

**EFEK DARI SUHU SINTERING, UKURAN BUTIR ALUMINA DAN  
KOMPOSISI MAGNESIUM PADA KOMPOSIT Al-Cu-Mg-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
TERHADAP SIFAT FISIS, MEKANIS, DAN STRUKTUR MIKRO  
DIPRODUKSI DENGAN METALURGI SERBUK**

**Effects of Sintering Temperature, Grain Size of Alumina and Magnesium Composition of  
Al-Cu-Mg-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on Physical, Mechanical and Microstructural Properties Produced by  
Powder Metallurgy**

**TOMMY TARMINSYAH  
D022202005**



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



## **PENGAJUAN TESIS**

# **EFEK DARI SUHU SINTERING, UKURAN BUTIR ALUMINA DAN KOMPOSISI MAGNESIUM PADA KOMPOSIT Al-Cu-Mg- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> TERHADAP SIFAT FISIS, MEKANIS, DAN STRUKTUR MIKRO DIPRODUKSI DENGAN METALURGI SERBUK**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister  
Program Studi Ilmu Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

**TOMMY TARMINSYAH**  
**D022202005**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK**  
**UNIVERSITAS HASANUDDIN**  
**GOWA**  
**2023**



# LEMBAR PENGESAHAN

## EFEK DARI SUHU SINTERING, UKURAN BUTIR ALUMINA DAN KOMPOSISI MAGNESIUM PADA KOMPOSIT Al-Cu-Mg-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> TERHADAP SIFAT FISIS, MEKANIS, DAN STRUKTUR MIKRO DIPRODUKSI DENGAN METALURGI SERBUK

Disusun dan diajukan oleh

**TOMMY TARMINSYAH**

**D022202005**

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

Universitas Hasanuddin

pada tanggal 05 Desember 2023

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui  
Komisi Penasehat,

Pembimbing Utama



**Prof. Dr. Ir. Ilyas Renreng, ST.,MT**  
NIP. 19570914 198703 1 001

Pembimbing Pendamping



**Dr. Hairul Arsyad, ST.,MT.**  
NIP. 19750322 200212 1 001

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



**Ir. Muhammad Isran Ramli,**  
**.,IPM.,ASEAN. Eng**  
9730926 200012 1 002

Ketua Program Studi  
Magister Teknik Mesin



**Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST, MT**  
NIP. 19791112 200812 2 002



## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Tommy Tarminsyah

Nomor mahasiswa : D022202005

Program studi : Teknik Mesin

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Efek dari Suhu Sintering, Ukuran Butir Alumina dan Komposisi Magnesium pada Komposit Al-Cu-Mg-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Terhadap Sifat Fisis, Mekanis, dan Struktur Mikro Diproduksi dengan Metalurgi Serbuk” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Prof. Dr. Ir. Ilyas Renreng, MT. sebagai Pembimbing Utama dan Dr. Ir. Hairul Arsyad, ST., MT. sebagai Pembimbing Pendamping. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah diseminarkan pada konferensi internasional “The 1<sup>st</sup> International Conference on Research in Engineering and Science Technology (IC-REST) 2023”, dan akan dipublikasikan oleh Scientific.net (terindeks Scopus) sebagai artikel dengan judul “Effect of Sintering Temperature and Magnesium Composition Fraction on the Properties of Al-Cu-Mg-Alumina Composite Made by Powder Metallurgy”.

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

Gowa, 07 Desember 2023



Tommy Tarminsyah



## KATA PENGANTAR

Tiada kalimat terindah selain untaian kata yang berpadu menjadi kalimat segala puji dan syukur kepada Allah SWT, Tuhan semesta alam, beserta shalawat dan salam kepada junjungan Nabi Besar Muhammad SAW atas limpahan rahmat dan keagungannya sehingga kaki ini mampu melangkah, tangan yang mampu menggapai cita dan fikiran yang mampu berfikir hingga akhirnya penulis mampu berdiri tegap dalam perjuangan panjang nan melelahkan dalam menyelesaikan penelitian ini.

Untaian kata demi kata indah penulis rangkai demi menggambarkan rasa terima kasih yang mendalam pada setiap pahlawan hidup penulis yang tidak berhenti berjuang untuk segala kepentingan dan kebutuhan penulis selama ini yaitu ibunda tercinta, terima kasih untuk segala limpahan sayang yang diberikan setiap detiknyanya, terima kasih untuk motivasi dan dukungan baik moral dan materil, terima kasih untuk setiap untaian doa yang tak pernah terputus untuk anakmu ini. Terima kasih atas segala nasihat dan segalanya yang tidak dapat terbalaskan. Penulis juga menyadari sepenuhnya bahwa tanpa bantuan dari pihak-pihak yang telah mendoakan, mendukung dan membantu dalam penyusunan tesis, penulis tentu tidak dapat menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Yth. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng, MT. sebagai pendamping utama dan Bapak Dr. Ir. Hairul Arsyad, ST.,MT. sebagai pendamping kedua saya, yang telah banyak memberikan masukan, arahan, nasehat-nasehat yang berharga selama penulis menuntut ilmu, terima kasih telah menjadi pendamping selama proses menuntut ilmu hingga tercapainya harapan penulis dalam menyelesaikan tesis ini sebagai tugas akhir perkuliahan.
2. Yth. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma,ST.,MT., Bapak Dr. Ir. Muhammad Syahid, ST.,MT., dan Bapak Ir. Azwar Hayat, ST., M.Sc., Ph.D., sebagai komisi tim penguji penulis, yang telah banyak memberikan arahan dan bimbingan selama proses penyelesaian tesis ini.



