

**TESIS**

**STUDI KOMPOSIT Matrik ALUMINIUM BERPENGUAT  
GRAFIT DAN TEMBAGA DENGAN METODE  
METALURGI SERBUK**

**ASWAR  
D022201003**



**PROGRAM PASCASARJANA  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2022**

# LEMBAR PENGESAHAN

## STUDI KOMPOSIT Matrik ALUMINIUM BERPENGUAT GRAFIT DAN TEMBAGA DENGAN METODE METALURGI SERBUK

Disusun dan diajukan oleh

**ASWAR**  
**D022201003**

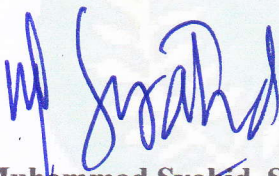
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Mesin  
Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin  
pada tanggal 5 Juli 2022

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

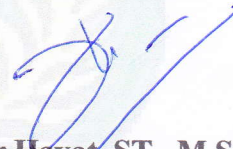
Menyetujui  
Komisi Penasehat,

Pembimbing Utama



**Dr. Muhammad Syahid, ST., MT**  
NIP. 197707072005011001

Pembimbing Pendamping




**Azwar Hayat, ST., M.Sc., Ph. D**  
NIP. 198401262012121002

Ketua Program Studi  
Magister Teknik Mesin



**Dr. Hairul Arsyad, ST., MT.**  
NIP. 197503222002121001

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



**Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT**  
NIP. 197309262000121002



## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Aswar  
NIM : D022201003  
Program Studi : Teknik Mesin / Material  
Jenjang : S2

Menyatakan bahwa karya tulis berupa tesis dengan judul:

STUDI KOMPOSIT Matrik ALUMINIUM BERPENGUAT GRAFIT DAN  
TEMBAGA DENGAN METODE METALURGI SERBUK

Merupakan karya tulis saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan atau pemikiran orang lain, apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Tesis ini merupakan hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 5 Juli 2022

Yang menyatakan



## KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas berkat nikmat kesempatan dan kesehatan yang diberikan sehingga penulis mampu menyelesaikan tesis ini dengan tepat waktu. Penyusunan tesis ini tidak lepas dari bantuan dari berbagai pihak, untuk itu penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc. selaku rektor Universitas Hasanuddin.
2. Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT. selaku Ketua Departemen Teknik Mesin.
3. Dr. Hairul Arsyad, ST., MT. selaku Ketua Program Studi Pasca Sarjana Teknik Mesin.
4. Dr. Muhammad Syahid, ST., MT. selaku pembimbing I yang memberikan arahan dan bimbingan dalam penyelesaian tesis ini.
5. Azwar Hayat, ST., M.Sc., Ph. D selaku pembimbing II yang memberikan arahan dan bimbingan dalam penyelesaian tesis ini.
6. Dosen dan Tenaga Kependidikan yang memberikan arahan dan bimbingan dalam penyelesaian tesis ini.
7. Teman-teman S2 Teknik Mesin atas dukungan moril dan doanya dalam pembuatan tesis ini.
8. Orang tua dan seluruh keluarga yang telah banyak memberi dukungan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa tesis ini belum sempurna, oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat membangun diperlukan demi meningkatkan ilmu pengetahuan dan perbaikan tesis ini pada masa mendatang guna mencapai manfaat yang lebih baik.

Gowa, Juli 2022

Aswar

## ABSTRAK

**Aswar**, Studi komposit matrik aluminium berpenguat grafit dan tembaga dengan metode metalurgi serbuk, dibimbing oleh **Muhammad Syahid** dan **Azwar Hayat**

Material yang ringan dengan sifat yang optimal sangat diminati pada berbagai bidang industri khususnya bidang otomotif, sehingga perlu dilakukan studi terkait pengembangan material tersebut. Pada penelitian ini, komposit matrik aluminium melalui teknik metalurgi serbuk disintesis dari campuran serbuk dengan variasi fraksi volume grafit (0, 1, 3 dan 5%) dan variasi fraksi volume tembaga (0, 4, 7 dan 10%). *Green compact* dihasilkan dengan metode *cold uniaxial pressing* pada tekanan 150 MPa dan suhu sinterisasi 600 °C selama 90 menit diberikan untuk mendapatkan kekuatan dan bentuk yang rigid. Pengujian porositas, densitas dan tingkat penyusutan untuk menganalisa sifat fisis, pengujian kekerasan dan laju keausan dilakukan untuk menganalisa sifat mekanik. Investigasi pembentukan fasa sekunder dengan uji XRD, observasi struktur mikro dan sebaran unsur penyusun menggunakan SEM-EDS. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan variasi fraksi grafit dan tembaga mempengaruhi sifat komposit matrik aluminium. Kandungan grafit menurunkan tingkat porositas hingga 5,10% pada fraksi 5% grafit, peningkatan kekerasan dicapai hingga 81,52 HV yang diikuti laju ketahanan aus terbaik ditemukan pada komposit dengan fraksi 10% tembaga. Peningkatan sifat mekanik dikonfirmasi dengan pembentukan fasa  $Al_2Cu$  dan *interface bonding* butir yang lebih rapat. Sifat komposit matrik aluminium yang ringan, bebas timbal dengan sifat yang dioptimalkan menawarkan sifat yang handal sebagai material alternatif di bidang otomotif.

*Kata kunci: komposit matrik aluminium, metalurgi serbuk, variasi grafit variasi tembaga, komposit bebas timbal, bushing*

## ABSTRACT

**Aswar**, Study of graphite and copper reinforced aluminum matrix composites by powder metallurgy method, supervised by **Muhammad Syahid** and **Azwar Hayat**

Lightweight materials with optimal properties are in great demand in various industrial fields, especially in the automotive sector. It is necessary to conduct studies related to the development of these materials. In this study, aluminum matrix composites through powder metallurgy were synthesized from a mixture of powders with variations in the volume fraction of graphite (0, 1, 3, and 5%) and variations in the volume fraction of copper (0, 4, 7 and 10%). Green compacts were produced by cold uniaxial pressing method at a pressure of 150 MPa, and a sintering temperature of 600 °C for 90 minutes was given to obtain strength and rigid shape. Porosity, density, and shrinkage tests were carried out to analyze physical properties. Hardness tests and wear rates were carried out to analyze mechanical properties, investigation of secondary phase formation by XRD test, microstructure observation, and distribution of constituent elements using SEM-EDS. The test results show that the addition of variations in the graphite and copper fractions affects the properties of the aluminum matrix composite. The graphite content reduces the level of porosity to 5.10% in the 5% graphite fraction, an increase in hardness to 81.52 HV followed by the best wear resistance rate was found in the composite with a 10% copper fraction. The improvement of the mechanical properties was confirmed by the formation of the Al<sub>2</sub>Cu phase and a tighter grain bonding interface. The lightweight, lead-free aluminum matrix composite properties with optimized properties offer reliable properties as an alternative material in the automotive field.

*Keywords: aluminum matrix composite, powder metallurgy, variation of graphite, variation of copper, self-lubricating, bushing*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	i
PERNYATAAN KEASLIAN .....	ii
KATA PENGANTAR .....	iii
ABSTRAK .....	iv
ABSTRACT .....	v
DAFTAR ISI .....	vi
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xv
DAFTAR PERSAMAAN .....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvii
BAB I .....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	5
1.3. Tujuan Penelitian .....	5
1.4. Batasan Masalah .....	5
1.5. Manfaat Penelitian .....	6
1.6. Sistematika Penulisan .....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	7
2.1. Metalurgi Serbuk ( <i>Powder Metallurgy</i> ) .....	7
2.1.1 Preparasi Serbuk Logam ( <i>Metal Powder Preparation</i> ) .....	9
2.1.2 Pencampuran ( <i>Mixing</i> ) .....	11
2.1.3 Pemadatan ( <i>Compaction</i> ) .....	12
2.1.4 Proses Sinterisasi ( <i>Sintering</i> ) .....	14
2.2. Komposit Matrik Aluminium .....	17
2.2.1 Aluminium ( <i>Aluminum</i> ) .....	18
2.2.2 Tembaga ( <i>Copper</i> ) .....	20

2.2.3	Magnesium ( <i>Magnesium</i> ).....	21
2.2.4	Grafit ( <i>Graphite</i> ).....	23
2.3.	Perkembangan Komposit Metalurgi Serbuk .....	25
2.4.	Aplikasi Komposit pada Bantalan .....	27
2.4.1	Klasifikasi Bantalan.....	27
2.4.2	Bantalan Luncur Struktur Berlapis .....	28
2.4.3	Produk <i>Bimetal Bearing</i> di Industri.....	30
2.5.	Komposit Bebas Timbal pada Bantalan Luncur.....	36
2.6.	Karakterisasi Komposit Metalurgi Serbuk.....	38
2.6.1	Densitas.....	38
2.6.2	Porositas .....	39
2.6.3	Kekerasan.....	39
2.6.4	Keausan.....	41
2.6.5	Proses Metalografi.....	45
2.6.6	Karakterisasi Difraksi Sinar X (XRD).....	46
2.6.7	Karakterisasi Mikroskop Elektron (SEM-EDS) .....	48
2.7.	Uji Statistik ANOVA .....	49
BAB III METODE PENELITIAN.....		50
3.1.	Persiapan Bahan dan Alat.....	50
3.1.1	Bahan Baku Serbuk .....	50
3.1.2	Mesin dan alat uji .....	53
3.1.3	Perlengkapan Pendukung.....	53
3.2.	Variabel Penelitian.....	54
3.2.1	Variabel Bebas.....	55
3.2.2	Variabel Terikat.....	55
3.2.3	Variabel Terkontrol.....	55
3.3.	Prosedur Penelitian .....	56
3.3.1	Proses preparasi serbuk ( <i>powder preparation</i> ) .....	56
3.3.2	Proses pencampuran serbuk ( <i>powder mixing</i> ).....	56
3.3.3	Proses pemadatan ( <i>compaction</i> ) .....	58
3.3.4	Proses Sinterisasi ( <i>sintering</i> ) .....	59



3.4.	Prosedur Pengujian .....	60
3.4.1	Uji densitas .....	60
3.4.2	Uji Porositas .....	62
3.4.3	Uji Kekerasan.....	63
3.4.4	Uji Keausan.....	63
3.4.5	Uji Difraksi Sinar X (XRD) .....	65
3.4.6	Metalografi dan Observasi Mikroskop Optik.....	66
3.4.7	Observasi Mikrografi SEM-EDS .....	67
3.5.	Waktu dan Tempat Penelitian.....	68
3.6.	Diagram Alir Penelitian .....	69
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		70
4.1.	Observasi Bahan Baku .....	70
4.1.1	Observasi serbuk bahan baku .....	70
4.1.2	Observasi campuran serbuk bahan baku.....	72
4.2.	Observasi sampel komposit.....	74
4.2.1	Observasi visual sampel .....	74
4.2.2	Investigasi Beban Ejeksi Sampel .....	75
4.3.	Investigasi Sifat Fisis Komposit .....	80
4.3.1	Investigasi tingkat densitas dan densitas relatif komposit .	80
4.3.2	Investigasi tingkat porositas komposit.....	82
4.3.3	Investigasi Efek penyusutan Komposit ( <i>Shrinkage Effect</i> )	84
4.4.	Investigasi Sifat Mekanik .....	86
4.4.1	Investigasi sebaran kekerasan permukaan komposit .....	86
4.4.2	Investigasi tingkat kekerasan komposit.....	88
4.4.3	Investigasi ketahanan aus komposit .....	90
4.4.4	Investigasi efek <i>Self-Lubricating</i> oleh grafit.....	91
4.5.	Investigasi Fasa dan Struktur Mikro .....	93
4.5.1	Investigasi XRD pembentukan fasa sekunder .....	93
4.5.2	Estimasi ukuran kristal dan densitas dislokasi .....	96
4.5.3	Investigasi bentuk dan ukuran butir (proses metalografi)..	99
4.5.4	Investigasi mikropori komposit .....	100

4.5.5	Investigasi Mikrografi SEM-EDS .....	105
4.6.	Evaluasi Sifat Komposit pada Aplikasi Bantalan Luncur .....	112
BAB V	KESIMPULAN .....	114
5.1.	Kesimpulan.....	114
5.2.	Saran .....	115
DAFTAR	PUSTAKA.....	116

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Rute Proses Metalurgi Serbuk .....	9
Gambar 2.2	Pengaruh laju putaran pencampuran serbuk pada kapasitas pengisian 50% .....	11
Gambar 2.3	Grafik fungsi tekanan kompaksi terhadap densitas <i>green compact</i> Al <sub>3</sub> Cu <sub>2.5</sub> Mg .....	13
Gambar 2.4	Pengaruh tekanan pemadatan terhadap kekuatan spesifik komposit AlCuMg .....	14
Gambar 2.5	Tahapan Proses sinter :a) <i>Point contact</i> , b) <i>Initial Stage</i> , c) <i>Intermediate Stage</i> , d) <i>Final Stage</i> .....	15
Gambar 2.6	Hasil SEM-EDS komposit AlCuMg yang disinter pada suhu 620°C selama 60 menit: (a), (b) dan (c) pada batas butir, (d) dan (e) pada butir .....	17
Gambar 2.7	Simbol periodik unsur aluminium .....	18
Gambar 2.8	Simbol Periodik Unsur Tembaga .....	20
Gambar 2.9	Simbol Periodik Unsur Magnesium .....	21
Gambar 2.10	Simbol Periodik Unsur Karbon .....	23
Gambar 2.11	Grafik laju keausan komposit Al <sub>20</sub> 24-Grafit pada variasi kandungan grafit .....	24
Gambar 2.12	Grafik pengaruh beban terhadap laju keausan komposit magnesium grafit .....	24
Gambar 2.13	Siklus sinterisasi komposit Al <sub>5</sub> Cu <sub>0.5</sub> Mg .....	26
Gambar 2.14	Grafik fungsi <i>holding time</i> sinterisasi pada 620°C terhadap densitas (a) dan kekerasan (b) komposit Al Cu (4,3 %wt) Mg(1.2%wt).....	26
Gambar 2.15	Aplikasi bantalan luncur dan gelinding pada poros .....	27
Gambar 2.16	Klasifikasi bantalan .....	28
Gambar 2.17	Struktur bantalan mesin berlapis .....	28
Gambar 2.18	Produk <i>Bimetal Bearing</i> jenis bushing.....	31

Gambar 2.19	Struktur utama <i>Bimetal-bushing</i> .....	31
Gambar 2.20	Aplikasi <i>Bimetal Bearing</i> DYB-300 untuk alat berat .....	32
Gambar 2.21	Aplikasi <i>bimetal bushing</i> pada <i>vane pump</i> .....	33
Gambar 2.22	Produk <i>Bimetal Bearing</i> jenis pelat .....	34
Gambar 2.23	Struktur utama <i>bimetal bearing</i> jenis pelat .....	34
Gambar 2.24	Aplikasi <i>surface bearing</i> pada rotor .....	35
Gambar 2.25	Aplikasi bantalan tipe pelat pada <i>piston pump</i> .....	36
Gambar 2.26.	Teknik pengujian indentasi .....	40
Gambar 2.27	Skema Pengujian Kekerasan Vickers .....	40
Gambar 2.28	Mekanisme keausan gesek ( <i>adhesive</i> ) .....	42
Gambar 2.29	Mekanisme keausan abrasif .....	42
Gambar 2.30	Mekanisme keausan lelah .....	42
Gambar 2.31	Skema pengujian tribometer <i>pin on disc</i> .....	43
Gambar 2.32	Skema Ilustrasi FWHM dari profil puncak XRD .....	46
Gambar 2.33	Skema Interaksi antara Elektron dengan Sampel pada Mikroskop Elektron .....	48
Gambar 3.1	Serbuk Aluminium .....	50
Gambar 3.2	Serbuk magnesium .....	51
Gambar 3.3	Serbuk grafit .....	52
Gambar 3.4	Serbuk tembaga .....	52
Gambar 3.5	Bentuk cetakan .....	54
Gambar 3.6	Ukuran dinding cetakan .....	54
Gambar 3.7	Bentuk dan ukuran spesimen .....	55
Gambar 3.8	Skema pencampuran serbuk .....	57
Gambar 3.9	Skema proses kompaksi (pemadatan) .....	58
Gambar 3.10	Siklus proses sinterisasi .....	59
Gambar 3.11	Skema pengujian densitas Archimedes .....	61
Gambar 3.12	Skema pengujian porositas .....	62
Gambar 3.13	Skema pengujian keausan <i>pin on disc</i> .....	64
Gambar 3.14	<i>Laser Scanning Microscope type Olympus OLS4100</i> .....	66
Gambar 3.15	Mikroskop Optik Type <i>Raxvision MM10A</i> .....	67

