgi serbuk. (Jiang dkk. 2012)

1. *Stir Casting*

Dibandingkan dengan teknik pengembangan komposit lainnya, Stir casting adalah metode yang memadai dan sangat dapat diterima di industri. Penerimaan yang luas dari proses pengecoran aduk adalah berdasarkan kemampuan beradaptasinya, manfaat biaya dan keunggulannya untuk produksi massal. Dalam penelitian G. Upadhyay, mengumpulkan rincian *AMC*

dan metode pembuatannya. Di antara berbagai metode pembuatan, metode pengecoran aduk dijelaskan secara rinci beserta berbagai parameternya, seperti ukuran impeler, sudut sudu impeler, dan posisi impeler Kecepatan pengadukan dan waktu pengadukan untuk distribusi bahan penguat yang homogen.(Upadhyay dkk. 2021)

Pengecoran aduk umumnya diterima sebagai rute yang sangat menjanjikan, Keunggulannya terletak pada kesederhanaan, fleksibilitas dan penerapannya untuk produksi dalam jumlah besar dengan keunggulan biaya.(Annigeri and Veeresh Kumar 2017)

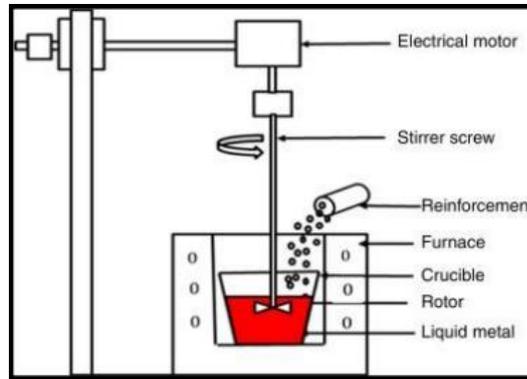
Tryono dkk melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh kecepatan pengadukan pada proses *stir casting* terhadap sifat fisik dan mekanik pada komposit matriks aluminium (AMC) berpenguat pasir silika yang di-*electroless coating*. Proses *stir casting* dilakukan dengan variasi kecepatan pengadukan 300, 400, 500 rpm selama 5 menit pada temperatur semi solid. Fraksi volume pasir silika yang digunakan sebanyak 9% serta penambahan Mg dengan fraksi volume 2,5%. Temperatur penuangan 725°C dan bahan matrik yang digunakan adalah remelting piston bekas . Pengujian impak *charpy* menggunakan standar *ASTM E-23* dan kekuatan tarik menggunakan standar *ASTM E-8*. Rata rata nilai impak dan kekuatan tarik paling tinggi didapat pada spesimen dengan kecepatan pengadukan 500 rpm dengan temperatur tuang 725°C (117,88 N/mm² dan 0,56 J/mm²). Pengujian struktur mikro menunjukkan bahwa kecepatan pengadukan mempengaruhi penyebaran partikel penguat. (Triyono, dkk 2020)

Dalam penelitian ini, komposit matriks aluminium (AMCs) dikembangkan kembali menggunakan dua teknik yang berbeda,

- a) pengecoran aduk konvensional
- b) pengecoran bantuan ultrasonik. (Idrisi and Mourad 2019)

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.



Gambar 3 *Stir Casting*

Keuntungan dari proses *stir casting* 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 kendala yaitu distribusi partikel yang kurang homogen. 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*. Teknik dan peralatan proses *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*.

Paduan aluminium A356 yang diperkuat dengan tabung nano karbon (CNT) diproduksi dengan rute pengecoran aduk pada suhu 700 °C, 1 % Mg ditambahkan untuk mengatasi masalah yang terkait dengan keterbasahan yang buruk, cairan kemudian dicetak pada suhu yang sesuai dengan fraksi padat 0,15 dan 0,30. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *CNT* pada

matriks A356 dapat meningkatkan sifat mekanik secara signifikan. Kekuatan luluh dan kekuatan tarik akhir dari sampel komposit meningkat secara signifikan dibandingkan dengan sampel monolitik. (Benyamin Abbasipour, dkk 2012)