3. Yth. Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., selaku Rektor Universitas Hasanuddin, yang telah memberikan dukungan untuk kebaikan mahasiswa-mahasiswanya.
4. Yth. Pimpinan Kantor Otoritas Bandar Udara Wilayah V Makassar, yang telah memberikan support dukungan atas waktu dan kesempatan kepada penulis hingga mampu menyelesaikan proses perkuliahan.
5. Yth. Ibu Sakinah., ST., MM., selaku Kepala Seksi Fasilitas dan Pelayanan Bandar Udara yang telah memberikan dukungan izin untuk menjalani proses perkuliahan serta mensupport penulis selama bekerja sebagai staff dibawah beliau.
6. Teruntuk senior-senior saya di Otoritas Bandar Udara Wilayah V Makassar, khususnya di Seksi Fasilitas dan Pelayanan Bandar Udara dan Seksi Pengoperasian Bandar Udara, ibu Nurafni Mappeare, kak Dessy Pramitha, kak Ashari Sanusi, kak Ririn Dwi Satya, pak Fitriady, kak Nova Deli Halimah, kak Munawir Khairil Anwar, beserta seluruh keluarga besar Bidang P2BU yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu, terima kasih telah memberikan arahan, bimbingan dan bantuan yang dibutuhkan penulis selama bekerja bersama sembari menyelesaikan perkuliahan, semoga Tuhan YME membalas segala kebaikan kalian serta memudahkan segala urusan kita semua.
7. For my big family, tante, paman, sepupu-sepupu di kampung halaman yang telah banyak mendoakan saya agar selalu dimudahkan dalam segala urusan, semoga penulis mampu menjadi kebanggaan keluarga besar kita.
8. For my best squad friend, Saiful Harlindong, Wahyu Hendri Yulianto, A.Nur Muh. Tauhied dan mas Nanda Tirta Gemintang, yang telah dipertemukan oleh nasib kita masing-masing dan telah berjuang bersama hingga kita sampai di titik sekarang ini, you are all amazing and stay solid till the end.
9. Teruntuk kawan-kawan seperjuangan program Magister Teknik Mesin UH dalam menyelesaikan tesis ini, yang telah sama-sama saling memberi dukungan dan motivasi serta saling membantu dan saling mengarahkan ketika



lis melakukan kekeliruan serta mendapatkan kesulitan dalam menyelesaikan tesis ini, terima kasih untuk semua pengalaman dan

kebahagiaan yang telah kalian bagikan, semoga kita bertemu di puncak kesuksesan kita masing-masing kelak, aaminn.

10. Teruntuk kawan-kawanku komunitas volunteer, Sedekah untuk Negeri, Sokola Kaki Langit, Koin untuk Negeri, 1000 Guru Sulsel, Pejuang Pelosok dan SiGI Makassar, terima kasih telah mengajarkan banyak arti kehidupan, pentingnya bersyukur atas nikmat kesempatan pendidikan yang penulis dapatkan, serta motivasi untuk selalu menyebarkan ilmu yang telah dimiliki walau dengan pengorbanan waktu, tenaga dan materi, karena sebaik-baiknya manusia adalah yang bisa berbagi manfaat dengan sesama. Semoga Allah SWT membalas segala niat dan tindakan baik kita semua dengan limpahan rahmatnya.
11. Teruntuk seluruh kawan seangkatan penulis “MACHINE PDKO 013” yang senantiasa mendoakan serta kata kata support yang tak pernah berhenti terucap, kalian semua luar biasa, salam Solidarity Forever.
12. Keluarga Besar Forum Komunikasi Pelajar Mahasiswa Tarakan beserta alumni, terima kasih atas sharing ilmunya selama ini, dengan semangat bergelora, jayalah FKPM-TSC.
13. Terima kasih juga untuk semua pihak yang telah membantu sebelum dan selama pelaksanaan penelitian yang penulis tidak dapat sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tesis ini masih diperlukan penyempurnaan dari berbagai sudut, baik dari segi isi maupun pengembangan tingkat lanjut yang tepat dari penelitian ini, oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun untuk kesempurnaan penyusunan tesis ini

Maka daripada itu, penulis berharap dan berterimakasih atas segala saran dan kritik dari pembaca. Serta menerima saran dan kritik dengan hati terbuka. Semoga tesis ini memberi manfaat yang besar dan berarti bagi kita semua

Makassar, 30 Desember 2023

Penulis,



Tommy Tarminsyah



## ABSTRAK

**Tommy Tarmingsyah**, *Efek dari Suhu Sintering, Ukuran Serbuk Alumina dan Komposisi Magnesium pada komposit Al-Cu-Mg-Alumina terhadap Sifat Fisis, Mekanis dan Struktur Mikro di Produksi dengan Metalurgi Serbuk* (dibimbing oleh **Ilyas Renreng dan Hairul Arsyad**)

Komposit matriks aluminium berpenguat keramik banyak dikembangkan pada aplikasi otomotif, transportasi, kedirgantaraan, hingga komponen pendukung fasilitas umum, karena memiliki densitas yang ringan, kekerasan tinggi, kekuatan tinggi, koefisien ekspansi termal yang rendah hingga ketahanan terhadap keausan. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan material komposit matriks aluminium dengan berpenguat alumina yang memiliki sifat mekanis yang paling optimal dengan menggunakan metode metalurgi serbuk. Komposit dibuat dari matriks Al-4.5Cu yang ditambahkan magnesium dengan variasi fraksi volume Mg 1 % dan Mg 1.5 %. Setelah itu, alumina dengan variasi ukuran butir yaitu mikro- $\text{Al}_2\text{O}_3$  (55  $\mu\text{m}$ ) dan nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  (20 nm) ditambahkan dengan fraksi volume 1 %. Spesimen kemudian dipanaskan dengan variasi suhu sinter sebesar 500°C, 550°C dan 600°C selama 60 menit. Pengujian densitas, porositas dan tingkat penyusutan untuk menganalisa sifat fisis, pengujian kekerasan dan laju keausan untuk menganalisa sifat mekanis. Persebaran unsur penyusun diamati menggunakan SEM-EDS mapping serta identifikasi fasa sekunder menggunakan uji X-Ray Diffraction. Hasil pengujian menunjukkan bahwa komposit dengan penambahan magnesium sebesar 1.5% dan berpenguat nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang disinter pada suhu 600°C memiliki sifat fisis dan mekanis paling optimal ditandai dengan porositas paling rendah sebesar 5.47 %, kekerasan paling tinggi sebesar 55.7 HV dan laju keausan paling rendah sebesar 0.448  $\text{mm}^3/\text{m}$ . Peningkatan karakter mekanis didukung oleh hasil observasi struktur mikro menggunakan SEM-EDS dan XRD. Penggunaan nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  pada komposit paduan Al-4.5Cu-1.5Mg mensupport optimalisasi karakter fisis dan mekanis sebagai komposit yang layak diperhitungkan sebagai bahan pilihan komponen dari moda transportasi, kedirgantaraan dan otomotif.