Gambar 3.16	Diagram Alir Penelitian.....	69
Gambar 4.1	Citra mikro serbuk bahan baku (a) aluminium (b). magnesium (c). grafit (d). tembaga.....	71
Gambar 4.2	Hasil pencampuran serbuk metode <i>dry mixing</i> selama 2 jam a) campuran S5 dan b) campuran S4/S6 c) campuran serbuk S7 d) campuran serbuk S8.....	73
Gambar 4.3	Bentuk visual spesimen <i>green compact (GC)</i> dan <i>sintered compact (SC)</i> , (a) GC-S4 (b) SC-S4 (c) GC-S8 (d) SC-S8	74
Gambar 4.4	Hubungan komposisi komposit matrik aluminium variasi grafit dan tembaga terhadap rasio beban eaksi.....	78
Gambar 4.5	Hubungan komposisi komposit matrik aluminium variasi grafit dan tembaga terhadap densitas .....	80
Gambar 4.6	Hubungan komposisi komposit matrik aluminium variasi grafit dan tembaga terhadap densitas relatif .....	81
Gambar 4.7	Hubungan komposisi komposit matrik aluminium variasi grafit dan tembaga terhadap tingkat porositas .....	82
Gambar 4.8	Representasi perilaku penyusutan pada sampel komposit (a).Sebelum <i>sintering</i> b) Sesudah <i>sintering</i> .....	84
Gambar 4.9	Hubungan komposisi komposit matrik aluminium terhadap tingkat penyusutan ( <i>shrinkage</i> ).....	85
Gambar 4.10	Posisi titik indentasi (a).Komposit S4 (b).Komposit S8.....	86
Gambar 4.11	Fotografi jejak indentasi pengujian pada permukaan (a).Komposit S4 (4%Cu) (b). Komposit S8 (10%Cu) .....	86
Gambar 4.12	Komparasi distribusi kekerasan permukaan pada sampel komposit S4 (4%Cu) dan S8 (10%Cu).....	87
Gambar 4.13	Hubungan komposisi komposit matrik aluminium variasi grafit dan tembaga terhadap tingkat kekerasan .....	88
Gambar 4.14	Hubungan komposisi komposit matrik aluminium variasi grafit dan tembaga pada variasi beban terhadap laju keausan .....	90

Gambar 4.15	Fotografi 80x pada permukaan keausan komposit a) S0 (Pure Al), b) S1 (Al1.5Mg4Cu0Gr), c) S4 (Al1.5Mg4Cu5Gr), d) S8 (Al1.5Mg10Cu5Gr) .....	91
Gambar 4.16	Pola difraksi sinar-X pada komposit S4(Al1.5Mg5Gr4Cu)	94
Gambar 4.17	Pola difraksi sinar-X pada komposit S8(Al1.5Mg4Gr10Cu) .....	94
Gambar 4.18	Ukuran kristal komposit S4(Al1.5Mg5Gr4Cu) pada posisi 2-theta ( $2\theta$ ) .....	97
Gambar 4.19	Ukuran kristal komposit S8(Al1.5Mg5Gr10Cu) pada posisi 2-theta ( $2\theta$ ) .....	98
Gambar 4.20	Hubungan antara densitas dislokasi dan tingkat kekerasan pada komposit matrik aluminium .....	98
Gambar 4.21	Citra <i>Laser Scanning Microscope</i> pasca etsa dengan <i>Keller Reagent</i> pada komposit (a) S4 (4%Cu) dan (b) S8 (10%Cu).....	99
Gambar 4.22	Fotografi mikroskop optik sampel komposit pasca kompaksi (a) S4(Al1.5Mg5Gr4Cu), (b) S8(Al1.5Mg5Gr10Cu) .....	101
Gambar 4.23	Citra 3D morfologi <i>green compact</i> S4(Al1.5Mg5Gr4Cu)	101
Gambar 4.24	Distribusi ukuran pori pada sampel <i>green compact</i> S4(Al1.5Mg5Gr4Cu) .....	102
Gambar 4.25	Fotografi SEM sampel pasca sinterisasi (a) Komposit S4(Al1.5Mg5Gr4Cu) (b) Komposit S8(Al1.5Mg5Gr10Cu) .....	103
Gambar 4.26	Citra 3D morfologi <i>sintered compact</i> S4(Al1.5Mg5Gr4Cu) .....	103
Gambar 4.27	Distribusi ukuran pori pada komposit S4(Al1.5Mg5Gr4Cu) setelah sinterisasi .....	104
Gambar 4.28	Citra mikrografi SEM komposit S4(Al1.5Mg5Gr4Cu) pada (a). Interface partikel grafit, (b). Interface partikel tembaga .....	105

Gambar 4.29	Citra mikrografi SEM komposit S8(Al1.5Mg5Gr10Cu) pada a). Interface pori b) Interface partikel tembaga .....	105
Gambar 4.30	Spektrum EDS S4(Al1.5Mg5Gr4Cu) pada area interface .....	108
Gambar 4.31	Spektrum EDS S8(Al1.5Mg5Gr10Cu) pada area interface .....	108
Gambar 4.32	Mapping unsur penyusun komposit S4(Al1.5Mg5Gr4Cu) .....	110
Gambar 4.33	Mapping unsur penyusun komposit S8(Al1.5Mg5Gr10Cu) .....	111
Gambar 4.34	Grafik rasio kekuatan terhadap berat pada komposit.....	113

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Nilai tekanan kompaksi pada beberapa logam .....	12
Tabel 2.2	Karakteristik Aluminium .....	19
Tabel 2.3	Karakteristik Tembaga .....	20
Tabel 2.4	Karakteristik magnesium .....	22
Tabel 2.5	Spesifikasi teknis <i>bimetal bushing</i> jenis CSB-800 .....	33
Tabel 2.6	Spesifikasi teknis <i>bimetal bearing</i> jenis pelat ( <i>surface bearing</i> )	35
Tabel 2.7	Material komposit dan kapasitas beban pada <i>bimetal bearing</i> .	36
Tabel 2.8	Ringkasan uji hipotesis ANOVA.....	49
Tabel 3.1	Komposisi serbuk aluminium .....	50
Tabel 3.2	Komposisi serbuk magnesium .....	51
Tabel 3.3	Komposisi serbuk grafit .....	52
Tabel 3.4	Komposisi serbuk tembaga.....	52
Tabel 3.5	Komposisi campuran serbuk dalam persentase volume.....	56
Tabel 3.6	Parameter Pengujian Difraksi Sinar X .....	65
Tabel 3.7	Jadwal Rencana Penelitian .....	68
Tabel 4.1	Komposisi campuran serbuk.....	72
Tabel 4.2	Data pengujian beban eaksi pada variasi grafit .....	75
Tabel 4.3	Ikhtisar data pengujian beban eaksi pada variasi grafit .....	75
Tabel 4.4	Data ANOVA pengujian beban eaksi pada variasi grafit.....	76
Tabel 4.5	Data pengujian beban eaksi pada variasi tembaga .....	76
Tabel 4.6	Ikhtisar data pengujian beban eaksi pada variasi tembaga .....	77
Tabel 4.7	Data pengujian beban eaksi pada variasi tembaga .....	77
Tabel 4.8	Daftar puncak difraksi sinar-X komposit S4 .....	95
Tabel 4.9	Daftar puncak difraksi sinar-X komposit S8 .....	95
Tabel 4.10	Matriks kualifikasi sifat komposit terhadap komposit timbal....	112



## DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan (2.1) .....	38
Persamaan (2.2) .....	39
Persamaan (2.3) .....	41
Persamaan (2.4) .....	41
Persamaan (2.5) .....	44
Persamaan (2.6) .....	44
Persamaan (2.7) .....	47
Persamaan (2.8) .....	47
Persamaan (3.1) .....	61
Persamaan (3.2) .....	62
Persamaan (3.3) .....	63
Persamaan (3.4) .....	65
Persamaan (4.1) .....	96
Persamaan (4.2) .....	97

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Perhitungan Beban Kompaksi .....	122
Lampiran 2	Perhitungan Komposisi Campuran .....	123
Lampiran 3	Estimasi Ukuran Serbuk Aluminium .....	124
Lampiran 4	Estimasi Ukuran Serbuk Magnesium.....	125
Lampiran 5	Estimasi Ukuran Serbuk Grafit .....	126
Lampiran 6	Estimasi Ukuran Serbuk Tembaga .....	127
Lampiran 7	Fotografi Campuran Serbuk .....	128
Lampiran 8	Fotografi Sampel <i>Green Compact</i> dan <i>Sintered Compact</i>	129
Lampiran 9	Foto Indentasi Kekerasan.....	130
Lampiran 10	Estimasi Ukuran Butir Al dan Cu <i>Sintered Compact</i> .....	132
Lampiran 11	Metode Estimasi Ukuran Pori <i>Green Compact</i> .....	133
Lampiran 12	Metode Estimasi Ukuran Pori <i>Sintered Compact</i> .....	135
Lampiran 13	Resume Tabulasi Data Penelitian .....	137
Lampiran 14	Resume Tabulasi Data Uji Keausan.....	139
Lampiran 15	Daftar Mesin dan Perlengkapan Penelitian .....	140

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Perkembangan industri dunia saat ini semakin pesat. Kebutuhan akan material untuk berbagai tujuan semakin meningkat. Pengembangan material komposit berbasis logam sangat diminati karena sifatnya yang superior dan mudah direkayasa (Du et al., 2020). Berbagai rekayasa teknik dilakukan untuk mendapatkan material komposit dengan spesifikasi terbaik. Material yang ringan dengan sifat yang dioptimalkan menjadi impian pada berbagai bidang terapan, khususnya industri otomotif dan kedirgantaraan. Penggunaan material ringan dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan meningkatkan kinerja yang berdampak pada sistem yang ramah lingkungan (Gokce et al., 2011).

Bantalan luncur (*sliding bearing*) menjadi elemen penting dalam sistem mesin untuk mengoptimalkan kinerja elemen yang bergerak atau berputar (Pratt, 1973; Simmons et al., 2012). Salah satu produk bantalan dengan struktur material komposit sebagai penyusun utamanya adalah *bimetal bearing*. Struktur utama *bimetal bearing* tersusun dari komposit dan cangkang logam penguat. Komposisi dari komposit *bimetal bearing* merujuk pada SAE J460 mengizinkan penambahan unsur timbal (Pb) pada paduan atau komposit (SAE J460, 1991). Namun saat ini bahaya timbal menjadi isu kritis terkait kesehatan dan lingkungan. Berbagai upaya dan pembatasan dilakukan untuk mengurangi dampaknya. Pembatasan konsentrasi timbal tertuang dalam dokumen RoHS 3 tahun 2015, dengan maksimum konsentrasi timbal sebesar 0,1% berat (1000 ppm) dalam aplikasi perangkat elektronik (RoHS, 2015). Timbal memiliki sifat racun sehingga penanganan timbal juga menjadi perhatian serius pemerintah Indonesia, PP No 74 tahun 2001 tentang penanganan limbah B3 diterbitkan (PP No.74, 2001). Timbal dikategorikan limbah B3 dengan penggunaan terbatas

tertuang dalam SNI 7387 tahun 2009 mengatur batasan cemaran timbal dalam kelayakan produk pangan sekitar 0,25 mg/kg (SNI 7387, 2009). Beberapa studi dalam bidang lingkungan dan kesehatan telah melaporkan resiko dan dampak paparan timbal. Pada tahun 2018, Pokorska dkk melaporkan dalam studinya bahwa beberapa logam berat termasuk timbal (Pb) dapat diserap oleh tanaman konsumsi, akumulasi timbal yang diserap dapat berinteraksi negatif terhadap sel tubuh (Pokorska-Niewiada et al., 2018). Pada tahun 2020, Charkiewicz dkk melaporkan bahwa paparan timbal dapat terakumulasi dalam tubuh dan menimbulkan resiko penyakit dan gangguan sistem tubuh, hal ini karena timbal bersifat sulit diekskresikan oleh tubuh (Charkiewicz & Backstrand, 2020).

Penggunaan timbal pada aplikasi elemen mesin mendapat perhatian serius, sehingga beberapa tahun terakhir studi material alternatif bebas timbal banyak dilakukan. Sakai dkk berhasil mensintesis komposit bebas timbal (*lead free*) pada aplikasi bantalan bush untuk pin piston dengan komposit Cu<sub>6</sub>Sn<sub>3</sub>Ni<sub>1.5</sub>Mo<sub>2</sub>C sebagai pengganti Cu<sub>10</sub>Sn<sub>10</sub>Pb (SAE 792) dengan performa tinggi dan memenuhi standar kebutuhan pasar (Sakai et al., 2004). Saxton dkk berhasil memfabrikasi paduan bebas timbal untuk menggantikan CuSn<sub>10</sub>Pb<sub>10</sub>, komposit CuSn<sub>8</sub>Ni berhasil disintesis dan tersedia untuk menggantikan CuSn<sub>10</sub>Pb<sub>10</sub> pada kondisi pelumasan memadai (Saxton, 2006). Oksanen dkk, berhasil mensintesis paduan bismut dengan komposisi CuSn<sub>9</sub>Bi<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> sebagai alternatif pengganti CuSn<sub>10</sub>Pb<sub>10</sub> pada kondisi operasi pelumasan marjinal (Oksanen et al., 2017).

Pengembangan material alternatif untuk aplikasi elemen mesin khususnya komponen *bimetal bearing* bebas timbal perlu dilakukan untuk optimalisasi sistem dan mengurangi resiko paparan substansi berbahaya. Komposit aluminium dengan sifat yang dioptimalkan dapat memberikan alternatif solusi. Aluminium memiliki sifat yang ringan, tahan korosi, non-magnetik, konduktivitas termal yang baik, sifat mekanik yang rendah dapat ditingkatkan dengan paduan dengan keramik keras seperti SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, atau

unsur logam lainnya seperti zink, perak, tembaga, magnesium (Boland et al., 2013; Du et al., 2020; Kaku & Khanra, 2019). Pemrosesan dengan jalur metalurgi serbuk memberikan banyak keuntungan diantaranya energi proses yang rendah, produk mendekati bentuk akhir, tidak ada material yang terbuang selama proses, kecepatan produksi tinggi, lebih ekonomis, parameter mudah dikendalikan dengan jalur pemrosesan yang lebih sederhana (Gokce et al., 2011; Oh & Ahn, 2014).