Pada penelitian ini, komposit aluminium *MWCNT*- A356 difabrikasi melalui *mechanical stir casting* yang dilanjutkan dengan *thixoforming* dan dimodifikasi dengan perlakuan panas T6 (*MT6*). optimalisasi dan pengaruh variabel *CNT* (0,5%-1%), *Mg* (0,2%-0,5%), suhu 700 °C dan durasi pengaduk mekanis diselidiki menggunakan desain percobaan yang kuat (*DOE*), yaitu, metode *Taguchi*. Hasil menunjukkan bahwa kekerasan optimum dan nilai *UTS* masing-masing 106,4 *HV* dan 277,0 MPa, diperoleh dari komposit nano yang dikenai *DOE run 4* dan mengandung 0,5% berat *MWCNT*, 0,5% berat *Mg* dan pengadukan mekanis selama 10 menit. Kekerasan (76,3%) dan *UTS* (108,4%). (Hanizam dkk. 2019)

Aluminium matrik komposit berpenguat tabung nano karbon multidinding dan *graphene* menawarkan sifat yang lebih baik (anti gesekan, kekerasan, dan ketahanan aus) dalam komposit untuk aplikasi semacam itu. Rute pemrosesan pengecoran aduk digunakan untuk menyiapkan komposit hibrida (*aluminium-multiwall carbon nanotube-graphene Al-MWCNT-GR*). Matriks eksperimental *Taguchi L16* yang mewakili empat variabel (1-5% penguatan *graphene*, 1-5% *NWCNT*, suhu cetakan 100-300 °C, suhu leleh 650-790 °C, dan kecepatan pengadukan 450-600 Rpm). Hasil penelitian menunjukkan setelah 2,5% berat *MWCNT* dalam matriks *Al*, tidak ada peningkatan sifat yang signifikan, setelah 4 % *graphene*, tidak ada peningkatan signifikan. (Shivalingaiah dkk. 2022)

Dalam penelitian ini, komposit *Al-Cu-Mg* yang diperkuat *carbon nanotube (CNT)* difabrikasi dengan menggabungkan penggilingan bola energi tinggi (HEBM) dengan teknologi pengecoran pengadukan semi-padat (*SSC*). Aluminium bubuk sebagai bahan baku dan Serangkaian X.% *CNT/Al-Cu-Mg* komposit disiapkan dalam perangkat pengaduk geser kuat semi-padat vakum dengan *Mg* murni komersial, *Al-40Cu*, *Al-40Si*, *Al-10Ti*, *Al-10Zr*, dan komposit prekursor *CNT/Al* 3% dipanaskan pada suhu 700 °C, Pengadukan

dilakukan secara resiprokal dalam cairan dengan kecepatan 500 rpm dan waktu pengadukan 30 menit, cairan dituang pada cetakan dengan suhu 480°C. *SEM* dan *XRD* mengungkapkan bahwa penambahan *CNT* secara signifikan menyempurnakan sebuah-fase *Al* dan menekan pertumbuhan preferensialnya dalam orientasi. Kekuatan tarik dan kekuatan luluh masing-masing meningkat dari 319 *MPa* dan 261 *MPa* menjadi 523 *MPa* dan 476 *MPa*, dengan kandungan *CNT* berkisar antara 0 hingga 1,5% karena penguatan dislokasi, penguatan penghalusan butir, penguatan transfer beban, dan penguatan fase kedua diinduksi oleh *CNT*.(Zhang dkk. 2022)

2. *Squeeze Casting*

Pengecoran *squeeze* pertama kali diperkenalkan di negara Russia oleh Chernov pada tahun 1878. Pengecoran *squeeze* sering digambarkan sebagai suatu proses dimana logam cair dibekukan di bawah tekanan eksternal yang relatif tinggi. Proses ini pada dasarnya mengkombinasikan keuntungan-keuntungan pada proses *forging* dan *casting*. Pengecoran *squeeze* sering disebut juga penempaan logam cair (*liquid metal forging*). Proses pemadatan logam cair dilaksanakan didalam cetakan yang ditekan dengan tenaga hidrolik. Penekanan logam cair oleh permukaan cetakan akan menghasilkan perpindahan panas yang cepat dan menghasilkan penurunan porositas. Pada pengecoran *squeeze* banyak parameter yang mempengaruhi, salah satunya adalah temperatur cetakan (*dies*). Apabila cetakan tidak dipanaskan terlebih dahulu maka coran akan membeku terlebih dahulu sebelum memenuhi cetakan dikarenakan panas terserap oleh cetakan. Maka diperlukan penelitian untuk mengetahui temperatur cetakan yang optimal. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh temperatur cetakan terhadap *density*, porositas, kekerasan dan struktur mikro hasil pengecoran *squeeze* Aluminium.(Kusnanto dkk. 2020)

penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh temperatur dan tekanan tuang terhadap nilai kekerasan material pengecoran logam. Bahan pengecoran menggunakan paduan aluminium-tembaga (Al-6,7%Cu). Metode pengecoran menggunakan *squeeze casting*, dimana logam cair dibiarkan

dingin dalam cetakan logam tertutup dan diberi tekanan. Temperatur penuangan divariasikan 710°C, 730°C dan 750°C. Waktu pencampuran logam cair adalah 90 detik dengan putaran pengadukan 600 Rpm. Tekanan logam dalam cetakan divariasikan dari 0 MPa, 2,5 MPa, 5 MPa dan 7,5 MPa, dengan waktu pengepresan 60 detik. Suhu cetakan logam yang digunakan adalah 250 °C. Berdasarkan hasil uji kekerasan skala *Brinell* (*HBN*) bahwa nilai kekerasan tertinggi pada temperatur tuang 710°C dengan tekanan 7,5 MPa, nilai kekerasan 68 HB dan nilai kekerasan terendah pada temperatur tuang. 750°C dengan tekanan 0 MPa, nilai kekerasan adalah 34. HB. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur penuangan maka nilai kekerasannya semakin rendah dan semakin besar tekanan maka nilai kekerasannya semakin tinggi.(Siswanto, dkk 2021)

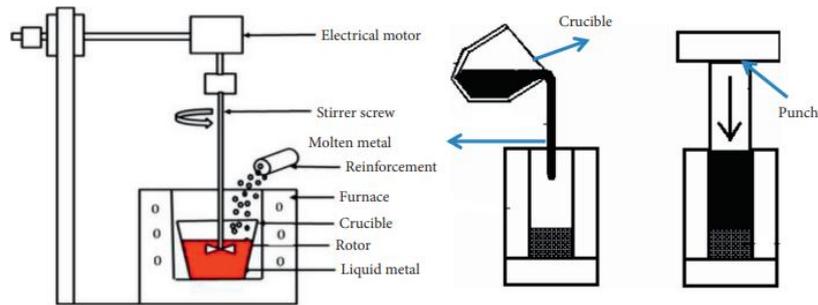
AZ31/AA5083 paduan nano komposit yang mengandung penguatan partikel nano *CNT* dibuat menggunakan proses pemadatan diikuti dengan ekstrusi panas. Dalam penelitian ini, *AZ31* digunakan sebagai bahan matriks cangkang. Serbuk *CNT* digunakan sebagai fasa penguat. Paduan hibrida monolitik *AZ31/AA5083* dicor menggunakan metode *DMD*. pemanasan *AZ31* dan *AA5083* hingga 750°C, lama pengadukan 2,5 menit dengan putaran 460 rpm, Suhu ekstrusi adalah 350°C. *Billet* ditahan pada suhu 400°C selama 60 menit dalam tanur sebelum ekstrusi. Hasil yang diperoleh *AZ31/A A5083* nano komposit paduan hibrida menunjukkan ukuran butir yang mirip dengan monolitik *AZ31/AA5083* paduan hibrida, distribusi nano partikel *CNT* yang wajar, dan 20% kekerasan lebih tinggi dari monolitik *AZ31/AA5083* paduan hibrida. Dibandingkan dengan monolitik *AZ31/AA5083* paduan hibrida (dalam ketegangan), *AZ31/ AA5083* nano komposit paduan hibrida lebih tinggi 0,2% *TYS*, *UTS*, regangan kegagalan dan fraktur (*WOF*) (+9%, +4%, +38% dan +44%, masing-masing). *AZ31/AA5083* nanokomposit paduan hibrida diperlihatkan seperti 0,2% *CYS*(+1%), dan *UCS* yang lebih tinggi, regangan kegagalan dan *WOF*(+7%, +23% dan +23%, masing-masing).(Paramsothy. dkk 2011)