**Kata kunci** : Komposit matriks aluminium, ukuran partikel alumina, metalurgi serbuk, waktu sintering, variasi magnesium, struktur mikro



## ABSTRACT

**Tommy Tarminsyah**, *Effects of Sintering Temperature, Alumina Powder Size and Magnesium Composition in Al-Cu-Mg-Alumina Composites on Physical, Mechanical and Microstructural Properties in Production with Powder Metallurgy* (supervised by **Ilyas Renreng** and **Hairul Arsyad**)

Ceramic-reinforced aluminum matrix composites have been widely developed for applications in automotive, transportation, aerospace, and supporting components for public facilities, due to their low density, high hardness, high strength, low coefficient of thermal expansion and resistance to wear. This study uses powder metallurgy methods to produce aluminum matrix composite materials with alumina reinforcement with the most optimal mechanical properties. The composite was made from an Al-4.5Cu matrix added with magnesium with variations in the volume fraction of 1% Mg and 1.5% Mg. After that, alumina with grain size variations, namely micro-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (55 μm) and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (20 nm), was added with a volume fraction of 1%. The specimens were then heated with various sintering temperatures of 500°C, 550°C and 600°C for 60 minutes. Density, porosity and shrinkage tests are used to analyze physical properties, and hardness tests and wear rates are used to analyze mechanical properties. The distribution of the constituent elements was observed using SEM-EDS mapping and identification of the secondary phase using the X-Ray Diffraction test. The test results show that the composite with the addition of 1.5% magnesium and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sintered at 600°C has the most optimal physical and mechanical properties characterized by the lowest porosity of 5.47%, the highest hardness of 55.7 HV and the lowest wear rate of 0.448 mm<sup>3</sup>/m. The increase in mechanical character is supported by the results of microstructural observations using SEM-EDS and XRD. The use of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the Al-4.5Cu-1.5Mg alloy composite supports the optimization of physical and mechanical characteristics as a composite worthy of being considered as the material of choice for components from transportation, aerospace and automotive modes.

**Keywords** : Aluminum matrix composite, alumina grain size, powder metallurgy, time sintering, variation of magnesium, microstructure



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PENGAJUAN TESIS .....	ii
PERSETUJUAN TESIS.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
ABSTRAK .....	ix
ABSTRACT.....	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR .....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xx
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL .....	xxi
<b>BAB I. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	5
1.4 Manfaat Penelitian .....	5
1.5 Batasan Masalah.....	6
<b>BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>7</b>
2.1 Tinjauan Umum Komposit.....	10
2.2 Metal Matrix Composite (MMCs) .....	12
2.3 Metalurgi Serbuk.....	14
2.3.1 Preparasi serbuk / Pembuatan Serbuk .....	16
2.3.2 Pencampuran (mixing) .....	18
2.3.3 Penekanan / Pemadatan .....	19
2.3.4 Pemanasan (sintering) .....	21
2.4 Komposit Matriks Alumunium .....	25
2.4.1 Aluminium.....	25
2.4.2 Tembaga .....	27
2.4.3 Magnesium .....	27



2.4.4	Aluminium Oksida .....	29
2.5	Karakteristik Serbuk Logam .....	30
2.5.1	Bentuk Serbuk .....	30
2.5.2	Ukuran dan Distribusi Partikel Serbuk.....	31
2.5.3	Flowability.....	32
2.5.4	Sifat Kimia .....	32
2.5.5	Compressability.....	32
2.5.6	Density.....	33
2.5.7	Sifat Sinter .....	33
2.6	Aplikasi Komposit Al-Cu-Mg-Alumina .....	33
2.7	Penentuan Fraksi Komposisi dan Fraksi Massa.....	35
2.7.1	Perhitungan Densitas Teoritis Komposit.....	35
2.7.2	Perhitungan Volume Unsur Komposit .....	35
2.7.3	Perhitungan Berat Unsur Komposit .....	36
2.8	Karakterisasi Komposit Paduan Al-Cu-Mg-Alumina.....	36
2.8.1	Sifat Fisis – Densitas .....	36
2.8.2	Sifat Fisis – Porositas .....	37
2.8.3	Sifat Fisis – Penyusutan/Shrinkage .....	37
2.8.4	Sifat Mekanis – Kekerasan Mikro.....	39
2.8.5	Sifat Mekanis – Laju Keausan.....	40
2.8.6	Analisa Struktur Mikro – SEM-EDS Mapping .....	43
2.8.7	Analisa Struktur Mikro – X-Ray Diffraction .....	45
<b>BAB III. METODOLOGI PENELITIAN.....</b>		<b>48</b>
3.1	Persiapan Bahan dan Peralatan .....	48
3.1.1	Bahan yang Digunakan .....	48
3.1.2	Mesin dan Alat Uji .....	51
3.1.3	Perlengkapan Pendukung .....	51
3.2	Variabel Penelitian .....	52
3.2.1	Variabel Bebas .....	52
3.2.2	Variabel Terikat.....	52
3.2.3	Variabel Terkontrol .....	52
Prosedur Penelitian.....		53



3.3.1	Persiapan Alat dan Bahan.....	53
3.3.2	Penentuan Volume dan Fraksi Massa .....	53
3.3.3	Pencampuran (Mixing).....	53
3.3.4	Pencetakan Sampel (Kompaksi).....	55
3.3.5	Sintering .....	55
3.4	Pengujian Sampel.....	56
3.4.1	Pengujian Densitas .....	56
3.4.2	Pengujian Porositas .....	57
3.4.3	Observasi Tingkat Penyusutan / Shrinkage.....	58
3.4.4	Pengujian Kekerasan .....	59
3.4.5	Pengujian Laju Aus .....	60
3.4.6	Uji Difraksi Sinar X (XRD) .....	61
3.4.7	Observasi Mikrografi SEM-EDS .....	61
3.5	Digram Alir Penelitian .....	63
<b>BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>65</b>
4.1	Pengamatan Bahan Utama Penelitian .....	65
4.1.1	Karakterisasi Serbuk Bahan Utama Penelitian.....	65
4.1.2	Karakterisasi Campuran Serbuk Bahan Utama Penelitian ....	66
4.2	Pengamatan Visual Spesimen Komposit .....	71
4.3	Pengamatan Sifat Fisis Komposit .....	72
4.3.1	Densitas Relatif <i>Green Compact</i> .....	72
4.3.2	Densitas Relatif <i>Sintered Compact</i> .....	75
4.3.3	Porositas .....	80
4.3.4	Penyusutan (Shrinkage).....	86
4.4	Pengamatan Sifat Mekanik Komposit.....	90
4.4.1	Kekerasan (Hardness).....	90
4.4.2	Laju Keausan .....	94
4.5	Pengamatan Mikrografi SEM-EDS.....	99
4.5.1	Pengamatan mikrografi SEM pada interface komposit.....	99
4.5.2	Pengamatan spektrum EDS pada interface komposit.....	100
4.5.3	Pengamatan Mapping EDS pada interface komposit .....	102