Penelitian beberapa tahun terakhir melaporkan berbagai metode dan perlakuan untuk optimalisasi sifat komposit matrik aluminium melalui rute metalurgi serbuk. Gokce dkk melakukan studi pada paduan AlCu0.5Mg, pada konsentrasi magnesium lebih dari 0,15 % menyebabkan peningkatan ikatan antar partikel dan densifikasi setelah oksida pecah, diperoleh nilai kekerasan 60 HV setelah sintering pada suhu 590 °C selama 1,5 jam, selain itu penambahan magnesium menginduksi peningkatan kekuatan melalui *solid solution hardening* (Gokce et al., 2011). Xinyang dkk, dalam studinya perlakuan pre-sinter diberikan pada suhu 400 °C dan perlakuan sinterisasi suhu 620°C pada komposit Al-4,3Cu-1,2Mg, kondisi optimum dilaporkan pada *holding time* 120 menit dengan *relative density* maksimum 98.46% dan kekerasan maksimum 87,5 HBW (Du et al., 2020). Min dkk melaporkan dalam studi komposit Al-Cu dengan penambahan variasi Mg hingga 2,5%, dilaporkan bahwa penambahan konsentrasi Mg menghancurkan lapisan oksida selama sinterisasi dan meningkatkan *interfacial area* antara Al dan Cu yang berdampak pada peningkatan sifat mekanik, penambahan Mg juga dilaporkan mampu menurunkan suhu sinterisasi fase cair (Oh & Ahn, 2014). Boland dkk melaporkan dalam studi komposit matrik aluminium (Al2324-4,4Cu-1,5Mg), perlakuan pada tekanan kompaksi 400 MPa, suhu sinterisasi 600 °C selama 60 menit diperoleh kekerasan 87 HRE dengan densitas 97% (Boland et al., 2013). Khanra dkk dalam penelitiannya mensintesis komposit matrik aluminium (Al-4%Cu) dengan variasi Mg hingga 1%, sinterisasi pada suhu 550 °C selama 1 jam, hasil eksperimen menunjukkan peningkatan kekerasan sebanding dengan penambahan Mg,

diperoleh kekerasan maksimum 110 HV (Kaku & Khanra, 2019). Studi terkait optimalisasi ketahanan aus telah banyak dilaporkan dengan penambahan bahan yang memberikan efek *self-lubricating*. Akhlaghi dkk melaporkan dalam studi komposit Al<sub>2024</sub> dengan variasi 0 - 20% grafit yang diproses dengan metalurgi serbuk, penambahan 5% grafit memberikan sifat ketahanan aus yang superior pada kondisi *dry sliding*, mekanisme ketahanan aus dipicu oleh pembentukan lapisan tipis kaya grafit pada *mating surface*, selain itu penambahan konsentrasi 5% grafit menurunkan porositas (Akhlaghi & Zare-Bidaki, 2009). Komposit Mg-Grafit/MoS<sub>2</sub> juga telah diteliti oleh Narayan, dilaporkan bahwa kedua bahan pada komposisi 5%-10% berat komposit bertindak sebagai *self-lubricating* mampu menurunkan *wear loss* pada uji tribometrik (Narayanasamy & Selvakumar, 2017). Azzat dkk dalam studi komposit Mg dengan komposisi 3% - 10% grafit, melaporkan komposisi grafit yang optimal pada komposisi 5 % untuk laju keausan dan koefisien gesek terendah (Al-maamari et al., 2019). Dixit dkk juga mempelajari perilaku komposit tembaga pada kadar 0%-15% grafit, diperoleh peningkatan kekuatan tekan dan ketahanan defleksi yang optimal pada komposisi 5% grafit (Dixit & Srivastava, 2019).

Perkembangan teknologi proses yang ditunjang peralatan canggih mendorong perkembangan komposit lebih baik, ini memberikan ide untuk mengembangkan material alternatif pada aplikasi bantalan luncur jenis *bimetal bearing*. Pengembangan material ringan, bebas timbal (*lead free*) dan ekonomis dengan sifat yang dioptimalkan perlu dilakukan untuk mengatasi kelemahan yang ada. Penelitian ini fokus pada sintesis komposit matrik aluminium dan karakterisasi sifat komposit. Komposit diproduksi dari komposisi serbuk aluminium dan magnesium, variasi serbuk grafit dan tembaga ditambahkan untuk melihat perilaku komposit terhadap sifat fisis, mekanik dan struktur mikro. Matrik aluminium dipilih untuk mengoptimalkan sifat ringan dan tahan karat, sedangkan bahan magnesium dipilih karena dapat bertindak sebagai *wetting agent* yang mampu memecah lapisan oksida selama sinterisasi sehingga meningkatkan ikatan antar partikel.

Penguat berbahan tembaga dapat meningkatkan sifat kekerasan dan ketahanan aus yang baik, sedangkan penambahan grafit memungkinkan terjadinya efek *self-lubricating* yang juga mendukung ketahanan aus. Karakterisasi sifat fisis, sifat mekanik dan struktur mikro dilakukan untuk mengevaluasi sifat komposit sebagai material alternatif pada elemen mesin khususnya pada bantalan luncur (*bushing*).

## **1.2. Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah yang dalam penelitian ini yaitu;

1. Bagaimana pengaruh variasi komposisi grafit dan tembaga terhadap sifat fisis komposit matrik aluminium.
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi grafit dan tembaga terhadap sifat mekanik komposit matrik aluminium.
3. Bagaimana pengaruh variasi komposisi grafit dan tembaga terhadap struktur mikro komposit matrik aluminium.

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Tujuan umum dari penelitian ini yaitu menguasai teknik sintesis dan karakterisasi sifat komposit matrik aluminium dengan metode metalurgi serbuk. Adapun tujuan spesifik penelitian ini sebagai berikut:

1. Menganalisa pengaruh variasi komposisi grafit dan tembaga terhadap sifat fisis komposit matrik aluminium.
2. Menganalisa pengaruh variasi komposisi grafit dan tembaga terhadap sifat mekanik komposit matrik aluminium.
3. Menganalisa pengaruh variasi komposisi grafit dan tembaga terhadap struktur mikro komposit matrik aluminium.

## **1.4. Batasan Masalah**

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Rute proses dilakukan dengan teknik metalurgi serbuk (*powder metallurgy*)
2. Komposit disiapkan dari campuran serbuk aluminium dan serbuk magnesium (1,5 % volume) dengan variasi serbuk grafit (0, 1, 3 dan 5 % volume) dan serbuk tembaga (0, 4, 7 dan 10 % volume)

3. Padatan muda (*green compact*) dengan diameter 20 mm dihasilkan dari tekanan kompaksi sebesar 150 MPa setara 4,71 ton dengan metode *cold uniaxial pressing*.
4. Proses sinter dilakukan pada suhu 600 °C selama 1,5 jam
5. Karakterisasi sifat komposit meliputi pengujian sifat fisik, sifat mekanik dan struktur mikro.

#### **1.5. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi positif dalam lingkup peneliti, masyarakat dan industri. Manfaat penelitian yang diharapkan sebagai berikut:

- 1) Manfaat untuk peneliti yaitu dapat menjadi sumber literasi yang relevan dalam memahami perilaku komposit matrik aluminium yang disintesis melalui teknik metalurgi serbuk.
- 2) Manfaat untuk lingkungan dan kesehatan yaitu menawarkan solusi alternatif terkait penggunaan material bebas timbal (*lead free*) yang dapat memberikan kontribusi dalam mengatasi dampak polusi limbah logam berat dan mengurangi resiko paparan substansi berbahaya khususnya dampak timbal bagi manusia.
- 3) Manfaat untuk industri yaitu memberikan kontribusi dalam pengembangan produk yang ringan, aman dan ramah lingkungan dengan sifat yang optimal, khususnya pada aplikasi *bushing*

#### **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 tahapan dan prosedur pelaksanaan penelitian. BAB IV Hasil dan Pembahasan, berisi data, analisis dan pembahasannya. Bab V Kesimpulan berisi kesimpulan akhir berdasarkan hasil yang dicapai dalam penelitian ini.



## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Metalurgi Serbuk (*Powder Metallurgy*)**

Metalurgi serbuk atau *powder metallurgy* (P/M atau PM) merupakan istilah umum untuk proses yang meliputi seluruh teknik manufaktur guna menghasilkan produk berbasis logam padat dari serbuk atau partikel tanpa terjadi pelelehan pada komponen utamanya. Metalurgi serbuk dapat juga termasuk proses manufaktur serbuk non-logam menjadi produk yang menunjukkan sifat-sifat metalik (Sutanto, 2020). Prinsip dasar metalurgi serbuk dilakukan dengan memadatkan serbuk logam menjadi bentuk yang diinginkan dan kemudian memanaskannya dibawah temperatur leleh hingga membentuk bentuk yang rigid. Partikel-partikel logam memadu karena mekanisme transportasi massa akibat difusi atom antar permukaan partikel (Kalpakjian, 2010).

Metalurgi serbuk merupakan salah satu proses manufaktur yang memiliki keunggulan dalam hal kemampuan material serbuk atau partikel logam untuk dibentuk menjadi produk akhir. Metalurgi serbuk memberikan kehandalan nilai ekonomis dengan pertimbangan sifat material, elemen kimiawi, proses perlakuan panas dan struktur mikro. Berikut ini beberapa keunggulan dari proses metalurgi serbuk dibanding proses fabrikasi lainnya, antara lain:

1. Penentuan dan pengontrolan sifat produk terutama sifat mekanik dan sifat fisis lebih mudah dilakukan sesuai persyaratan material yang dipilih.
2. Produk yang dihasilkan dapat dibentuk dari berbagai kombinasi bahan baku seperti serbuk logam, non-logam, keramik atau material lainnya sesuai sifat produk yang diinginkan.

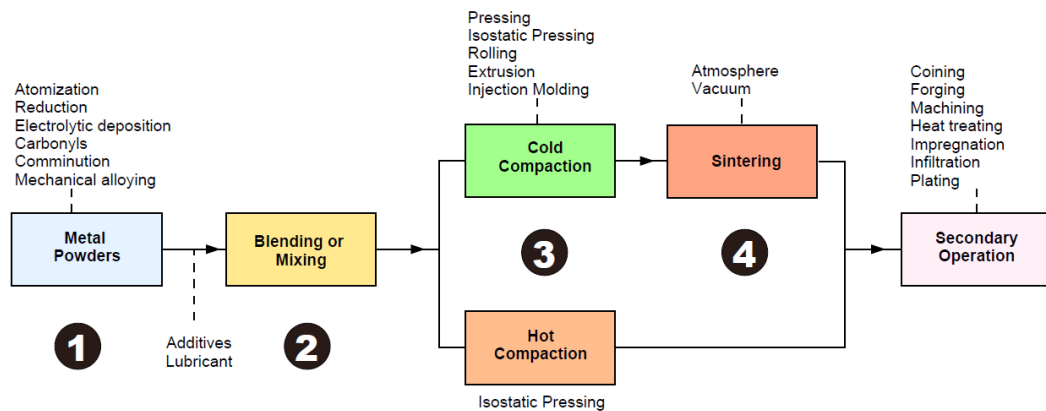
3. Selama proses menggunakan suhu yang rendah termasuk proses konsolidasi partikel dengan sinterisasi menggunakan suhu dibawah titik leleh sehingga energi pemrosesan relatif lebih rendah.
4. Alur pemrosesan yang relatif sederhana dengan kecepatan produksi produk yang tinggi pada skala produksi massal.
5. Sangat ekonomis dan ramah lingkungan karena tidak ada material atau limbah yang terbuang selama pemrosesan.

Selain keunggulan metalurgi serbuk terdapat keterbatasan dalam proses maupun produk yang dihasilkan antara lain:

1. Keterbatasan ukuran produk, luas atau panjang produk terbatas karena keterbatasan kemampuan mesin tekan dan proses pemanasan pada sinterisasi.
2. Porositas yang terbentuk menurunkan berat jenis produk dibanding kondisi pejalnya, namun jumlah porositas dapat mempengaruhi kekuatan produk.
3. Penyimpanan bahan baku serbuk perlu penanganan khusus, luas permukaan serbuk relatif tinggi sehingga rentan terjadinya oksidasi yang mempengaruhi kualitas serbuk.

Metode metalurgi serbuk memberikan kontrol yang teliti terhadap komposisi dan penggunaan campuran yang tidak dapat difabrikasi dengan proses lain dengan ukuran ditentukan oleh cetakan. Rute proses metalurgi serbuk ditampilkan pada gambar 2.1. Jalur pemrosesan dalam menghasilkan produk pada metalurgi serbuk secara umum meliputi;

1. Preparasi serbuk logam (*Metal Powder Preparation*)
2. Pencampuran (*Mixing*)
3. Pemadatan (*Compaction*)
4. Pemanasan atau sinterisasi (*Sintering*)



Gambar 2.1 Rute Proses Metalurgi Serbuk (Kalpakjian, 2010)

### 2.1.1 Preparasi Serbuk Logam (*Metal Powder Preparation*)

Preparasi atau persiapan material serbuk merupakan proses yang penting sebagai bagian tahapan proses metalurgi serbuk. Preparasi serbuk dan perlakuan sebagai bahan baku menjadi penting, sehingga memahami produksi serbuk dengan sifat serbuk yang dapat menjadi penentu sifat produk yang dihasilkan. Metode pembuatan dan sifat serbuk diuraikan berikut ini (Lie, 2018)

#### a) Metode Pembuatan Serbuk

Sifat-sifat dasar serbuk sangat dipengaruhi oleh metode pembuatan serbuk. Metode pembuatan serbuk umumnya mempengaruhi bentuk, grit serbuk, sifat kimia maupun distribusi ukuran partikel. Metode pembentukan serbuk meliputi metode fisik, kimia dan mekanik. Metode pembuatan atau produksi serbuk yang umum dilakukan sebagai berikut:

1. *Decomposition*, merupakan metode pembuatan serbuk dengan proses pemisahan atau penguraian elemen-elemen yang dilakukan pada suhu tinggi, proses ini melibatkan dua reaktan, yaitu senyawa logam dan agen pereduksi (*reducing agent*).
2. *Atomization of Liquid Metals*, metode pembuatan serbuk dengan material cair dituangkan atau dilewatkan pada mulut pipa kecil (*nozzle*) yang dialiri air bertekanan, sehingga terbentuk butiran kecil-kecil.

3. *Electrolytic Deposition*, merupakan pembuatan serbuk dengan cara proses elektrolisis, umumnya menghasilkan serbuk yang reaktif dan getas.
4. *Mechanical Processing of Solid Materials*, merupakan cara pembuatan serbuk dengan cara mekanikal, umumnya dilakukan dengan menghancurkan material dengan *ball milling*.

b) Sifat-sifat serbuk logam

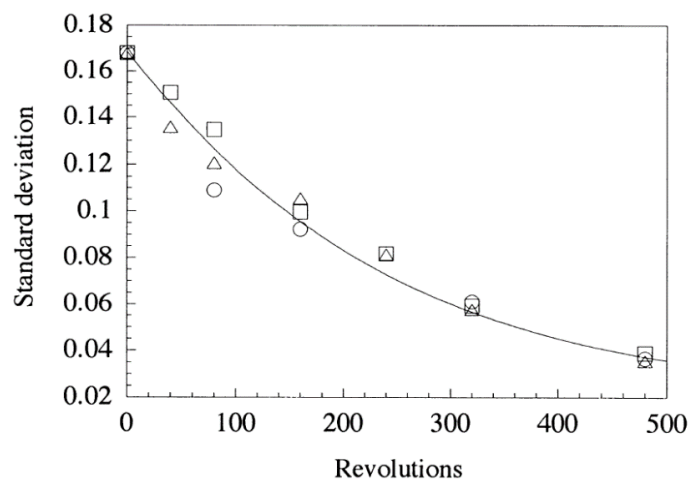
Serbuk logam menjadi bahan dasar (*raw material*) pembuatan komponen metalurgi serbuk. Sifat dari serbuk logam sangat mempengaruhi produk akhir pada metode metalurgi serbuk. Sifat-sifat serbuk dapat diuraikan sebagai berikut:

1. *Bentuk*, merupakan morfologi fisik partikel yang umumnya dipengaruhi oleh proses pembuatannya.
2. *Kehalusan*, merupakan tingkatan atau grit (*grade*) ukuran partikel, tingkatan kehalusan partikel dapat ditentukan melalui ayakan standar umumnya dinyatakan dalam satuan mesh.
3. *Distribusi ukuran partikel*, merupakan sebaran ukuran partikel ditentukan jumlah partikel dari setiap ukuran standar.
4. *Mampu alir*, merupakan karakteristik yang menggambarkan sifat alir serbuk dan kemampuan memenuhi ruang cetak, digambarkan sebagai laju alir melalui suatu celah tertentu.
5. *Sifat kimia*, merupakan sifat yang berkaitan dengan kemurnian serbuk, jumlah oksida yang diperbolehkan dan kadar elemen lainnya.
6. *Kompresibilitas*, merupakan perbandingan volume serbuk mula-mula dengan volume benda yang ditekan.
7. *Berat jenis serbuk*, merupakan berat jenis curah yang dinyatakan dalam kilogram per meter kubik
8. *Kemampuan sinter*, merupakan kemampuan proses pengikatan partikel melalui proses pemanasan

### 2.1.2 Pencampuran (*Mixing*)

Pencampuran (*mixing*) merupakan suatu proses penggabungan dua bahan berbeda atau lebih menjadi suatu campuran homogen yang bersifat seragam dan memiliki penyebaran yang sempurna. Prinsip pencampuran didasarkan pada peningkatan pengacakan dan distribusi dua atau lebih komponen yang mempunyai sifat yang berbeda. Pencampuran dapat dilakukan dengan proses pencampuran kering (*dry mixing*) dan pencampuran basah (*wet mixing*) (Juriani, 2019).