Komposit matriks paduan aluminium-silikon *hypoeutectic* A356 yang diperkuat tabung nano karbon *multiwalled* (*MWCNTs*) dengan persentase

berat (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, dan 2.5%) berasil dibuat menggunakan kombinasi teknik *rheocasting* dan *squeeze casting* dengan tekanan 70 MPa dan waktu pematatan 15 menit. Aluminium A356 dicairkan pada suhu 660 °C dan Magnesium ditambahkan ke cairan dengan berat 0,75%, pengadukan lakukan selama 1 menit pada suhu 620 °C dengan kecepatan 750 rpm, suhu cetakan 250 °C, Hasilnya telah menunjukkan bahwa peningkatan yang signifikan dalam kekuatan tarik akhir dan persentase pemanjangan nanokomposit terjadi pada jumlah optimal 1,5% *MWCNT* yang mewakili peningkatan nilai mereka dengan rasio masing-masing sekitar 50% dan 280%, dibandingkan dengan mereka. nilai yang sesuai dari paduan monolitik. Kekerasan sampel juga meningkat secara signifikan dengan penambahan *CNT*. (Elshalakany, dkk 2014)

3. Pemrosesan *Stir-Squeeze Casting*

Komposit dapat diproduksi dengan cara metalurgi cair diantaranya *stir casting* dipadukan dengan *squeeze casting*. Pertama bahan matrik dipanaskan dalam tungku hingga bahan mencair di dalam tungku. selanjutnya bahan penguat maupun unsur lain yang akan dipadukan dengan matrik dimasukkan dalam tungku. Untuk mendapatkan campuran yang seragam di gunakan pengaduk mekanik (*stir casting*) dengan kecepatan putar yang sudah ditentukan, Pengadukan dilakukan selama hampir lima menit untuk meningkatkan pembasahan dan dispersi penguat yang seragam. Setelah itu campuran dalam jumlah terukur dituangkan ke dalam cetakan baja yang telah dipanaskan sebelumnya, cetakan baja dipasang pada mesin press Hidrolik dan ditekan sebesar Tekanan yang telah ditentukan sebelumnya. Pengecoran yang telah ditekan dibiarkan mendingin di dalam cetakan hingga suhu kamar dan kemudian dikeluarkan dari cetakan.(Prasad and Ramachandra 2013)



Gambar 4 proses *stir casting* dan *Squeeze casting*

2.3 Karakterisasi Komposit Metalurgi Pengecoran

2.3.1 Sifat fisis

Sifat fisis adalah kelakuan atau sifat-sifat material yang bukan disebabkan oleh pembebanan seperti pengaruh pemanasan, pendinginan dan pengaruh arus listrik yang lebih mengarah pada struktur material. sifat fisis material yang akan di uji dalam penelitian ini yaitu:

1. Desitas

Densitas merupakan besaran fisis yang merupakan perbandingan massa terhadap volume. Pengukuran densitas material padatan dapat dilakukan dengan dengan metode Archimedes. Untuk menghitung densitas spesimen digunakan persamaan

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Dimana :

ρ = densitas sampel (g/cm^3)

m = Massa sampel (g/cm^3)

v = volume sampel (gram)

2. Porositas

Porositas dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah volume ruang kosong (rongga pori) yang dimiliki oleh zat padat terhadap jumlah dari

volume zat padat itu sendiri. Tingkat porositas suatu bahan dinyatakan dengan persamaan berikiut :

$$\varepsilon = \frac{m_b - m_k}{m_k} \times 100\%$$

dimana:

ε = tingkat porositas (%)

m_k = massa kering sampel setelah dikeringkan (gram)

m_b = massa basah sampel setelah direndam didalam air (gram)

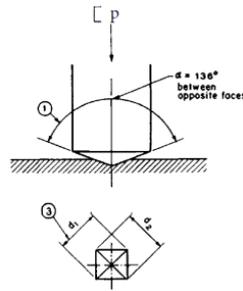
2.3.2 Sifat mekanik

Sifat mekanik dapat diartikan sebagai respon atau perilaku material terhadap pembebanan yang diberikan, dapat berupa gaya, torsi atau gabungan keduanya. Dalam prakteknya pembebanan pada material terbagi dua yaitu beban statik dan beban dinamik. Perbedaan antara keduanya hanya pada fungsi waktu dimana beban statik tidak dipengaruhi oleh fungsi waktu sedangkan beban dinamik dipengaruhi oleh fungsi waktu. Beberapa sifat mekanik yang akan di uji yaitu:

1. Uji kekerasan

Kekerasan logam dapat diartikan sebagai ketahanan suatu bahan logam terhadap penetrasi, kekerasan memberikan indikasi cepat terhadap perilaku deformasi. Harga kekerasan bahan tersebut dapat dianalisis dari besarnya beban yang diberikan terhadap luasan bidang yang menerima pembebanan.