4.6	Identifikasi Fasa	
4.6.1	Investigasi XRD pada pembentukan fasa sekunder .....	105
4.6.2	Pengamatan spektrum EDS pada interface komposit.....	107
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....		110
5.1	Kesimpulan .....	110
5.2	Saran.....	111
DAFTAR PUSTAKA .....		112
LAMPIRAN.....		118



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Standar US dan FEPA untuk ukuran butir .....	16
Tabel 2.2 Referensi tekanan kompaksi pada serbuk logam dan keramik .....	20
Tabel 2.3 Sifat fisis logam aluminium .....	25
Tabel 2.4 Sifat fisis logam tembaga .....	26
Tabel 2.5 Sifat fisis logam magnesium .....	27
Tabel 2.6 Sifat fisis aluminium oksida .....	29
Tabel 2.7 Standar ukuran partikel serbuk .....	30
Tabel 2.8 Pengaplikasian produk komposit AMCs .....	32
Tabel 2.9 Solidifikasi <i>shrinkage</i> beberapa material .....	37
Tabel 3.1 Jumlah fraksi komposisi dan massa material bahan baku .....	52
Tabel 3.2 Komposisi campuran serbuk dalam persentase volume .....	53
Tabel 3.3 Parameter pengujian difraksi sinar – x .....	60
Tabel 4.1 Komposisi campuran serbuk beserta suhu sintering optimal .....	66
Tabel 4.2 Tabulasi nilai densitas relatif <i>green compact</i> pada 1% vol Mg dan 1.5% vol Mg .....	71
Tabel 4.3 Tabulasi nilai densitas relatif <i>green compact</i> pada mikro- $\text{Al}_2\text{O}_3$ dan nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	72
Tabel 4.4 Tabulasi nilai densitas relatif <i>sintered compact</i> di setiap kenaikan suhu .....	74
Tabel 4.5 Tabulasi nilai densitas relatif <i>sintered compact</i> pada 1% vol Mg dan 1.5% vol Mg .....	76
Tabel 4.6 Tabulasi nilai densitas relatif <i>sintered compact</i> pada mikro- $\text{Al}_2\text{O}_3$ dan nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	77
Tabel 4.7 Tabulasi tingkat porositas <i>sintered compact</i> di setiap kenaikan suhu .....	79
Tabel 4.8 Tabulasi tingkat porositas <i>sintered compact</i> pada 1% vol Mg dan 1.5% vol Mg .....	81
Tabulasi penurunan nilai porositas <i>sintered compact</i> pada mikro- $\text{Al}_2\text{O}_3$ dan nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	82



Tabel 4.10 Tabulasi nilai <i>shrinkage sintered compact</i> di setiap kenaikan suhu.....	84
Tabel 4.11 Tabulasi nilai <i>shrinkage sintered compact</i> pada 1% vol Mg dan 1.5% vol Mg .....	86
Tabel 4.12 Tabulasi penurunan <i>shrinkage sintered compact</i> pada mikro- $\text{Al}_2\text{O}_3$ dan nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	87
Tabel 4.13 Tabulasi nilai kekerasan mikro <i>sintered compact</i> di setiap kenaikan suhu .....	89
Tabel 4.14 Tabulasi nilai kekerasan mikro <i>sintered compact</i> pada 1% vol Mg dan 1.5% vol Mg .....	90
Tabel 4.15 Tabulasi nilai kekerasan mikro <i>sintered compact</i> pada mikro- $\text{Al}_2\text{O}_3$ dan nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	91
Tabel 4.16 Tabulasi nilai laju keausan <i>sintered compact</i> di setiap kenaikan suhu.....	93
Tabel 4.17 Tabulasi nilai laju keausan <i>sintered compact</i> pada 1% vol Mg dan 1.5% vol Mg .....	95
Tabel 4.18 Tabulasi nilai laju keausan <i>sintered compact</i> pada mikro- $\text{Al}_2\text{O}_3$ dan nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	96
Tabel 4.19 Daftar puncak difraksi sinar-X komposit SP2 .....	106
Tabel 4.20 Daftar puncak difraksi sinar-X komposit SP15 .....	106



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mikrografi serbuk Al dan Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (a) Al, (b) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3 μm, (c) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 12 μm, (d) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 48 μm .....	7
Gambar 2.2 Efek variasi suhu sintering terhadap (a) ultimate tensile strength, dan (b) hardness .....	8
Gambar 2.3 (a) Size kristal, (b) mikrostrain, (c) regangan kisi dari komposit Al-Cu-Mg/WC dengan variasi suhu sintering.....	9
Gambar 2.4 Mikrografi SEM dari partikel Alumina dengan komposisi (a) Al-2wt%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , dan (b) Al-4wt%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	10
Gambar 2.5 Diagram alir proses metalurgi serbuk .....	14
Gambar 2.6 Rute proses metalurgi serbuk (P/M).....	16
Gambar 2.7 Skema proses kompaksi serbuk logam.....	20
Gambar 2.8 Ilustrasi pertumbuhan ikatan antar partikel sampel selama proses sinter.....	22
Gambar 2.9 Tahap pertama proses sinter pada (a)partikel awal (b) penyusunan kembali (c)terbentuknya formasi necking .....	23
Gambar 2.10 Pertumbuhan necking dengan (a) peningkatan level penyusutan (b) batas butir semakin memanjang, (c) pertumbuhan butir terus berlanjut dan batas butir meluas .....	24
Gambar 2.11 Pertumbuhan necking dengan (a)discontinues pore - phase (b)butir disertai porositas yang mengecil (c)pertumbuhan butir.....	24
Gambar 2.12 Simbol periodik unsur aluminium.....	26
Gambar 2.13 Simbol periodik unsur tembaga .....	27
Gambar 2.14 Simbol periodik unsur magnesium.....	28
Gambar 2.15 Aluminum oksida (alumina).....	29
Gambar 2.16 Berbagai tipe bentuk serbuk.....	31
Gambar 2.17 Beberapa produk AMCs berpenguat alumina (a)flywheel (b)ring penahan (c)brake calliper (d)control hydraulic manifold .....	35
2.18 Ilustrasi shrinkage pada setiap fasa .....	38
2.19 Skema pengujian keausan .....	41
2.20 Skema prinsip dasar SEM .....	43