Pada metode pencampuran kering serbuk, tingkat homogenitas secara signifikan dipengaruhi lamanya waktu pencampuran. Tingkat laju putaran memiliki efek sedikit pada tingkat pencampuran tipe kerucut (*cone*), pada laju putaran 8, 16, 24 rpm tingkat homogenitas saling mendekati seiring jumlah rotasi atau waktu pencampuran (Brone & Muzzio, 2000)



Gambar 2.2 Pengaruh laju putaran pencampuran serbuk pada kapasitas pengisian 50% (Brone,2000)

Proses pencampuran dengan penambahan bahan pengikat (*binder*) mempengaruhi kualitas produk kompaksi (*green compact*). Pada produk kompaksi serbuk besi dan tembaga, komposisi optimum sebesar 5% *polivinyllacetate* menunjukkan kemampuan green compact terbaik untuk dilakukan proses pemotongan (*sawing*) dan pengeboran (*drilling*) (Yu, 2005)

Komposisi *paraffin wax* sebagai pengikat (*binder*) pada paduan tungsten sebesar 20% volume menunjukkan ikatan yang baik diikuti peningkatan sifat kekerasan mekanik, namun penyusutan (*shrinkage*) terjadi secara isotropik setelah sintering sebagai efek pelepasan pengikat (Suh et al., 2015)

### 2.1.3 Pemadatan (*Compaction*)

Pemadatan merupakan proses penerapan atau pemberian tekanan untuk pembentukan, deformasi dan densifikasi serbuk. Pada kondisi tertentu pemanasan dapat dilibatkan secara bersamaan dalam proses kompaksi (German, 2005)

Terdapat beberapa metode penekanan, diantaranya, penekanan dingin (*cold compaction*) dan penekanan panas (*hot compaction*)

- Cold compaction, yaitu perlakuan penekanan pada kondisi suhu ruang.
- Hot compaction, yaitu penekanan dengan temperatur di atas suhu ruang.

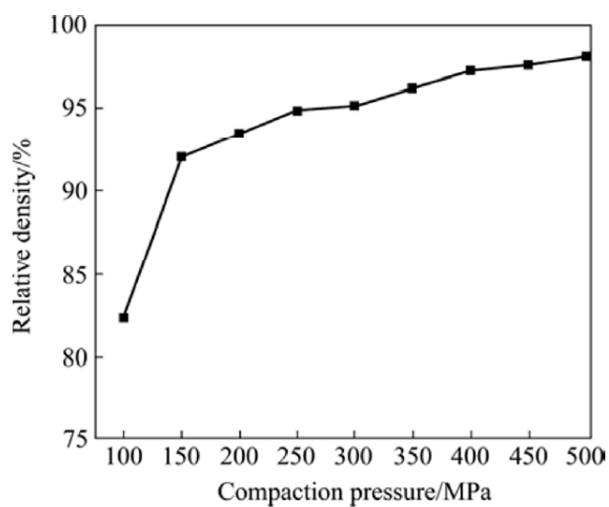
Tekanan kompaksi ditentukan oleh karakteristik, bentuk, metode pencampuran serbuk serta metode pelumasan yang digunakan. Tekanan pada proses pemadatan serbuk logam berkisar 70 MPa hingga 800 MPa, data tekanan kompaksi logam ditampilkan pada tabel 2.1 (Kalpakjian, 2010)

Tabel 2.1 Nilai tekanan kompaksi pada beberapa logam

<b>Metal Powder</b>	<b>Pressure (MPa)</b>
Aluminum	70-275
Brass	400-700
Bronze	200-275
Iron	350-800
Tantalum	70-140
Tungsten	70-140
<b>Other</b>	
Aluminum Oxide	110-140
Carbon	140-165
Cemented Carbides	140-400
Ferrites	110-165

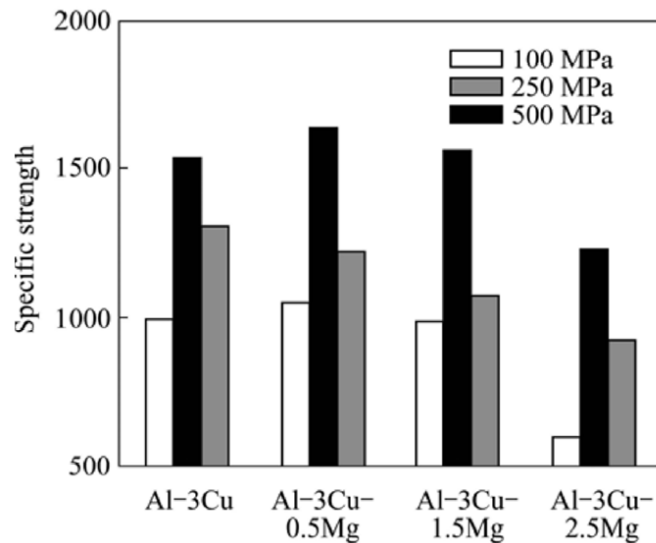
(sumber: Kalpakjian, 2010, data telah diolah)

Pada studi komposit matrik aluminium dilaporkan bahwa kepadatan relatif dibawah 94% pada tekanan kompaksi 100–200 MPa mewakili rentang tekanan untuk deformasi elastis (*elastic deformation*) serbuk, dan 94%–97% dalam 250–350 MPa mewakili rentang tekanan untuk deformasi plastis lokal (*local plastic deformation*). Dalam kisaran tekanan 400–500 MPa, serbuk mengalami deformasi plastis (*plastic deformation*), sesuai dengan densitas relatif diatas 97%, grafik ditampilkan pada gambar 2.3 (Oh & Ahn, 2014)



Gambar 2.3 Grafik fungsi tekanan kompaksi terhadap densitas *green compact* Al<sub>3</sub>Cu<sub>2.5</sub>Mg (Oh & Ahn, 2014)

Sampel dengan kepadatan tinggi dicapai dengan proses kompaksi. Ketika tekanan diterapkan kontak area antar partikel meningkat, partikel mengisi celah dan membentuk susunan koordinasi antar partikel. Selama kompaksi, deformasi elastis terjadi pada kontak, selanjutnya elastik energi disimpan dalam bentuk pemadatan. Ketika tekanan terus ditingkatkan, kepadatan akan meningkat mengakibatkan kontak deformasi plastis (Chaira, 2021). Perilaku pemadatan sangat bergantung pada tekanan kompaksi yang berkontribusi pada kekuatan spesifik. Peningkatan kekuatan spesifik komposit AlCuMg seiring besarnya tekanan pemadatan, ditampilkan pada gambar 2.4 (Oh & Ahn, 2014)



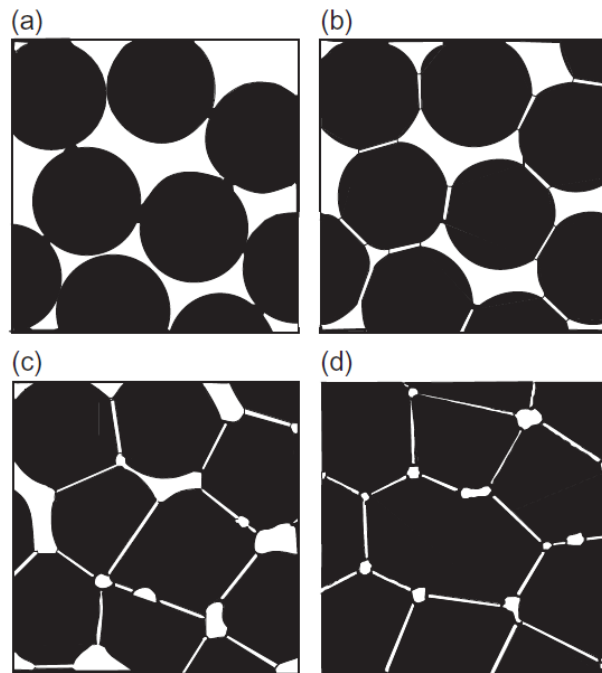
Gambar 2.4 Pengaruh tekanan pemadatan terhadap kekuatan spesifik komposit AlCuMg (Oh & Ahn, 2014)

#### 2.1.4 Proses Sinterisasi (*Sintering*)

Sinterisasi (*sintering*) adalah proses pemanasan sampai temperatur tinggi yang menyebabkan bersatunya partikel dan meningkatnya efektivitas reaksi tegangan permukaan. Temperatur sinterisasi umumnya berada pada 70% – 90% dari temperatur lebur serbuk utama. Proses ini mengakibatkan bersatunya partikel-partikel, sehingga menyebabkan kepadatannya bertambah (Kalpakjian, 2010).

Proses sinterisasi melibatkan suhu difusi partikel, selama proses ini terdapat beberapa tahapan yang dalam konsolidasi. Ada empat tahapan yang terjadi dalam sinterisasi, yaitu: titik kontak (*point contact*), tahap awal (*initial contact*), tahap menengah (*intermediate contact*) dan tahap akhir (Francis, 2016).





Gambar 2.5 Tahapan Proses sinter :a) *Point contact*, b) *Initial Stage*, c) *Intermediate Stage*, d) *Final Stage* (Francis, 2016)

### 1. Titik kontak (*point contact*)

Pada tahap ini partikel lepas mulai membentuk kontak titik untuk antar partikel lainnya pada orientasi acak. Ikatan yang terjadi masih lemah dan belum terjadi perubahan dimensi bakalan. Semakin tinggi kepadatan bakalan maka bidang kontak yang terjadi antar partikel juga semakin banyak sehingga ikatan yang terjadi dalam proses sinter pun semakin besar. Pengotor yang menempel pada batas kontak mengurangi jumlah bidang kontak sehingga kekuatan produk sinter juga dapat menurun.

### 2. Tahap awal (*initial stage*)

Pada tahap ini, daerah kontak antar partikel serbuk mulai tumbuh dalam bentuk leher. Pertumbuhan leher antar partikel ini sangat tergantung dengan mekanisme perpindahan massa. Tahap ini berakhir saat rasio ukuran leher  $X/D$  mencapai 0,3. Pada tahap ini pori-pori mulai terpisah karena titik kontak membentuk batas butir. Selain itu, pada tahap ini juga terjadi penyusutan (*shrinkage*), pengurangan luas permukaan dan pepadatan (*densification*).

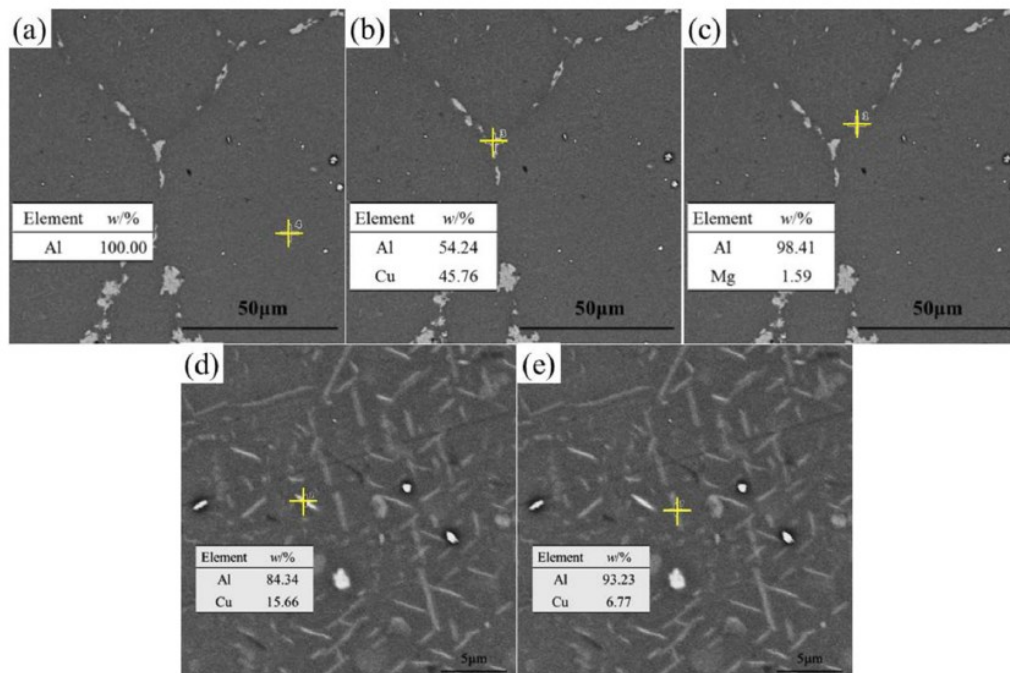
### 3. Tahap menengah (*intermediate stage*)

Tahap ini merupakan penentuan terhadap sifat mekanis bakalan sinter. Pada tahap ini terjadi pertumbuhan butir dan struktur pori menjadi halus. Geometri batas butir dan pori yang terjadi pada tahap ini tergantung pada laju sinter. Pada mulanya pori terletak pada bagian batas butir yang memberikan struktur pori. Sedangkan pepadatan (*densification*) yang terjadi pada tahap ini diikuti oleh difusi volum dan difusi batas butir. Semakin tinggi temperatur dan waktu tahan sinter serta semakin kecil partikel serbuk, maka ikatan dan densifikasi yang terjadi juga semakin tinggi.

### 4. Tahap akhir (*final stage*)

Pada tahap ini, prosesnya berjalan lambat. Pori-pori yang bulat menyusut dengan adanya mekanisme difusi *bulk*. Setelah batas butir meluncur, pori akan berdifusi ke batas butir hingga mengalami penyusutan, dimana proses ini berlangsung lambat. Dengan pemanasan yang lama, pengurangan ukuran pori akan menyebabkan ukuran pori rata-rata meningkat sedangkan jumlah pori akan berkurang. Jika pori memiliki gas yang terperangkap, maka kelarutan gas dalam matrik akan mempengaruhi laju pengurangan pori.

Sinterisasi melibatkan pemanasan dalam meningkatkan konsolidasi partikel, perlakuan sinterisasi pada komposit AlCuMg menunjukkan bahwa Cu berdifusi dari inti butir ke batas butir selama pemanasan, Cu menginisiasi sifat keras dan rapuh pada batas butir (Du et al., 2020). Gambar 2.6 menunjukkan hasil SEM-EDS komposit AlCuMg yang disinter pada suhu 620°C selama 60 menit.



Gambar 2.6 Hasil SEM-EDS komposit AlCuMg yang disinter pada suhu 620°C selama 60 menit: (a), (b) dan (c) pada batas butir, (d) dan (e) pada butir (Du et al., 2020).

## 2.2. Komposit Matrik Aluminium

Material komposit merupakan kombinasi dua atau lebih material yang berbeda, dengan syarat adanya ikatan permukaan antara kedua material tersebut. Komposit tidak hanya digunakan untuk sifat struktural tapi dapat juga dimanfaatkan untuk berbagai sifat yang lainnya seperti sifat hantar listrik dan panas atau pemanfaatan material yang ramah lingkungan dan kesehatan (*green composite*) (Lie, 2018).

Komposit dapat diklasifikasikan berdasarkan penguatnya antara lain komposit berpenguat serat, struktural dan partikulat. Komposit metalurgi serbuk 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, tembaga dan grafit.