Salah satu metode pengujian yang paling umum digunakan adalah metode pengujian *Vickers*. Pengujian kekerasan *Vickers* bertujuan menentukan kekerasan suatu material dalam bentuk daya tahan material terhadap intan berbentuk piramida dengan sudut puncak 136° yang ditekankan pada permukaan material uji. Angka kekerasan *Vickers* (*Vickers hardness number, VHN*) didefinisikan sebagai beban dibagi dengan luas permukaan lekukan. Skema pengujian kekerasan *Vickers* ditampilkan pada gambar 2.5 (*ASTM E92, 1097*)



Gambar 5 Skema Pengujian Kekerasan *Vickers* (*ASTM E 92-82, 1997*)

Angka kekerasan *Vickers* (*VHN*) dapat ditentukan dengan:

$$HV = \frac{1,854 P}{d_1 d_2}$$

Dimana:

HV = Nilai kekerasan skala *Vickers* (*HV* atau kg/mm^2)

P = Beban yang digunakan (kg)

d^1, d^2 = Panjang diagonal rata-rata (mm)

Selain itu seringkali diperlukan metode yang cepat untuk mengkonversi nilai kekerasan terhadap metode pengujian kekerasan lainnya. Nilai pendekatan konversi Brinell terhadap kekerasan *Vickers* ditampilkan pada persamaan berikut:

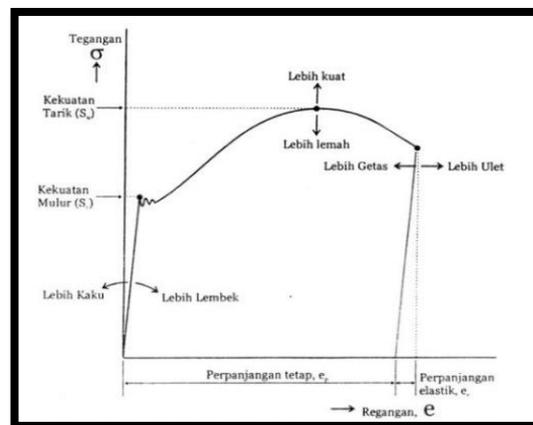
$$HB \sim 0,95 HV$$

2. Uji tarik

Salah satu pengujian material yang paling banyak dilakukan di dunia industri adalah Pengujian tarik. Pengujian tarik ini terbilang yang paling mudah dan banyak data yang dapat diambil dari pengujian ini. Diantaranya yang bisa didapat dari pengujian tarik ini adalah Kekuatan tarik (Ultimate Tensile Strength), Kekuatan mulur (Yield Strength 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 menganalisa 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.

Kekuatan material biasa diperoleh dari sebuah pengujian yang dikenal dengan nama uji tarik. Dari pengujian itu selain diperoleh spesimen kerja yang putus karena proses penarikan, juga dihasilkan sebuah kurva uji tarik. Kurva ini merupakan gambaran dari proses pembebanan pada spesimen kerja mulai dari awal penarikan hingga spesimen kerja itu putus.



Gambar 6 Contoh kurva uji tarik

2.3.3 Mikro struktur

Struktur mikro merupakan struktur yang dapat diamati dibawah mikroskop optik. Meskipun dapat pula diartikan sebagai hasil dari pengamatan menggunakan *scanning electron microscope (SEM)*. *Mikroskop optik* dapat memperbesar struktur hingga 1500 kali.

1. Proses Metalografi

Metalografi adalah ilmu yang mempelajari struktur mikro suatu logam dan karakteristiknya. Metalografi sangat penting untuk mengetahui ukuran butir, distribusi fasa, dan untuk mengetahui adanya inklusi dalam suatu logam. Hasil dari metalografi tersebut akan menjadi acuan untuk menentukan

suatu material telah sesuai dengan spesifikasi yang diminta atau untuk mengetahui proses yang sudah dialami oleh material yang bersangkutan.