Gambar 2.21 Skema instrument (a) skema instrumen SEM yang lebih detail, (b) skema SEM yang disederhanakan .....	44
Gambar 2.22 Pemantulan cahaya pada bidang kristal (bidang Bragg) .....	46
Gambar 2.23 Skema ilustrasi FWHM dari profil puncak XRD.....	46
Gambar 3.1 Visual aluminium powder pada (a) visual butir, (b) <i>packing</i> Al powder Merck .....	47
Gambar 3.2 Visual Cu powder pada (a)visual butir (b) <i>packing</i> Cu powder Merck .....	48
Gambar 3.3 Visual Mg powder pada (a)visual butir (b) <i>packing</i> Mg powder Merck .....	49
Gambar 3.4 Visual nano-alumina (a)visual butir (b) <i>packing</i> nano-alumina.....	49
Gambar 3.5 Visual mikro-alumina (a)visual butir (b) <i>packing</i> mikro-alumina...	50
Gambar 4.1 Struktur morfologi serbuk bahan penelitian (a)aluminium (b)tembaga (c)magnesium (d)mikro- $\text{Al}_2\text{O}_3$ (e)nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	65
Gambar 4.2 Campuran serbuk dari Al-Cu-Mg- $\text{Al}_2\text{O}_3$ (a) Al-Cu-Mg-mikro- $\text{Al}_2\text{O}_3$ (b) Al-Cu-Mg-nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	67
Gambar 4.3 Mapping SEM-EDS serbuk paduan Al-Cu-Mg-mikro $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	67
Gambar 4.4 Mapping SEM-EDS Paduan Al-Cu-Mg-nano $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	68
Gambar 4.5 Tampilan visual sintered compact pada temperatur sinter 500°C ...	69
Gambar 4.6 Tampilan visual sintered compact pada temperatur sinter 550°C ...	70
Gambar 4.7 Tampilan visual sintered compact pada temperatur sinter 600°C ...	70
Gambar 4.8 Pengaruh variasi persentase volume komposisi magnesium terhadap densitas relatif <i>green compact</i> .....	72
Gambar 4.9 Pengaruh ukuran butir penguat ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) terhadap densitas relatif <i>green compact</i> .....	73
Gambar 4.10 Pengaruh suhu sintering terhadap densitas relatif <i>sintered compact</i> .....	75
Gambar 4.11 Pengaruh variasi persentase volume komposisi magnesium terhadap densitas relatif <i>sintered compact</i> .....	76
4.12 Pengaruh ukuran butir penguat ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) terhadap densitas relatif <i>sintered compact</i> .....	78



Gambar 4.13 Pengaruh suhu sintering terhadap nilai porositas <i>sintered compact</i> .....	80
Gambar 4.14 Pengaruh variasi jumlah komposisi magnesium terhadap porositas <i>sintered compact</i> .....	81
Gambar 4.15 Pengaruh ukuran partikel alumina terhadap porositas <i>sintered compact</i> .....	83
Gambar 4.16 Pengaruh temperatur sinter terhadap tingkat shrinkage <i>sintered compact</i> .....	85
Gambar 4.17 Pengaruh variasi jumlah komposisi magnesium terhadap nilai <i>shrinkage sintered compact</i> .....	86
Gambar 4.18 Pengaruh ukuran partikel alumina terhadap nilai <i>shrinkage sintered compact</i> .....	87
Gambar 4.19 Pengaruh suhu sintering terhadap kekerasan mikro <i>sintered compact</i> .....	89
Gambar 4.20 Pengaruh variasi persentase volume komposisi magnesium terhadap kekerasan mikro .....	91
Gambar 4.21 Pengaruh ukuran butir penguat ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) terhadap kekerasan mikro .....	92
Gambar 4.22 Pengaruh suhu sintering terhadap laju keausan <i>sintered compact</i>	94
Gambar 4.23 Pengaruh variasi persentase volume komposisi magnesium terhadap laju keausan .....	95
Gambar 4.24 Pengaruh ukuran butir penguat ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) terhadap laju keausan ...	96
Gambar 4.25 Visual struktur mikro komposit paduan SP 2 (1% vol Mg, mikro $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) pada (a) perbesaran 100 $\mu\text{m}$ (b) perbesaran 20 $\mu\text{m}$ ..	97
Gambar 4.26 Visual struktur mikro komposit paduan SP 15 (1.5% vol Mg, nano $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) pada (a) perbesaran 100 $\mu\text{m}$ (b) perbesaran 20 $\mu\text{m}$ ...	97
Gambar 4.27 Spektrum EDS SP 2 (1% vol Mg, mikro $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) .....	99
Gambar 4.28 Spektrum EDS SP 15 (1.5% vol Mg, nano $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) .....	99
Gambar 4.29 Mapping unsur penyusun komposit SP 2 (1% vol Mg, mikro $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) .....	101
4.30 Mapping unsur penyusun komposit SP 15 (1.5% vol Mg, nano $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) .....	102



Gambar 4.31 Pola difraksi sinar-X pada komposit SP2 (Al-4.5Cu-1Mg-1mikroAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	105
Gambar 4.32 Pola difraksi sinar-X pada komposit SP15 (Al-4.5Cu-1.5Mg-1nanoAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	105
Gambar 4.33 Mapping unsur penyusun komposit SP 2 (1% vol Mg, mikroAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	108
Gambar 4.34 Mapping unsur penyusun komposit SP 15 (1.5% vol Mg, nanoAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	109