### 2.2.1 Aluminium (*Aluminum*)

Aluminium merupakan material mineral yang melimpah di permukaan bumi yaitu sekitar 7,6%. Aluminium merupakan unsur ketiga terbanyak setelah oksigen dan silikon. Aluminium mempunyai sifat mekanik, ketahanan korosi dan hantaran listrik yang baik. Logam ini dipergunakan secara luas bukan saja untuk peralatan rumah tangga, tetapi dapat dipakai untuk material pesawat terbang, otomotif, kapal laut, konstruksi dan lainnya

<b>13</b>	<b>3</b>	<b>26.9815</b>
<b>2450</b>		<b>Al</b>
<b>660</b>		
<b>2.70</b>		
	<b>[Ne] 3s<sup>2</sup> 3p<sup>1</sup></b>	
	<b>Aluminum</b>	

Gambar 2.7 Simbol periodik unsur aluminium (sumber: rsc.org)

Dalam proses fabrikasi komposit matrik logam, matrik yang paling banyak digunakan adalah logam aluminium karena logam ini mempunyai banyak kelebihan antara lain memiliki densitas yang rendah, tahan terhadap korosi, memiliki sifat hantar panas, dan sifat hantar listrik yang baik. Logam aluminium yang biasa digunakan sebagai matrik adalah paduan Al-Si, Al-Cu, dan sebagainya. Komposit matrik aluminium biasanya menggunakan penguat keramik seperti Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC atau penguat lainnya

Logam aluminium dengan nomor atom 13 tergolong logam yang ringan dan memiliki massa jenis 2,70 g/cm<sup>3</sup> (lihat gambar 2.7). Struktur kristal aluminium murni adalah *FCC (Face Centered Cubic)*, dengan jari-jari atom 0,134 nm dan mempunyai *yield strength* sebesar 60 x 10<sup>3</sup> psi. Di udara terbuka, aluminium bereaksi dengan oksigen membentuk lapisan tipis Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

yang melindungi dari korosi. Sifat fisis yang dimiliki aluminium antara lain (Mufidah, 2015):

- a) Ringan, logam aluminium memiliki bobot sekitar 1/3 dari bobot baja atau tembaga sehingga logam aluminium banyak digunakan didalam industri alat transportasi.
- b) Mudah dibentuk, proses pengerjaan aluminium mudah dibentuk pada berbagai metode pembentukan dan penyambungan
- c) Mampu daur (*Recyclability*) aluminium merupakan bahan yang dapat didaur ulang tanpa penurunan dari kualitas awalnya, selanjutnya peleburan memerlukan energi hanya sekitar 5% dari energi yang diperlukan untuk memproduksi logam utama.
- d) Sifat ulet (*Ductility*) didefinisikan sebagai sifat mekanis dari suatu bahan seberapa jauh bahan dapat diubah bentuknya secara plastis tanpa terjadinya retakan.
- e) *Reflectivity* (mampu pantul) aluminium adalah reflektor yang baik dari cahaya serta panas dan dengan bobot yang ringan
- f) Tahan terhadap korosi, aluminium memiliki sifat *durable* terhadap korosi sehingga baik dipakai untuk lingkungan yang dipengaruhi oleh air, udara, suhu dan unsur-unsur kimia
- g) Daya hantar, aluminium memiliki daya hantar listrik dan panas yang baik

Karakteristik dari logam aluminium ditampilkan pada tabel 2.2

Tabel 2.2 Karakteristik Aluminium

Sifat-Sifat	Nilai
Struktur kristal	FCC
Densitas pada 20 °C (g/cm <sup>3</sup> )	2,70
Titik cair (°C)	660
Koefisien mulur panas kawat 20°-100°C (10 <sup>-6</sup> /K)	23,9
Konduktivitas panas 20°-400°C (W/m.K)	238
Tahanan listrik 20 °C (10 <sup>-6</sup> , KΩ.m)	2,69
Modulus elastisitas (GPa)	70,5
Modulus kekakuan (GPa)	26,0

(Sumber: Callister, 2007, Data telah diolah)

## 2.2.2 Tembaga (Copper)

29	2,1	65.37
2595		
1083		
8.96		
<b>Cu</b>		
[Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>		
Copper		

Gambar 2.8 Simbol Periodik Unsur Tembaga (sumber: rsc.org)

Tembaga (Cu) adalah logam dengan nomor atom 29 pada tabel periodik (lihat gambar 2.8), massa atom 65,37, titik lebur 1083 °C, titik didih 2.595 °C. Tembaga merupakan logam transisi (golongan IB) yang berwarna kemerahan, mudah regang, dan mudah ditempa. Tembaga banyak digunakan sebagai material penghantar listrik karena memiliki sifat konduktor listrik yang baik dan tahan terhadap korosi. Tembaga memiliki konduktivitas listrik dan dan panas yang sangat baik. Selain itu, tembaga juga dapat dijadikan penguat komposit dengan meningkatkan kekuatan mekanik khususnya kekerasan dari komposit (Wijayanti, 2012). Karakteristik tembaga ditampilkan pada tabel 2.3

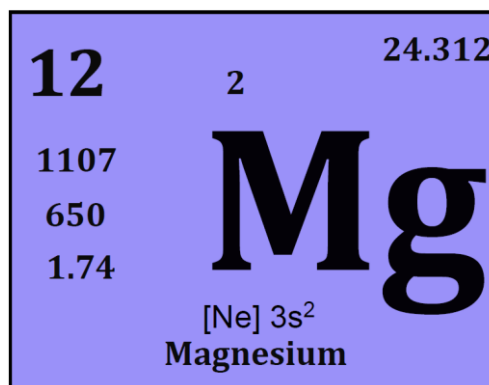
Tabel 2.3 Karakteristik Tembaga

Sifat-Sifat	Nilai
Struktur Kristal	FCC
Densitas pada 20 °C (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	8,95
Titik Cair (°C)	1084,62
Koefisien mulur panas kawat 20°-100°C (10 <sup>-6</sup> /K)	17,1
Konduktivitas Panas 20°-400°C (W/m.K)	893
Tahanan Listrik 20 °C (10 <sup>-6</sup> , KΩ.m)	1,673
Modulus Elastisitas (GPa)	128
Modulus Kekakuan (GPa)	46,8

(Sumber: Callister, 2007, Data telah diolah)

### 2.2.3 Magnesium (*Magnesium*)

Magnesium adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang Mg dan nomor atom 12 (lihat gambar 2.9), berupa padatan abu-abu mengkilap yang memiliki kemiripan fisik dengan lima unsur lainnya pada golongan 2 atau logam alkali tanah pada tabel periodik. Magnesium adalah logam cukup melimpah yang ditemukan sekitar 2,1% dari kerak bumi. Ini terjadi terutama sebagai batuan sedimen seperti dolomit dan bentuk evaporasi lainnya seperti karnalit. Sejumlah besar magnesium (0,13%) ditemukan di air laut. Mayoritas pasokan logam magnesium saat ini berasal dari air laut, selain itu sejumlah besar logam ini juga ditemukan di dalam mantel bumi (olivin).



12	2	24.312
1107	<b>Mg</b>	
650		
1.74		
	[Ne] 3s <sup>2</sup>	
	<b>Magnesium</b>	

Gambar 2.9 Simbol Periodik Unsur Magnesium (sumber: rsc.org)

Proses produksi magnesium dihasilkan dari proses elektrolisis atau reduksi silikotermik. Dalam metode elektrolisis, campuran anhidrat leburan dielektrolisis pada 750°C menggunakan katoda besi dan anoda grafit dalam atmosfer inert. Dalam proses silikotermik atau proses Pidgeon, magnesium oksida atau dolomit terkalsinasi dipanaskan dengan *ferrosilicon* pada suhu sekitar 1150°C dalam reaktor baja paduan. Sebuah vakum tinggi dipertahankan untuk menyaring Mg yang dibentuk oleh proses produksi.

Magnesium adalah logam ketiga yang paling umum digunakan setelah besi dan aluminium. Paduan magnesium banyak digunakan untuk konstruksi ringan seperti suku cadang mobil dan pesawat terbang. Paduan

biasanya dibuat dengan 2%-9% aluminium, 1%-3% seng, dan 0,1%-1% mangan. Lebih dari tiga juta ton logam magnesium diproduksi setiap tahun di seluruh dunia untuk pembuatan berbagai jenis bahan struktural. Beberapa kegunaan dari logam magnesium antara lain:

- 1) Magnesium digunakan sebagai zat pereduksi, misalnya untuk mereduksi bahan radiasi  $UF_4$  dalam reaktor baja berlapis grafit untuk menghasilkan logam uranium.
- 2) Magnesium merupakan mineral penting yang mengontrol ratusan reaksi biologis untuk kesehatan hidup kita.
- 3) Magnesium memiliki kepadatan rendah dan sifat mekanik dan listrik yang baik, magnesium digunakan untuk produksi komponen elektronik seperti ponsel, komputer, tablet, kamera, dan komponen elektronik lainnya.

Magnesium merupakan logam penting dalam kehidupan manusia, pemanfaatan bahan ini untuk berbagai tujuan tidak lepas dari sifat-sifat yang dimiliki oleh magnesium. Sifat-sifat magnesium ditampilkan tabel 2.4

Tabel 2.4 Karakteristik magnesium

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

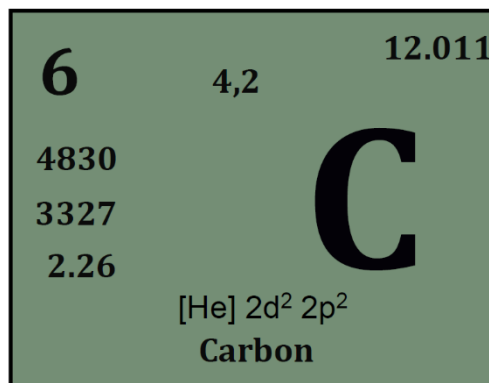
(Sumber: Callister, 2007, Data telah diolah)

Paduan magnesium dalam komposit dapat bertindak sebagai agen pembasah (*wetting agent*) dan meningkatkan ikatan antar partikel selama sinterisasi. Sebuah fase spinel pada komposit AlCuMg yang diamati pada batas butir paduan, magnesium menunjukkan dapat menghancurkan lapisan oksida selama sinterisasi fase cair (*liquid phase sintering*) pada suhu 620 °C (Du,2020)



#### 2.2.4 Grafit (*Graphite*)

Grafit merupakan element dengan komposisi karbon dengan nomor atom 6 (lihat gambar 2.10). Material ini memiliki banyak karakteristik unik. Grafit memiliki sistem kristal heksagonal, tampak sebagai massa berfoliasi atau lembaran-lembaran tipis yang terlepas, struktur opak yang umumnya berwarna hitam. Grafit merupakan dimorphisme dari intan, tetapi mempunyai tingkat kekerasan sangat rendah. Grafit memiliki berat jenis 2,26 g/cm<sup>3</sup> dan apabila diraba terasa berminyak. Bahan ini sangat tahan terhadap panas dan tidak mudah larut dalam air.



6	4,2	12.011
4830		C
3327		
2.26		
	[He] 2d <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>	
	Carbon	

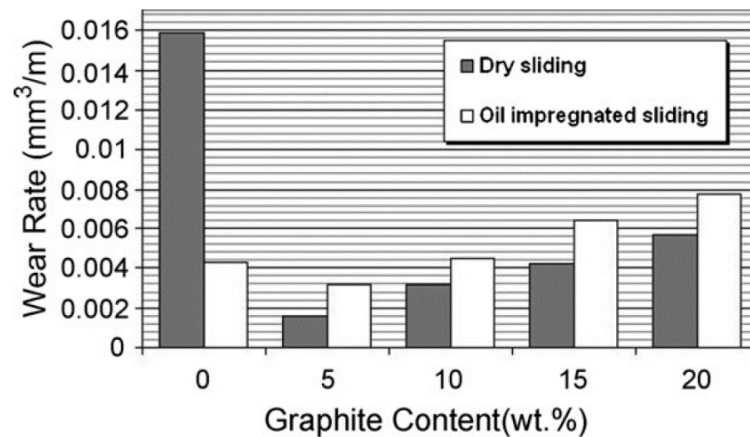
Gambar 2.10 Simbol Periodik Unsur Karbon (sumber: rsc.org)

Grafit juga merupakan satu satunya mineral bukan logam yang mampu menghantar listrik. Sifat-sifat unik yang dimiliki grafit membuat mineral tersebut memiliki banyak kegunaan. Kegunaan grafit antara lain, sebagai bahan baku untuk baterai kering, bahan pelumas (*lubricant*), cat, bahan pembuatan *crucibles* (tungku pencair logam), sikat dinamo, elektroda untuk proses galvanisasi, bahan pembuatan sepatu rem kendaraan, dipakai dalam industri peleburan baja (*foundry*) dan juga sebagai bahan utama pensil (ESDM, 2021)

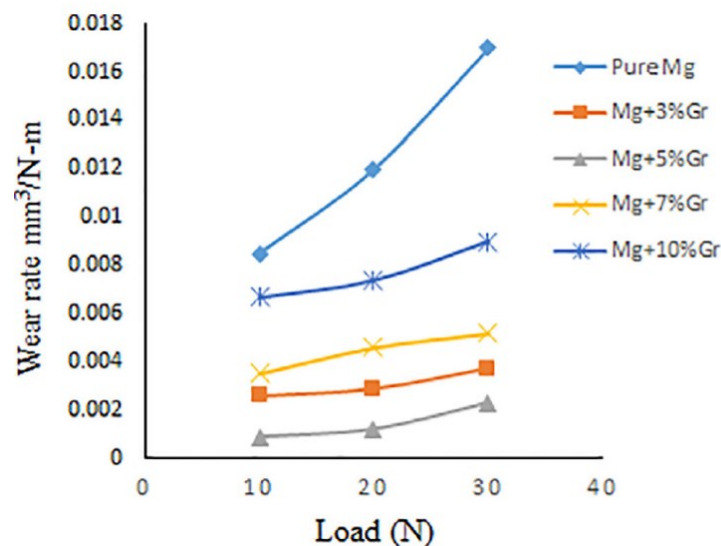
Komposit yang diproduksi dengan kandungan grafit pada paduannya memberikan ketahanan aus yang baik karena grafit memiliki sifat swapelumasan (*self-lubricating*). Komposit aluminium-grafit dengan kandungan 5-20% grafit diproduksi dengan metalurgi serbuk memberikan ketahanan

aus yang lebih baik daripada tanpa grafit, dimana kondisi optimal pada 5% grafit pada komposit (Akhlaghi & Zare-Bidaki, 2009)

Kandungan grafit yang lebih besar dapat menurunkan porositas, namun meningkatkan densitas dan ketahanan aus pada komposit magnesium grafit, kondisi optimal diperoleh pada kandungan 5% grafit pada komposit (Al-maamari et al., 2019)



Gambar 2.11 Grafik laju keausan komposit Al2024-Grafit pada variasi kandungan grafit (Akhlaghi, 2009)



Gambar 2.12 Grafik pengaruh beban terhadap laju keausan komposit magnesium grafit (Al-maamari, 2019)

### 2.3. Perkembangan Komposit Metalurgi Serbuk

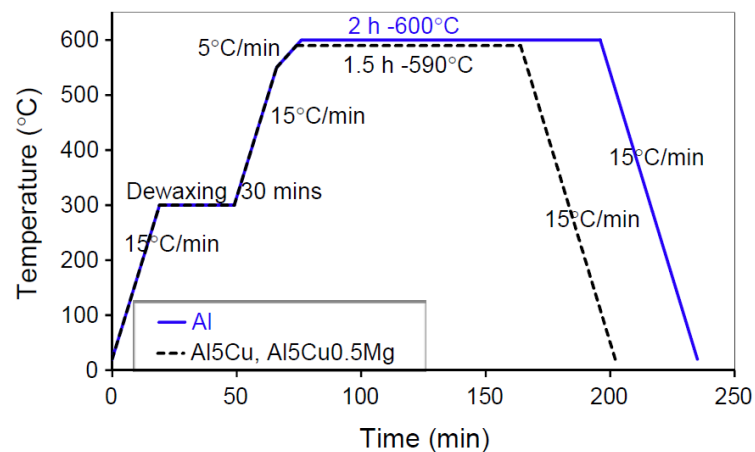
Perkembangan komposit metalurgi serbuk sangat pesat saat ini, hal ini terlihat banyaknya industri yang memproduksi suku cadang dengan metode ini. Teknologi metalurgi serbuk banyak berperan dalam pembuatan komponen pada industri otomotif dengan produk seperti roda gigi, *sprocket*, *camshaft bearing*, *bushing* dan *synchronize hub*, selain itu metalurgi serbuk juga banyak berkembang pada pembuatan perangkat keras, pahat, peralatan pertanian, komponen elektronik, peralatan olahraga dan militer. Teknologi metalurgi serbuk banyak diterapkan karena memiliki keunggulan tersendiri dibandingkan metode fabrikasi lainnya seperti pengecoran, pembentukan atau pemesinan yaitu penentuan sifat-sifat material terutama sifat mekanik dan sifat fisis lebih mudah dikendalikan sesuai dengan kriteria dan persyaratan material yang dipilih. Seiring dengan populernya teknologi metalurgi serbuk untuk memproduksi komponen. Kondisi ini juga mendorong penelitian atau studi terkait metalurgi serbuk terus berkembang, selain itu teknologi proses yang berkembang mendorong pengembangan komposit metalurgi serbuk untuk lebih baik.