Faktor yang sangat mempengaruhi keberhasilan suatu proses metalografi menggunakan mikroskop optik adalah persiapan permukaan spesimen yang akan dilihat. Ini adalah prinsip dasar yang dilakukan oleh bapak metalografi Henry Clifton Sorby (1826 – 1908) yang adalah orang pertama yang mendapatkan hasil poles dan etsa yang benar dari suatu spesimen. Klasifikasi dari metalografi ada 2 yaitu:

a. *Makrografi (Macroexamination/Macroscopy/Macrography)*

b. *Mikrografi (Microexamination/Microscopy/Micrography)*

Makrografi mempelajari struktur logam dan paduannya menggunakan pengamatan langsung atau menggunakan lensa dengan perbesaran yang kecil sampai dengan 15 kali. Hasil pengamatannya dinamakan makrostruktur dengan tujuan sebagai berikut:

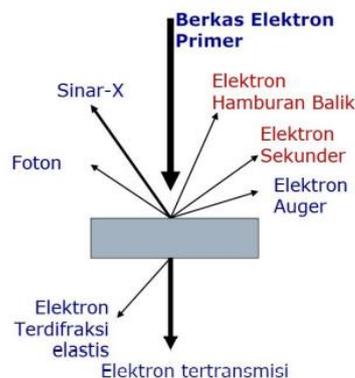
- Memunculkan ukuran, bentuk dan pengaturan butir kristal yang ada di dalam logam
- Memunculkan retakan yang mungkin ada selama proses fabrikasi logam
- Memunculkan serat/alur logam yang mengalami deformasi
- Memunculkan adanya pengkerutan (*shrinkage*), porositas dan lubang akibat adanya gas yang terjebak saat proses pembentukan.
- Instrumen penting dalam menganalisa penyebab kegagalan suatu komponen

Mikrografi mempelajari struktur logam dan paduannya menggunakan mikroskop dengan perbesaran mulai dari 20 kali sampai 46 dengan 2000 kali. Hasil pengamatannya disebut mikrostruktur. Sedangkan tujuannya adalah untuk:

- Menentukan kandungan unsur kimia yang ada di dalam paduan
- Menemukan cacat mikro
- Menentukan ukuran dan bentuk butir kristal
- Menunjukkan kualitas dari proses perlakuan panas (*heat treatment*)

2. Karakterisasi mikroskop elektron (*SEM-EDS*)

Karakterisasi mikrostruktur paduan suatu logam dengan tingkat ketelitian tinggi dapat dilakukan menggunakan alat *Scanning Electron Microscope (SEM)*. *SEM* merupakan sebuah mikroskop elektron yang berfungsi untuk melihat atau menganalisa suatu permukaan dari sampel dengan cara menembakkan elektron dengan energi tinggi pada sampel. Teknik ini menjadi sangat umum dilakukan untuk mengamati material padat seperti morfologi dan topologi permukaan material. Berkas elektron memiliki karakteristik panjang gelombang yang lebih rendah dari satu angstrom sehingga dapat digunakan untuk mengamati objek secara detail pada skala atomis. Gambar 6 memperlihatkan skema interaksi antara elektron dengan sampel pada mikroskop elektron, peristiwa ini terjadi jika elektron dengan energi tinggi sekitar 100 – 400 keV bertumbukan dengan sampel. Dalam prinsip pengukuran ini dikenal dua jenis elektron, yaitu elektron primer dan elektron sekunder. Elektron sekunder yang akan ditangkap oleh detector dan mengubah sinyal tersebut menjadi suatu sinyal gambar



Gambar 7 Skema Interaksi antara Elektron dengan Sampel pada Mikroskop Elektron

SEM dapat mengamati struktur maupun bentuk permukaan yang berskala lebih teliti yang dilengkapi dengan *EDS (Electron Dispersive XRay Spectroscopy)* atau ada yang menyebut dengan *EDX. Electron Dispersive X-ray Spectroscopy* merupakan suatu teknik analisis yang digunakan untuk

menganalisa unsur atau karakterisasi kimia dari sampel. Ini adalah salah satu varian *fluoresensi X-ray* spektroskopi yang mengandalkan penyelidikan sampel melalui interaksi antara radiasi elektromagnetik dan material menganalisa sinar-X yang diemisikan oleh material sebagai respon terhadap tumbukan dari partikel bermuatan.

.