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan Beban Kompaksi .....	110
Lampiran 2 Perhitungan Densitas Teoritis .....	111
Lampiran 3 Perhitungan Volume & Berat Komposit Matriks Aluminium .....	112
Lampiran 4 Estimasi Ukuran Serbuk Bahan Baku .....	114
Lampiran 5 Fotografi Visual Green Compact & Sintered Compact .....	119
Lampiran 6 Tabulasi Nilai Densitas & Densitas Relatif Green Compact .....	120
Lampiran 7 Tabulasi Nilai Densitas & Densitas Relatif Sintered Compact ....	121
Lampiran 8 Tabulasi Nilai Porositas Sintered Compact .....	122
Lampiran 9 Tabulasi Nilai Penyusutan Sintered Compact.....	123
Lampiran 10 Tabulasi Data Penelitian (Sifat Fisis) .....	124
Lampiran 11 Tabulasi Data Nilai Kekerasan Mikro Sintered Compact.....	125
Lampiran 12 Tabulasi Data Nilai Laju Keausan Sintered Compact .....	128
Lampiran 13 Tabulasi Data Penelitian (Sifat Mekanis) .....	129



## DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang / Singkatan	Arti dan Keterangan
MMCs	= Metal Matrix Composite
AMCs	= Aluminium Matrix Composite
Al	= Aluminium
Cu	= Tembaga
Mg	= Magnesium
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	= Alumina / Aluminium oksida
TRS	= Transverse Rupture Strength
CNT	= Carbon Nanotube
P/M	= Powder Metallurgy
STP	= Standard of Temperature and Pressure
ISO	= International Standard Organization
ASTM	= American Standard Testing and Material
CFAMCs	= Continuous Fibre Aluminum Matrix Composite
ROM	= Rule of Mixture
FWHM	Full Width of Half Maximum
$\rho_c$	= Densitas Komposit ( $\text{gram}/\text{cm}^3$ )
$\rho_m$	= Densitas Matriks
$\rho_f$	= Densitas Filler
$V_m$	= Volume Matriks
$V_f$	= Volume Filler
$\varepsilon$	= Porositas
$m_k$	= massa sampel setelah dikeringkan di dalam oven (gram)
$m_b$	= massa sampel setelah direndam di dalam air (gram)
HV	= Nilai kekerasan skala Vickers
R	= Radius lintasan pengujian (m)
N	= Kecepatan putar (rpm)
t	= periode pengujian keausan (menit)



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Peningkatan teknologi komposit dalam dunia industri material mengalami perkembangan yang sangat cepat. Komposit Matriks Logam (*MMC's*) adalah satu dari beberapa jenis komposit yang banyak digunakan dalam industri luar angkasa, otomotif, kelautan, persenjataan, dll., dikarenakan sifat mekanisnya yaitu densitas yang rendah, koefisien ekspansi thermal yang rendah, konduktivitas thermal, kekakuan, kekuatan dan ketahanan aus yang tinggi [1]. *Aluminium Matriks Composite* merupakan salah satu bentuk *MMC's* yang paling dominan digunakan karena sifat Aluminium paduan yang menawarkan keunggulan yaitu mampu menghasilkan komposit yang tahan terhadap kelelahan material, tegangan dan korosi yang lebih baik, serta peningkatan kekuatan dan ketangguhan pada suhu kamar maupun suhu tinggi [2].

Metalurgi serbuk adalah metode fabrikasi logam yang paling menjanjikan dan cocok untuk fabrikasi *Aluminium Matriks Composite* (*AMC's*) dibandingkan dengan metode manufaktur lainnya. Metode ini memastikan keterbasahan yang optimal antara matriks dan *reinforcement*, struktur mikro homogen dari *MMC* yang dibuat dan mencegah pembentukan fase yang tidak diinginkan [3]. Metalurgi serbuk adalah metode produksi yang cukup populer dengan aneka macam inovasi teknologi material pada dunia industri. Metalurgi serbuk pun telah menjadi cabang ilmu material yang cukup banyak diaplikasikan.

Ilmu material yang memakai serbuk logam sebagai bahan baku tanpa melalui proses casting atau ekstrusi disebut metalurgi serbuk. Tahapannya, material serbuk di komaksi sesuai dengan bentuk cetakan. Kemudian material dipanaskan hingga tercipta ikatan antar partikel yang kuat dan rapat. Proses pemanasan di setting pada suhu tertentu dan umumnya dibawah dari titik lebur material sampel. Metode



serbuk umumnya diminati karena penggunaan energi dengan metode ini tidak terlalu besar serta produk yang dapat langsung dibentuk sesuai dengan yang diinginkan [4].

Teknologi metalurgi serbuk memiliki serangkaian keunggulan yang dapat ditawarkan, seperti penghematan energi yang signifikan, penghematan bahan, akurasi produk yang tinggi, stabilitas yang baik, dan sangat cocok untuk produksi massal [3]. Komposisi material untuk komponen yang dibuatnya pun lebih bervariasi dibandingkan dengan menggunakan teknik pengecoran ataupun dengan cara lainnya, sehingga dapat dihasilkan komponen dengan komposisi yang diperkirakan akan sesuai dengan keperluan teknis dari komponen yang akan dibuat. Selain itu, beberapa bahan dan bagian kompleks yang tidak dapat disiapkan dengan metode pengecoran konvensional dan metode pemrosesan mekanis, juga dapat diproduksi oleh teknologi metalurgi serbuk [5]. Namun proses manufaktur komponen dengan metode metalurgi serbuk pada industri masih belum sepenuhnya dikuasai, berbanding terbalik dengan pengaplikasian dari material berbasis metal pada sektor fabrikasi yang cukup populer di Indonesia, dan juga semakin banyaknya kebutuhan masyarakat yang berhubungan dengan logam, dikarenakan pelaku industri manufaktur memiliki kendala seperti bahan baku yang banyak belum tersedia di dalam negeri.