Peningkatan kekuatan komposit aluminium diperoleh dari proses metalurgi serbuk. Komposit Al<sub>5</sub>Cu<sub>0,5</sub>Mg memberikan peningkatan nilai kekuatan putus transversal meningkat lima kali dari 84 MPa menjadi 466 MPa setelah sinterisasi pada suhu 600°C selama 2 jam (Gokce, 2011).

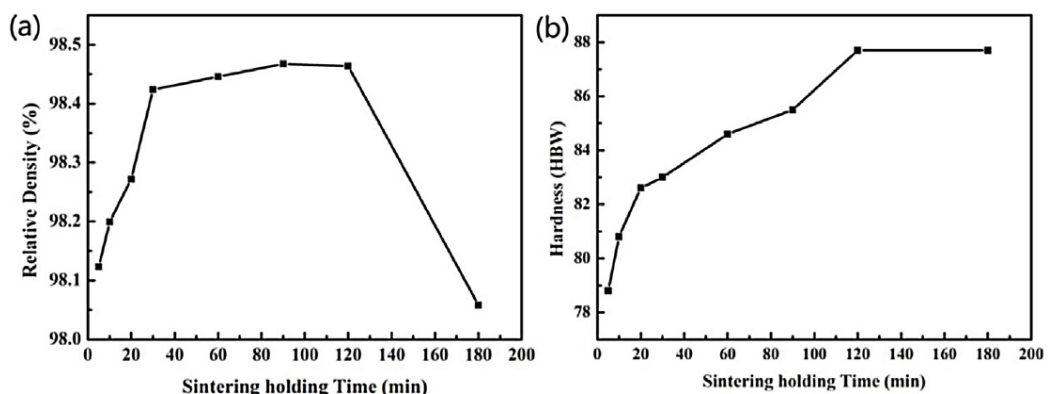
Dalam studi sebelumnya sifat komposit AlCuMg dipengaruhi oleh kandungan magnesium, nilai *transverse rupture strength (TRS)* menurun pada kandungan magnesium yang lebih besar (Al-3Cu-2,5Mg) namun nilai TRS lebih tinggi daripada tanpa magnesium pada komposit, perlakuan sinterisasi pada suhu 600°C *holding time* 2 jam pada komposit AlCuMg memberikan nilai *TRS (transverse rupture strength)* sebesar 466 MPa dan kekerasan maksimum 60 HV<sub>25</sub> (Oh & Ahn, 2014).

Komposit AlCuMg diproduksi dengan metalurgi serbuk dengan sinterisasi suhu tetap pada 620 °C dengan variasi waktu tahan 30-180 menit, terjadi pengurangan pori-pori dan densifikasi paduan pada waktu

sinterisasi selama 30 menit, ditemukan mekanisme pertumbuhan butir pada waktu tahan selama 30-120 menit, sedangkan penahanan waktu selama 180 menit terjadi peningkatan pori-pori mikro dan penurunan densitas, sifat mekanik optimal pada waktu sinterisasi suhu tetap pada 120 menit, waktu penahanan selama 2 jam pada komposit AlCuMg juga dilaporkan memberikan efek densitas 98.46% dan kekerasan maksimum sebesar 87,7 HBW (Du et al., 2020)



Gambar 2.13 Siklus sinterisasi komposit Al5Cu0.5Mg (Oh & Ahn, 2014)



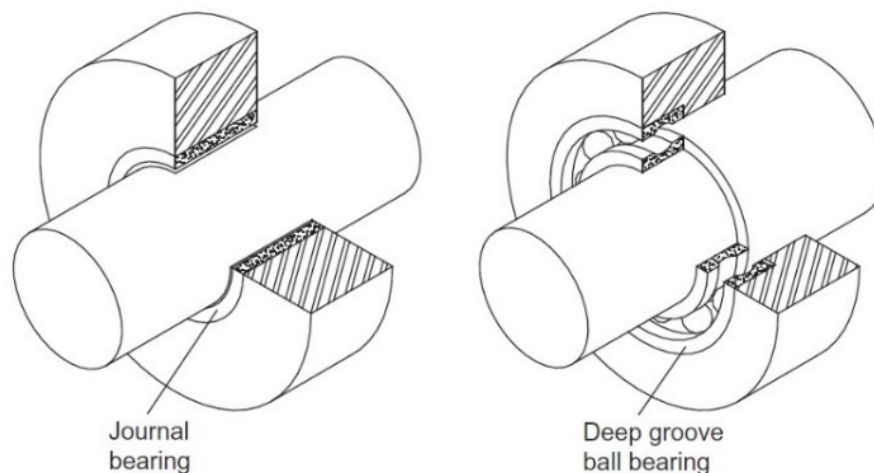
Gambar 2.14 Grafik fungsi *holding time* sinterisasi pada 620°C terhadap densitas (a) dan kekerasan (b) komposit Al Cu (4,3 %wt) Mg(1.2%wt) (Du et al., 2020)

## 2.4. Aplikasi Komposit pada Bantalan

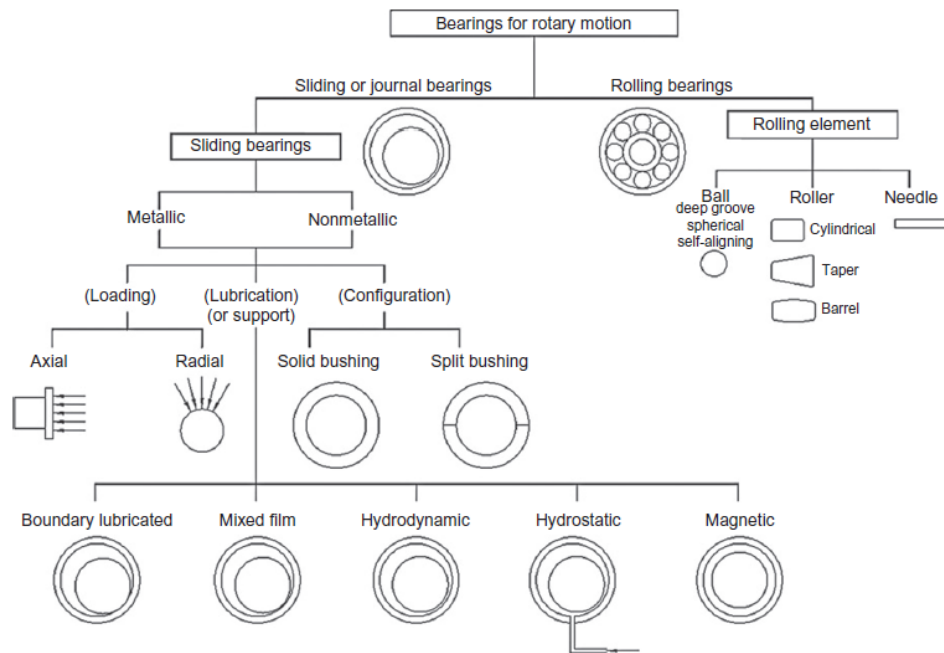
### 2.4.1 Klasifikasi Bantalan

Bantalan bertujuan untuk menahan beban dan mengurangi gesekan antar permukaan yang bergerak dan umumnya diterapkan pada poros, sehingga memungkinkan gerakan relatif antara dua elemen mesin. Bantalan dibagi menjadi dua kelas umum yaitu bantalan luncur (*sliding bearing*) dan bantalan elemen gelinding (*rolling bearing*). Bantalan dapat berputar atau meluncur atau melakukan keduanya secara bersamaan (Childs, 2019).

Pelumasannya sering diperlukan dalam bantalan untuk mengurangi gesekan antara permukaan dan untuk menghilangkan panas. Gambar 2.15 mengilustrasikan dua bantalan umum yaitu bantalan luncur dan bantalan gelinding. Lingkup penggunaan bantalan dalam dunia keteknikan sangat luas, sehingga memungkinkan memilih bantalan yang optimal pada kondisi yang berbeda. Skema klasifikasi umum untuk berbagai jenis bantalan ditampilkan pada Gambar 2.16



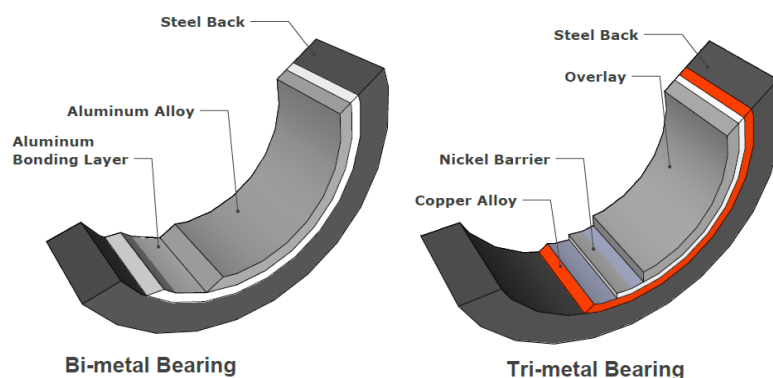
Gambar 2.15 Aplikasi bantalan luncur dan gelinding pada poros (Childs, 2019)



Gambar 2.16 Klasifikasi bantalan (Childs, 2019)

### 2.4.2 Bantalan Luncur Struktur Berlapis

Beberapa jenis bantalan luncur memiliki struktur berlapis untuk memberikan kombinasi optimal dari sifat bantalan seperti ketahanan lelah, ketahanan aus, kompaktilitas, ketahanan korosi dan sifat *embeddability*. Menurut jumlah lapisan bantalan fungsional utama, bantalan dapat berupa mono-logam (padat), bilogam, trilogam atau multi-lapisan. Sebagian besar bantalan mesin adalah *bi-metal* atau *tri-metal* (Kopeliovich, 2020). Struktur bantalan berlapis ditampilkan pada gambar 2.17



Gambar 2.17 Struktur bantalan mesin berlapis (www.substech.com)

Struktur lapisan pada bantalan mesin menurut Dmitri Kopeliovich sebagai berikut (Kopeliovich, 2020):

1. Lapisan cangkang baja (*Steel backing*) berfungsi untuk menopang struktur bantalan, memberikan kekakuan dan kesesuaian bentuk pada kondisi ekstrem akibat peningkatan suhu dan siklus beban. Standarisasi SAE 1008, SAE 1010 dan SAE 1020 digunakan untuk struktur baja bagian belakang bantalan mesin.
2. Lapisan perantara (*intermediate layer*) dikenal pada bantalan *tri-metal* atau multi-lapisan (*multi layer bearing*), merupakan lapisan yang terletak di antara bagian belakang baja dan lapisan atas. Lapisan ini terbuat dari bahan dengan sifat anti-gesekan sedang atau rendah tetapi memiliki kekuatan lelah yang tinggi memberikan daya tahan bantalan yang bekerja di bawah beban bolak-balik, selain itu lapisan ini penting untuk mengantisipasi kondisi kekurangan pelumas, kondisi *misalignment* dan defleksi poros. Lapisan perantara dibuat terutama dari paduan tembaga seperti CuSnPb, CuAl, CuBiSn. Bahan perantara berbasis tembaga, CuSnNi, CuZn diproses pengecoran atau *sintering*.
3. Lapisan penutup (*overlay layer*) merupakan lapisan tipis yang terbuat dari bahan lunak yang memiliki sifat anti gesekan yang sangat baik. Pelapisan diterapkan pada permukaan lapisan tengah bantalan setelah operasi pemesinan akhir. Sifat-sifat dari lapisan *overlay* menjadi sangat penting terutama dalam kondisi pelumasan terbatas pada kecepatan putaran mesin yang rendah.
4. Lapisan pengikat (*bonding layer*) digunakan meningkatkan ikatan antara lapisan secara adhesi yang baik antara cangkang baja dan paduan aluminium-timah. Kehadiran partikel timah pada permukaan paduan aluminium-timah yang terikat pada strip baja dapat melemahkan kekuatan adhesi antara bahan. Lapisan ikatan aluminium murni antara paduan AlSn dan baja memungkinkan untuk mencapai daya rekat yang lebih baik.

### 2.4.3 Produk *Bimetal Bearing* di Industri

Bantalan lapisan ganda (*bimetal bearing*) merupakan bantalan dengan dua lapisan struktur utama, yang terdiri dari cangkang baja (*steel backing*) dan lapisan komposit atau paduan (*alloy/composite*). Perlakuan tambahan seperti pelapisan anti korosi diperlukan untuk mendukung pada kondisi tertentu.

Keunggulan dari komposit *bimetal bearing* menurut *DE Bearings* dan *Jiashan Bearing Industri* sebagai berikut:

1. Sifat dapat dengan mudah dioptimalkan dan direkayasa pada aplikasi tertentu
2. Komponen berbasis bebas perawatan (*maintenance free*)
3. Lebih ringan daripada bantalan konvensional
4. Memiliki ketahanan korosi yang baik
5. Pada bantalan komposit *sintered* memiliki pori yang memungkinkan menyerap dan menyimpan pelumas
6. Harga produk lebih ekonomis dan tersedia dalam berbagai pilihan produk

Aplikasi dari komponen *bimetal bearing* menjadi sangat luas dan beragam. Produk *bimetal bearing* banyak tersedia dipasaran untuk berbagai bidang aplikasi. Beberapa produsen bantalan ini seperti Jiashan Bearing, Co. Ltd, GG Bearing, CSB-Bearing telah memproduksi berbagai produk *bimetal bearing*. Jenis bantalan *bimetal* yang banyak diproduksi yaitu jenis bantalan bushing dan bantalan pelat.

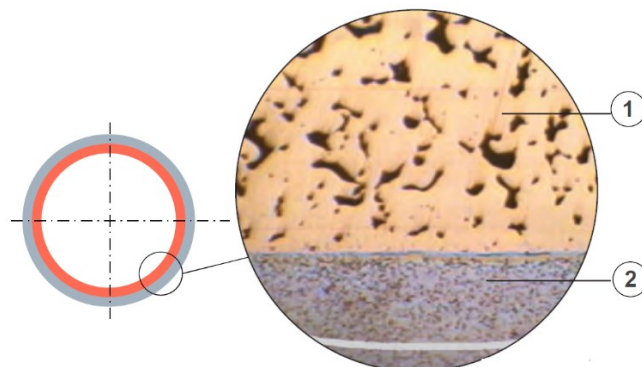
#### a. Bantalan *Bimetal* jenis bush (*Bimetal Bushing*)

Bentuk bantalan berbentuk silindris tersedia dengan berbagai ukuran tertentu. Produk *bimetal bushing* yang banyak tersedia dipasaran ditampilkan pada gambar 2.18 dan pada gambar 2.19 memperlihatkan struktur dari sebuah *bimetal bushing*.





Gambar 2.18 Produk *Bimetal Bearing* jenis bushing (Sumber: [www.csb-bearings.fr](http://www.csb-bearings.fr))



Gambar 2.19 Struktur utama *Bimetal-bushing* (Sumber: [www.csb-bearings.fr](http://www.csb-bearings.fr))

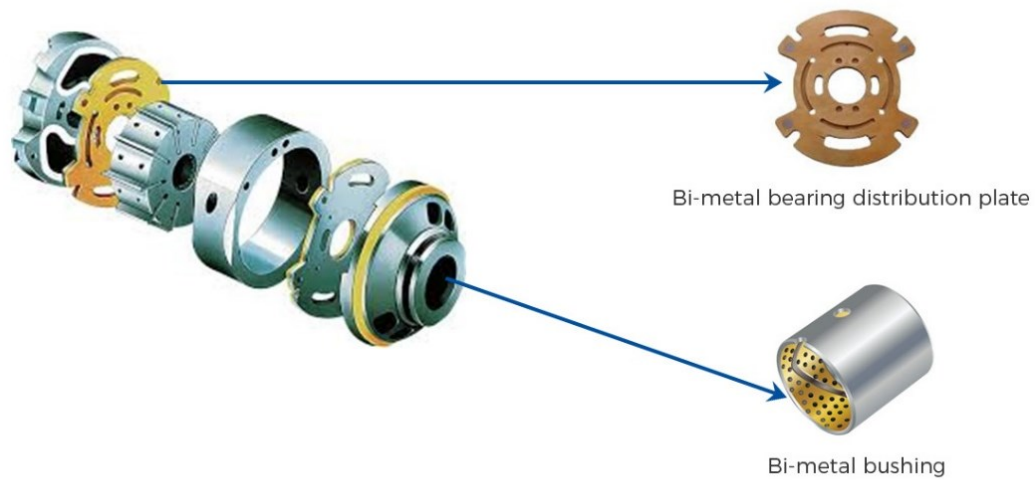
#### Fungsi lapisan pada *bimetal bushing*

1. Lapisan komposit (*Sintered alloy*), memiliki sifat dengan ketahanan aus dan daya dukung beban yang sangat baik.
2. Cangkang baja (*Steel backing*), memberikan daya dukung beban dan transfer panas yang sangat baik. Perlakuan *copper coating* dilakukan untuk meningkatkan ketahanan korosi.

Aplikasi komposit *bimetal bushing* populer pada berbagai bidang terapan. Cangkang baja dengan lapisan timah perunggu didukung pelumasan oli mendukung kinerja tinggi. Bahan ini memiliki kapasitas beban dan sifat kelelahan yang baik. Komponen ini banyak digunakan dalam aplikasi otomotif seperti kompresor, perangkat kemudi, *power steering*, bantalan pedal, bantalan poros bak truk, peralatan mekanis dan pengangkat, motor hidrolik, mesin pertanian. Gambar 2.20 dan Gambar 2.21 menampilkan aplikasi *bimetal bushing* pada bidang otomotif (alat berat) dan pompa bilah (*vane pump*). Spesifikasi teknis salah satu *bimetal bushing* jenis CSB-800 ditampilkan pada tabel 2.5



Gambar 2.20 Aplikasi *Bimetal Bearing* DYB-300 untuk alat berat (Sumber: Jiashan DI Bearing Co. Ltd.)



Gambar 2.21 Aplikasi *bimetal bushing* pada *vane pump* (Sumber: [csb-bearing.com](http://csb-bearing.com))

Tabel 2.5 Spesifikasi teknis *bimetal bushing* jenis CSB-800

CSB-800 Tech. Data				
Max. load	Static	250N/mm <sup>2</sup>	Alloy hardness	HB 70~100
	Dynamic	140N/mm <sup>2</sup>		Temp.
Max. speed (Lubricated)		2m/s	Friction coefficient	0.05~0.20
Max. PV		2.8N/mm <sup>2</sup> *m/s	Thermal conductivity	60W(m*k) <sup>-1</sup>
Breaking Load		350N/mm <sup>2</sup>	Coef. of thermal expansion	14*10 <sup>-6</sup> *K <sup>-1</sup>

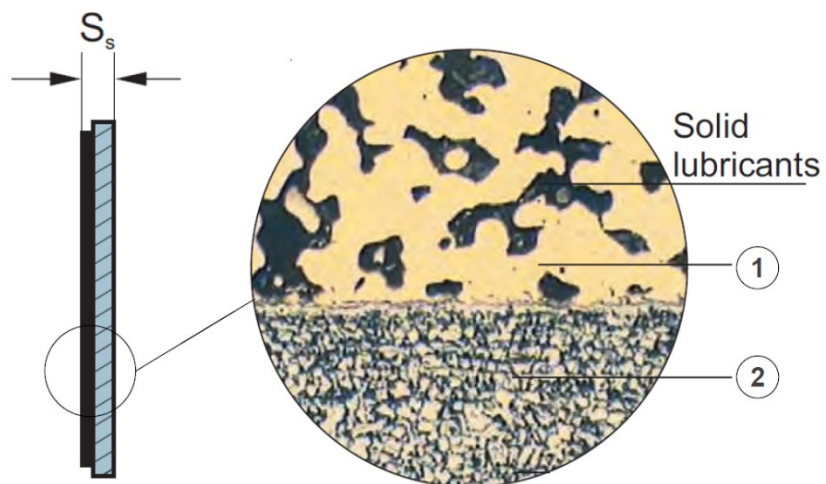
(Sumber: [csb-bearing.com](http://csb-bearing.com))

b. Bantalan *bimetal* jenis Pelat (*Strip Plate/Surface Bearing*)

Bentuk bantalan ini berbentuk pelat, tersedia dengan berbagai bentuk dan dimensi untuk berbagai aplikasi. Bantalan pelat banyak digunakan dalam turbin air, pompa piston, *vane controls*, mesin cetak injeksi, mesin pengepakan, peralatan konstruksi, mesin cetakan ban, mesin produksi kertas, pelat ekspansi tungku, transmisi otomotif, hubungan rantai pada alat angkat berat, industri makanan. Produk bimetal bearing jenis pelat (*surface bearing/strip plate*) yang tersedia di pasaran ditampilkan pada gambar 2.22, struktur bantalan ini dapat dilihat pada gambar 2.23.



Gambar 2.22 Produk *Bimetal Bearing* jenis pelat (sumber: [www.csb-bearings.fr](http://www.csb-bearings.fr))



Gambar 2.23 Struktur utama *bimetal bearing* jenis pelat (Sumber: [www.csb-bearings.fr](http://www.csb-bearings.fr))

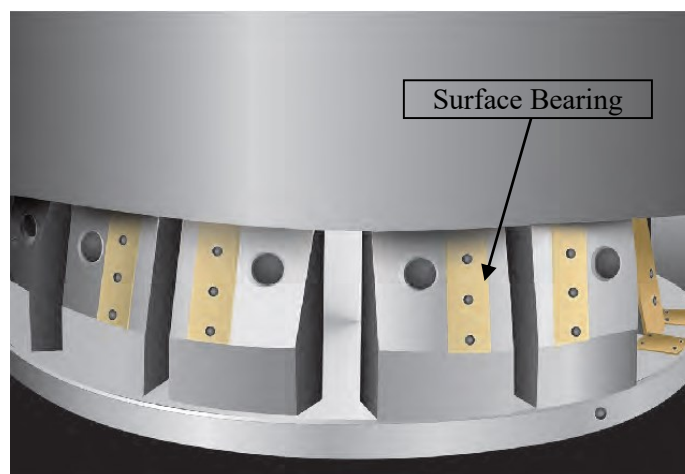
Struktur dan fungsi lapisan *bimetal bearing* tipe pelat sebagai berikut:

1. Lapisan komposit (*Sintered bronze powder*), memiliki sifat dengan ketahanan aus dan daya dukung beban yang sangat baik. Bahan dapat dikerjakan setelah pemasangan untuk mendapatkan toleransi presisi. Bahan PTFE atau grafit dapat ditambahkan pada permukaan kerja untuk mendapatkan gesekan awal yang rendah.
2. Cangkang Baja (*Steel Backing*), memberikan daya dukung beban dan transfer panas yang sangat baik.

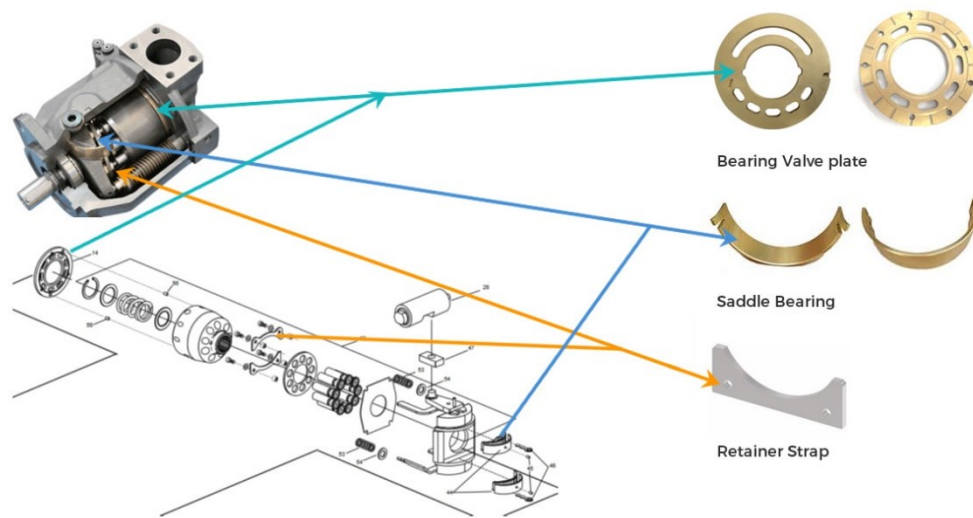
Tabel 2.6 Spesifikasi teknis *bimetal bearing* jenis pelat (*surface bearing*)

Tech. Data					
CSB standard material		CSB850BM1	CSB850BM2	CSB850BM3	CSB850BM4
Backing metal		Steel	Steel	Stainless steel	Bronze
Lining layer	Composition	CuSn12+SL	CuSn10Pb10+SL	CuSn12+SL	CuSn12+SL
	Solid lubricants	6%	6%	6%	6%
	Hardness	>40HB	>40HB	>40HB	>40HB
	Compression deformation 150Mpa	<0.005mm	<0.005mm	<0.005mm	<0.005mm
Max. load	Static	150N/mm <sup>2</sup>	120N/mm <sup>2</sup>	150N/mm <sup>2</sup>	150N/mm <sup>2</sup>
	Dynamic	100N/mm <sup>2</sup>	80N/mm <sup>2</sup>	100N/mm <sup>2</sup>	100N/mm <sup>2</sup>
Max. speed		0.5m/s	0.5m/s	0.5m/s	0.5m/s
Max. PV		1.5	1.5	1.5	1.5
Friction coefficient		0.05~0.2	0.03~0.2	0.05~0.2	0.05~0.2
Temp. °C		-195~+280	-195~+280	-195~+280	-195~+280

(Sumber: [www.csb-bearings.fr](http://www.csb-bearings.fr))



Gambar 2.24 Aplikasi *surface bearing* pada rotor (Sumber: [www.csb-bearings.fr](http://www.csb-bearings.fr))



Gambar 2.25 Aplikasi Bantalan tipe pelat pada *piston pump* (Sumber: csb-bearing.fr)

## 2.5. Komposit Bebas Timbal pada Bantalan Luncur

Tren perkembangan industri bantalan berkembang pesat dengan banyaknya produsen atau industri dalam skala global. Berbagai jenis produk disediakan untuk berbagai aplikasi keteknikan. Pemilihan material menjadi penentu sifat dari komponen yang diproduksi. Tabel 2.7 menampilkan material komposit yang banyak digunakan pada produk bushing khususnya jenis *bimetal bearing*.

Tabel 2.7 Material komposit dan kapasitas beban pada *bimetal bearing*

Kode Produk	Material Komposit	Kekerasan	Beban Max. (N/mm <sup>2</sup> )	
			Statik	Dinamis
DYB-301	CuPb10Sn10+PTFE	60-90 HB	250	140
DYB-302, CSB-800, SY	CuPb10Sn10	60-90 HB	250	140
DYB-303, CSB-720	CuSn4Pb24	45-70 HB	250	130
DYB-304,SP	CuPb24Sn	40-60 HB	250	130
DYB-306, CSB-J20	AlSn20Cu	30-40 HB	200	100
DYB-307, CSB-700	CuPb30	30-45 HB	250	120

(Sumber: Katalog produk Jiashan Bearing, DI Bearing, GG Bearing)

Penggunaan material timbal (Pb) sebagai paduan dalam komposit *bimetal bearing* masih dominan, hal ini karena sifat dari timbal (Pb) memiliki sifat *self-lubricating* yang cukup baik (Copper.org, 2013). Namun meski demikian penggunaan logam timbal perlu dibatasi atau bahkan ditinggalkan karena sifat racunnya. Kandungan timbal pada komponen tergantung tujuan penggunaan, umumnya dalam jumlah kecil namun sisa material buangan dapat mencemari lingkungan.

Pembatasan penggunaan timbal pada komponen otomotif telah digemakan oleh *European End of Life Vehicle Directive (ELV Directive)*. Sehingga untuk mendukung hal tersebut berbagai studi dilakukan. Komposit paduan bismut dikembangkan untuk menggantikan paduan SAE-792 (CuSn10Pb10) pada komponen bantalan. Paduan CuSn10Bi3 bebas timbal dapat bekerja baik pada kondisi pelumasan terbatas (Saxton, 2006)

Studi pengembangan komponen bebas timbal (*lead free*) berbahan bismut telah digunakan untuk menggantikan paduan C93700 (kandungan 8-11% Pb) untuk bantalan pada bidang kedirgantaraan (*aerospace*). Kandungan 5% bismut pada paduan memberikan kondisi optimum berdasarkan karakteristik sifat mekanik, tribologi dan struktur mikro (Thomson et al., 2015)

Ketahanan aus dan kekerasan merupakan sifat yang menentukan pada kualitas *bimetal bearing*. Serbuk grafit bertindak sebagai pelumas padat ditambahkan pada paduan CuSn10Pb10 berhasil diproses melalui metalurgi serbuk, dimana kandungan 3% grafit pada paduan memberikan kondisi optimal pada sifat *bimetal bearing* (Ru-tie et al., 2011)

Kebutuhan komponen bebas timbal dan sifat anti racun sesuai aturan ELV dianggap perlu. Paduan tembaga timah dengan kandungan hingga 17% timbal banyak digunakan pada bantalan mesin (*engine bearing*) menjadi perhatian khusus. Studi paduan bebas timbal dengan 8% bismut dan 1,5% MoC memberikan sifat optimum pada aplikasi bantalan mesin (Kitahara et al., 2018)

Keseimbangan ekologi pada lingkungan dan kesehatan harus dijaga seiring pertumbuhan industri saat ini, sehingga sejumlah kandungan timbal dalam komponen mesin harus dibatasi. Berbagai material alternatif bebas timbal (*lead free*) dapat memberikan sifat yang baik pada aplikasi bantalan seperti *polyamide* dengan grafit/MoS<sub>2</sub>, paduan aluminium, komposit matrik logam dengan sifat swa-lubrikasi (*self-lubricating*) dan paduan bismut (Patil & Dabade, 2019)

Penelitian ini fokus pada studi komposit matrik aluminium berpenguat grafit dan tembaga sebagai komposit bebas timbal (*lead free*) yang diproduksi melalui metode metalurgi serbuk. Aluminium dipilih sebagai matrik untuk mereduksi berat komposit, ketahanan korosi, ketahanan lelah, konduktivitas termal yang baik serta bahan yang ramah lingkungan, sifat mekanik dan ketahanan aus dioptimalkan dengan penambahan magnesium, tembaga dan grafit. Metode pengujian dilakukan untuk mengukur dan menganalisa sifat komposit bebas timbal (*lead free*) sebagai material alternatif pada aplikasi bantalan luncur *bimetal bearing*.

## 2.6. Karakterisasi Komposit Metalurgi Serbuk

### 2.6.1 Densitas

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 2.1 (Zakinah, 2017)

$$\rho_s = \frac{W_u}{W_u - W_a} \rho_a \quad (2.1)$$

dimana:

$\rho_s$  = densitas sampel (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_a$  = densitas air (1 g/cm<sup>3</sup>)

$W_u$  = massa sampel di udara (gram)

$W_a$  = massa sampel di air (gram)



### 2.6.2 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 2.2 (Zakinah, 2017)

$$\varepsilon = \frac{m_b - m_k}{m_k} \times 100\% \quad (2.2)$$

dimana:

$\varepsilon$  = tingkat porositas (%)

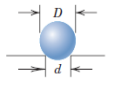

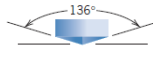

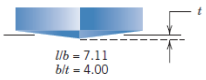

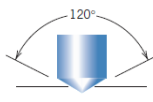



$m_k$  = massa kering sampel setelah dikeringkan (gram)

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

### 2.6.3 Kekerasan

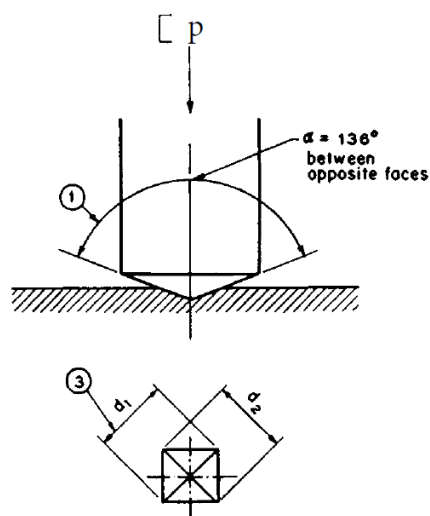
Kekerasan logam dapat diartikan sebagai ketahanan suatu bahan logam terhadap penetrasi, kekerasan memberikan indikasi cepat terhadap perilaku deformasi. Harga kekerasan bahan tersebut dapat dianalisis dari besarnya beban yang diberikan terhadap luasan bidang yang menerima pembebanan (Callister, 2007).