Paduan aluminium – tembaga memang cukup menarik untuk diteliti dikarenakan popularitas penggunaannya dalam aplikasi industri manufaktur seperti struktur pesawat, rivet, roda truk dan produk mesin sekrup. Matli et al. [6] memvariasikan komposisi partikulat tembaga sebanyak 3, 6, dan 9 % vol yang kemudian dicampur menggunakan ball milling diikuti dengan penggunaan variasi teknik vacuum sintering dan *microwave sintering*. Pengaruh kandungan Cu dan metode sintering pada struktur mikro dan perilaku mekanis komposit pun diteliti. Hasilnya spesimen yang di sinter *microwave sintering* memiliki karakter mekanis lebih optimal dibandingkan pada *vacuum sintering*. Selanjutnya dengan peningkatan komposisi volume partikulat Cu akan meningkatkan compressive strength dan kekerasan mikro komposit. dan ini dapat dianggap sebagai penguatan dari partikel Cu yang lebih keras. Gokce et al. [7] juga telah meneliti tentang perbandingan densitas terhadap komposit Aluminium murni dengan komposit

Al5Cu dan Al5Cu0.5Mg. Komposit disinter dengan suhu 600°C selama 2 terjadi peningkatan densitas pada komposit paduan Al5Cu dan Al-5%Cu- Penambahan tembaga dan magnesium kedalam Aluminium juga



meningkatkan nilai *transverse rupture strength* (TRS) dan nilai kekerasan komposit paduan.

Aluminium oksida atau biasa dikenal dengan nama alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) adalah penguat utama dalam penelitian ini. Dibandingkan partikel keramik lainnya, Alumina cukup populer penggunaannya di dunia industri. Alumina mempunyai stabilitas thermal yang lebih baik pada suhu tinggi. Maka dari itu, alumina banyak dipilih untuk menjadi penguat AMCs dikarenakan alumina yang bersifat keras, sangat tahan terhadap sifat basa dan asam, memungkinkan di aplikasi dalam temperatur kerja yang sangat tinggi, serta tahan terhadap keausan [8]. Abbas et al. [9] melakukan penelitian terhadap paduan Aluminium ( $\text{Al-4.5\%Cu-1.5\%Mg}$ ) dengan menggunakan variasi berat  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yaitu sebanyak 1, 3, dan 5% berat nanopartikel dengan metode metalurgi serbuk. Abbass et al. membandingkan kekerasan dan ketahanan korosi dari variasi penambahan Alumina (1%,3%,5%) dengan penambahan alumina. Hasilnya menunjukkan semakin banyak jumlah volume komposisi alumina maka akan semakin bertambah kekerasan dan ketahanan korosi dari paduan komposit.

Berdasarkan penelitian-penelitian yang dilakukan sebelumnya, cukup banyak peneliti yang melakukan eksperimen tentang efek temperatur sintering serta variasi komposisi penguat yaitu alumina terhadap serbuk logam Aluminium yang menjadi sampel matriks dengan metode fabrikasi metalurgi serbuk. Hanya saja, masih jarang peneliti yang melakukan penelitian terhadap serbuk Aluminium paduan Tembaga dengan berpenguat Alumina. Padahal menurut Rodríguez [10] dan Zlaticanin [11], paduan Al-Cu-Mg telah banyak digunakan dalam industri kedirgantaraan dan juga fabrikasi bagian struktur dalam industri transportasi. Namun pengembangan dari material ini merupakan tantangan dalam ilmu material yang cukup menjanjikan untuk saat ini. Komposit matriks aluminium (AMC) telah banyak digunakan dipelajari karena kepadatannya yang rendah, fisiknya yang baik dan sifat mekanik, ketahanan korosi yang baik, konduktivitas termal dan listrik yang tinggi. Penambahan penguat ke dalam komposit matriks aluminium (AMCs)



meningkatkan kekakuan, kekuatan spesifik, sifat keausan, mulur dan ketahanan korosi dibandingkan dengan bahan rekayasa konvensional [12].

Komposit paduan Al-Cu-Mg maupun paduan Al- $\text{Al}_2\text{O}_3$  merupakan komposit

yang cukup banyak digunakan dalam dunia industri. Penelitian yang dilakukan adalah untuk menguasai metode pembuatan komposit paduan dari aluminium, tembaga, magnesium dan alumina melalui teknik metalurgi serbuk. Penguasaan teknologi pembuatan material komposit Al-Cu-Mg-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dapat mengatasi kebutuhan manusia terhadap produk-produk berkualitas seperti komponen atau suku cadang otomotif (*automotive push rod, flywheel, dan brake callipers*) dan kebutuhan rumah tangga serta kemajuan industri transportasi, maritim, penerbangan, dan militer.

Dari beberapa referensi penelitian yang dilakukan peneliti-peneliti sebelumnya serta manfaat yang diberikan dari pengembangan material komposit, maka penelitian mengenai efek temperatur sinter, ukuran serbuk penguat dan fraksi komposisi magnesium terhadap komposit Al-Cu-Mg-Alumina memiliki potensi yang cukup menjanjikan serta memiliki peluang yang sangat besar untuk diaplikasikan dalam dunia industri. Berdasarkan faktor-faktor tersebut, peneliti akan melakukan riset dengan judul **“Efek dari suhu sintering, ukuran serbuk alumina dan komposisi magnesium pada komposit Al-Cu-Mg-Alumina terhadap sifat fisis, mekanis dan struktur mikro di produksi dengan metalurgi serbuk”**. Penulis berharap proposal penelitian ini dapat menjadi pertimbangan dalam meneliti teknologi fabrikasi dengan menggunakan metode metalurgi serbuk.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan analisis latar belakang dan pengamatan terhadap penelitian-penelitian sebelumnya, dapat dirumuskan beberapa permasalahan yang dapat di kaitkan dengan penelitian ini, sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh dari suhu sinter, fraksi komposisi wetting agent (magnesium) dan ukuran serbuk penguat (alumina) terhadap sifat fisis (densitas, porositas, shrinkage) dari komposit Al-Cu-Mg-alumina yang di buat dengan metode metalurgi serbuk ?
2. Bagaimana pengaruh dari suhu sinter, fraksi komposisi wetting agent (magnesium) dan ukuran serbuk penguat (alumina) terhadap perilaku mekanis (kekerasan mikro, nan aus) dari komposit Al-Cu-Mg-Alumina yang di buat dengan metode metalurgi serbuk ?