Metode pengujian kekerasan material atau logam yang umum digunakan saat ini adalah metode indentasi yaitu dengan mengukur tahanan plastis dari permukaan suatu material terhadap penetrator. Ada beberapa macam metode pengujian kekerasan indentasi yang digunakan, disesuaikan dengan spesifikasi bahan, ukuran dan lain-lain. Cara-cara pengujian kekerasan indentasi ditunjukkan pada gambar 2.26.

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number <sup>a</sup>
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	{ Diamond cone; $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ in. diameter steel spheres	 	 	60 kg } Rockwell 100 kg } 150 kg } 15 kg } Superficial Rockwell 30 kg } 45 kg }	

Gambar 2.26. Teknik pengujian indentasi (Callister, 2015)

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  $136^\circ$  yang ditekan 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 2.27 (ASTM E92, 1997)



Gambar 2.27 Skema Pengujian Kekerasan Vickers (ASTM E 92-82,1997)

Angka kekerasan Vickers (VHN) dapat ditentukan dengan persamaan 2.3

$$HV = \frac{1,854 P}{d_1 d_2} \quad (2.3)$$

Dimana:

- HV = Nilai kekerasan skala Vickers (HV atau kg/mm<sup>2</sup>)
- P = Beban yang digunakan (kg)
- d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub> = Panjang diagonal rata-rata (mm)

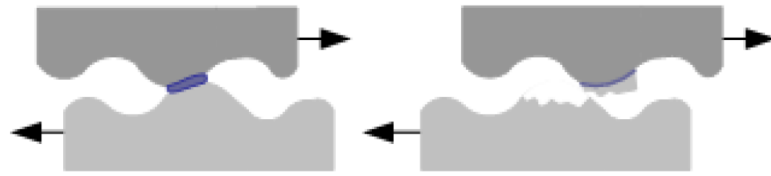
Selain itu seringkali diperlukan metode yang cepat untuk mengkonversi nilai kekerasan terhadap metode pengujian kekerasan lainnya. Nilai pendekatan konversi Brinell terhadap kekerasan Vickers ditampilkan pada persamaan 2.4 (Geels et al., 2007)

$$HB \sim 0,95 HV \quad (2.4)$$

#### 2.6.4 Keausan

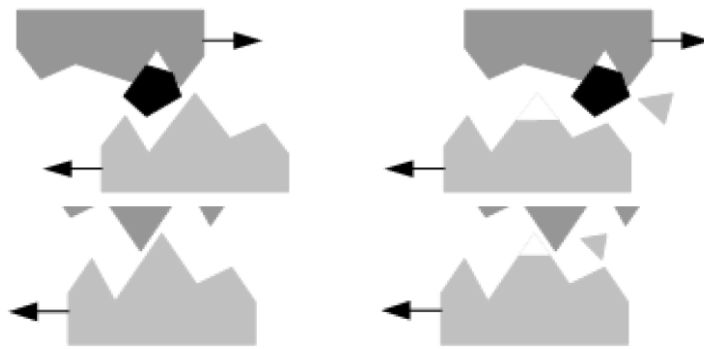
Keausan merupakan hilangnya bagian dari permukaan yang saling berinteraksi sebagai efek dari gerak relatif pada permukaan. Keausan yang terjadi pada suatu permukaan dapat disebabkan oleh berbagai mekanisme dan kondisi termasuk sifat bahan, lingkungan, kondisi operasi dan geometri permukaan yang terjadi keausan. Mekanisme keausan dibagi menjadi dua jenis berdasarkan penyebabnya yaitu keausan mekanis dan keausan kimia. Pada tahun 1957, Burwell mengelompokkan proses keausan menjadi 4 jenis yaitu (Kurnia, 2016):

- Keausan Gesek (*sliding wear, adhesive wear*), Keausan gesek terjadi jika dua permukaan benda saling berkontak dan bergerak relatif satu sama lain serta mengalami pembebanan, sehingga kontak permukaan dari kedua material tersebut mengakibatkan adanya perlekatan (*adhesive*) serta mengakibatkan deformasi plastis. Hingga pada akhirnya terjadi pengikatan (*bonding*) dan pelepasan sebagian kecil permukaan material yang satu oleh material yang lain (lihat gambar 2.28)



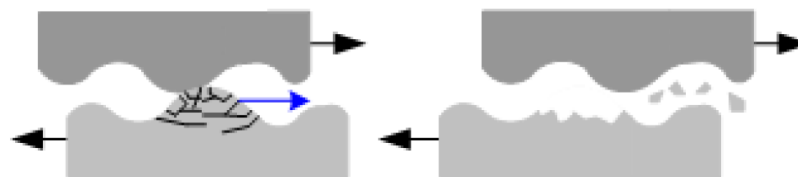
Gambar 2.28 Mekanisme keausan gesek (adhesive)

- Keausan Abrasif (*Abrasive wear*), merupakan proses pengikisan yang terjadi jika partikel abrasif yang kasar dan keras berkontak dengan permukaan suatu material yang lebih lunak sehingga terjadi pemotongan pada material yang lebih lunak, (lihat gambar 2.29).



Gambar 2.29 Mekanisme keausan abrasif

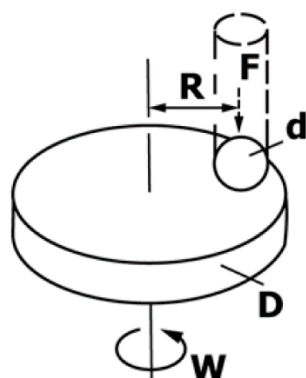
- Keausan lelah, merupakan mekanisme keausan yang terjadi akibat interaksi permukaan dimana permukaan yang mengalami beban berulang akan mengarah pada pembentukan retak-retak mikro. Retak-retak mikro tersebut pada akhirnya menyatu dan menghasilkan pengelupasan material, (lihat gambar 2.30).



Gambar 2.30 Mekanisme keausan lelah

- Keausan Korosi, merupakan proses kerusakan yang dimulai perubahan kimiawi material di permukaan oleh faktor lingkungan korosif. Kontak dengan lingkungan ini menghasilkan pembentukan lapisan pada permukaan dengan sifat yang berbeda dengan material induk. Sebagai konsekuensinya, material akan mengarah kepada perpatahan *interface* antara lapisan permukaan dan material induk dan akhirnya seluruh lapisan permukaan itu akan terlepas.

Fenomena dan mekanisme keausan perlu dipahami sebagai respon material terhadap kondisi eksternal, sehingga diperlukan metode pengujian. Pengujian keausan dapat dilakukan dengan berbagai macam metode dan teknik yang bertujuan untuk mensimulasikan kondisi keausan aktual. Salah satunya dengan menggunakan metode tribometer *pin on disc* dimana perilaku keausan material ditentukan dengan indikasi hilangnya sebagian material karena gesekan sebagai mekanisme keausan mekanik. Mekanisme pengujian tribometer *pin on disc* terdiri dari pin tetap dengan spesimen yang akan bersentuhan dengan cakram yang berputar selama pembebanan, gesekan geser terjadi selama kontak menyebabkan terjadinya kehilangan volume, besarnya volume yang hilang terhadap beban dan lintasan tempuh dapat dinyatakan sebagai laju keausan. Skema pengujian *pin on disc* ditampilkan pada gambar 2.31



**Keterangan:**

- F = Beban normal
- R = Jari-jari lintasan
- d = Diameter pin/spesimen
- D = Diameter Cakram
- W = Kecepatan putar

Gambar 2.31 Skema pengujian tribometer *pin on disc* (sumber: ASTM G99-17, 2017)

Besar volume keausan pada spesimen dapat ditentukan dengan persamaan 2.5 (ASTM G99-17, 2017)

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho} \times 1000 \quad (2.5)$$

Dimana:

- V = volume keausan (mm<sup>3</sup>)
- m<sub>1</sub> = massa sebelum pengujian (gram)
- m<sub>2</sub> = massa setelah pengujian (gram)
- ρ = massa jenis spesimen (gram/cm<sup>3</sup>)

Sedangkan laju keausan per satuan panjang lintasan dapat dinyatakan dengan persamaan 2.6

$$\text{Laju keausan } (mm^3/m) = \frac{V}{2\pi RNt} \quad (2.6)$$

Dimana:

- V = volume keausan (mm<sup>3</sup>)
- R = Radius lintasan pengujian (m)
- N = kecepatan putar (rpm)
- t = periode pengujian keausan (menit)

Keausan dapat didefinisikan sebagai kehilangan sebagian volume karena rusaknya permukaan padatan, umumnya melibatkan kehilangan material yang progresif akibat adanya gesekan (friksi) antar permukaan padatan. Keausan bukan merupakan sifat dasar material, melainkan respon material terhadap sistem luar. Ketahanan aus merupakan kemampuan bahan untuk menahan pelepasan material akibat mekanisme keausan.

### 2.6.5 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 (Manurung, 2020)

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.

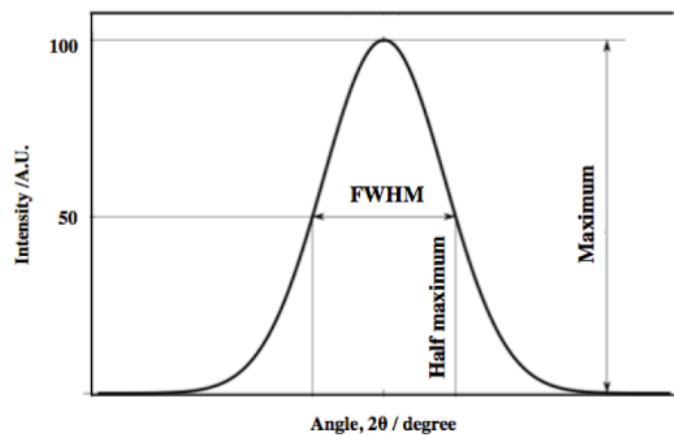
Mikrografi mempelajari struktur logam dan paduannya menggunakan mikroskop dengan perbesaran mulai dari 20 kali sampai

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*)

### 2.6.6 Karakterisasi Difraksi Sinar X (XRD)

XRD merupakan salah satu alat pengujian material yang dapat digunakan untuk analisis kualitatif (identifikasi unsur atau senyawa) maupun kuantitatif (komposisi, ukuran kristal, densitas dislokasi, regangan mikro). Instrumen XRD menggunakan sinar X untuk mengidentifikasi material, sinar X ditembakkan secara terus menerus berubah sudut datangnya sehingga menciptakan spektrum sebagai identitas material (Widyastuti et al., 2019).



Gambar 2.32 Skema ilustrasi FWHM dari profil puncak XRD (Widyastuti et al., 2019)

Difraktometer mencatat intensitas difraksi dari  $2\theta$  rendah hingga  $2\theta$  tinggi, pola difraksi yang dimunculkan merupakan sidik jari material dengan setiap puncak menunjukkan pola difraksi bidang tertentu. *Full width at Half Maximum (FWHM)* sangat responsif terhadap variasi didalam mikrostruktur



dan akumulasi tegangan didalam material. Perhitungan FWHM dikaitkan dengan distorsi butir, dislokasi dan tegangan sisa. Gambar 2.32 merupakan ilustrasi FWHM dari profil puncak XRD. Peningkatan pada kekerasan dan banyaknya cacat menyebabkan pelebaran FWHM dari puncak XRD. Selain itu keberadaan tegangan tarik di dalam material menyebabkan pelebaran FWHM, sebaliknya penghilangan tegangan akan menghasilkan penyempitan FWHM.

Pada analisa difraksi sinar-X dan kristalografi dikenal persamaan Scherrer. Persamaan ini menjelaskan hubungan ukuran kristal dengan pelebaran puncak dalam pola difraksi, bentuk persamaan Scherrer ditampilkan pada persamaan (2.7) (Bindu & Thomas, 2014)

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2.7)$$

Dimana:

D = Ukuran kristal rata-rata (nm)

K = Faktor bentuk kristalit (Kristal kubik, K=0,94)

$\lambda$  = Panjang gelombang sinar X (nm)

$\beta$  = Nilai FWHM (rad)

$\theta$  = Sudut Bragg ( $^{\circ}$ )

Pelebaran puncak FWHM dikaitkan dengan distorsi butir dan peningkatan kerapatan dislokasi. Kerapatan dislokasi menunjukkan jumlah cacat internal yang dinyatakan sebagai jumlah panjang dislokasi per unit volume dari kristal, kerapatan dislokasi dihitung dengan persamaan 2.8 (Bindu & Thomas, 2014)

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (2.8)$$

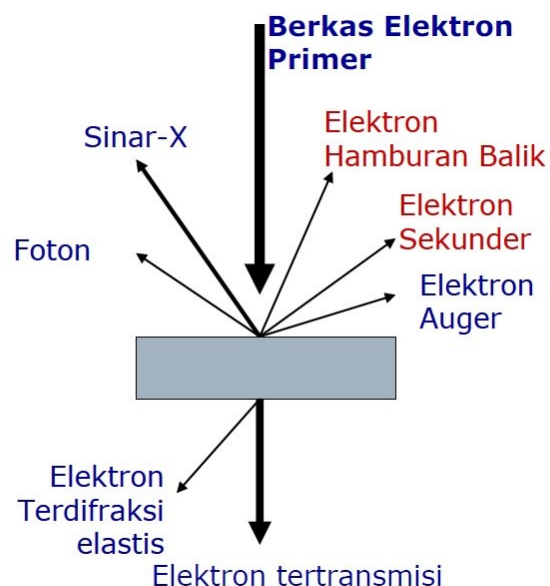
Dimana:

$\delta$  = Densitas dislokasi ( $\text{nm}^{-2}$ )

D = Ukuran Kristal rata-rata (nm)

### 2.6.7 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 2.33 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 (Setiabudi, 2012)



Gambar 2.33 Skema Interaksi antara Elektron dengan Sampel pada Mikroskop Elektron (Setiabudi, 2012)

SEM dapat mengamati struktur maupun bentuk permukaan yang berskala lebih teliti yang dilengkapi dengan EDS (*Electron Dispersive X-Ray 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.

## 2.7. Uji Statistik ANOVA

Analisis varians (*analysis of variance*, ANOVA) adalah suatu metode analisis statistika yang termasuk ke dalam cabang statistika inferensi yang merupakan pengembangan dari masalah Behrens-Fisher, sehingga uji-F juga dipakai dalam pengambilan keputusan. Analisis varians pertama kali diperkenalkan oleh Sir Ronald Fisher, bapak statistik modern. *Analysis of variance* atau ANOVA merupakan salah satu teknik analisis *multivariate* yang berfungsi untuk membedakan rerata lebih dari dua kelompok data dengan cara membandingkan variansinya (Willard, 2020), selanjutnya ringkasan uji hipotesis anova ditampilkan pada tabel 2.8

Tabel 2.8 Ringkasan uji hipotesis ANOVA

SV (sumber variasi)	Derajat Kebebasan (dk)	Jumlah Kuadrat (JK)	Mean Kuadrat (MK)	Nilai F hitung (F <sub>h</sub> )	Nilai F tabel (F <sub>t</sub> )	Keputusan
Total	N-1	$\sum X_{tot}^2 - \frac{(\sum X_{tot})^2}{N}$				
Antara	m-1	$\sum \frac{(\sum X_1)^2}{n_k} - \frac{(\sum X_{tot})^2}{N}$	$\frac{JK_{ant}}{(m-1)}$	$\frac{MK_{ant}}{MK_{dal}}$	F <sub>tabel</sub>	F <sub>hitung</sub> > F <sub>tabel</sub> H <sub>a</sub> diterima
Dalam	N-m	JK <sub>tot</sub> - JK <sub>ant</sub>	$\frac{JK_{ant}}{N-m}$			