3. Bagaimana pengaruh dari temperatur sintering, fraksi komposisi wetting agent (magnesium) dan ukuran serbuk penguat (alumina) terhadap mikrostruktur dan pembentukan fasa dari komposit Al-Cu-Mg-Alumina yang di buat dengan metode metalurgi serbuk ?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini yaitu :

1. Mengetahui pengaruh dari temperatur sintering, fraksi komposisi wetting agent (magnesium) dan ukuran serbuk penguat (alumina) terhadap sifat fisis (densitas, porositas, shrinkage) dari paduan komposit Al-Cu-Mg-Alumina menggunakan metode metalurgi serbuk;
2. Mengetahui pengaruh dari temperatur sintering, fraksi komposisi wetting agent (magnesium) dan ukuran serbuk penguat (alumina) terhadap sifat mekanis (kekerasan mikro, ketahanan aus) dari paduan komposit Al-Cu-Mg-Alumina menggunakan metode metalurgi serbuk;
3. Mengetahui pengaruh dari temperatur sintering, fraksi komposisi wetting agent (magnesium) dan ukuran serbuk penguat (alumina) terhadap struktur mikro dan pembentukan fasa dari paduan komposit Al-Cu-Mg-Alumina menggunakan metode metalurgi serbuk.

### 1.4 Manfaat Penelitian

Setiap riset tentu diharapkan mampu memberikan manfaat yang lebih dari penelitian-penelitian sebelumnya. Begitu pula hasil dari penelitian ini yang diharapkan mampu memberikan manfaat, sebagai berikut :

1. Penelitian ini dapat memberikan banyak kontribusi dalam kemajuan teknologi industri manufaktur, khususnya rekayasa material komposit;
2. Penelitian ini mampu memberikan acuan dalam menentukan temperatur sinter, fraksi komposisi wetting agent (magnesium) dan ukuran serbuk penguat alumina ( $Al_2O_3$ ) yang optimal, dari komposit Al-Cu-Mg-Alumina yang diproses dengan metode metalurgi serbuk;



Penelitian ini menambah referensi pembelajaran bagi pelajar ataupun mahasiswa studi mengenai komposit matrik aluminium.

## 1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini akan membatasi beberapa parameter, agar tujuan penelitian yang diinginkan tercapai dengan maksimal. Batasan masalah di rincikan sebagai berikut:

1. Penelitian ini menggunakan variasi temperatur sintering (500°C, 550°C, 600°C), fraksi komposisi magnesium (1%, 1.5%) dan ukuran serbuk alumina (56 µm dan 20 nm) terhadap material komposit;
2. Serbuk uji yang digunakan adalah Aluminium (Al), Tembaga (Cu), Magnesium (Mg) dan Aluminium Oksida/Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>);
3. Ukuran butir Aluminium, Tembaga, dan Magnesium dianggap konstan;
4. Temperatur pre-sinter konstan yaitu 200°C dengan waktu penahanan 30 menit;
5. Waktu Sintering yang diaplikasikan selama 60 menit dengan variasi temperatur 500°C, 550°C, dan 600°C;
6. Tekanan kompaksi yang digunakan adalah 200 Mpa;
7. Pengujian sifat fisis hanya dibatasi pada pengujian densitas, porositas, dan penyusutan/shrinkage;
8. Perilaku mekanis komposit hanya diuji pada tingkat kekerasan mikro (metode Vickers) dan perilaku laju keausan (*Abrasive Test* via pin on disc);
9. Pengujian struktur mikro hanya dibatasi pada pengujian *Scanning Electron Microscope* yang terintegrasi EDS (kualitatif/kuantitatif, mapping) dan X-Ray Diffraction.

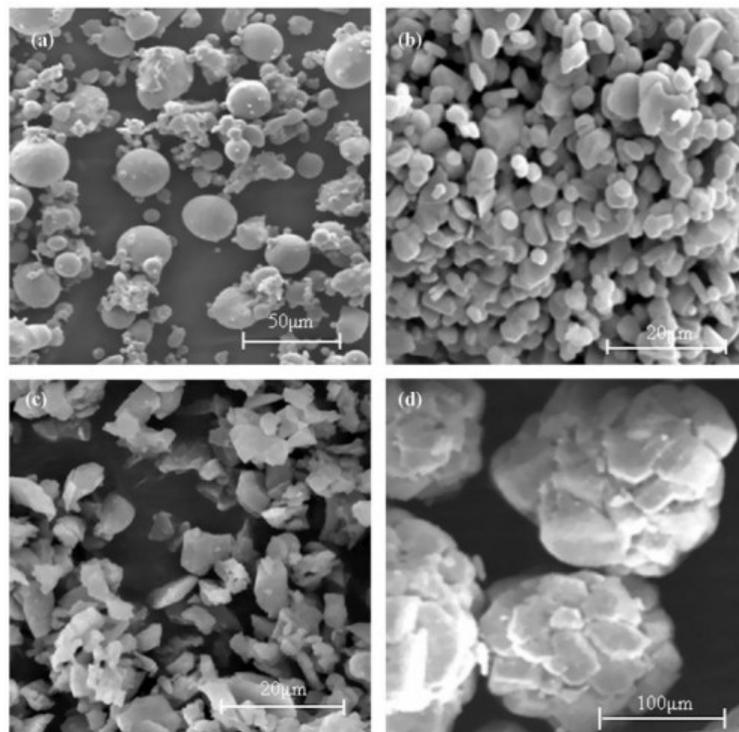


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Tinjauan Penelitian Sebelumnya

Rahimian et al. [13] juga telah melakukan penelitian terhadap aluminium berpenguat alumina dengan menggunakan variasi ukuran partikel alumina yaitu 3, 12, dan 48  $\mu\text{m}$ , temperatur sintering (500°C, 600°C) dan waktu sintering (30, 60, 90 menit). Berdasarkan penelitiannya, ditemukan sebuah korelasi antara ukuran serbuk dan sifat mekanik komposit. Semakin berkurang ukuran serbuk alumina maka akan meningkatkan densitas dan kekerasan mikro komposit serta menurunkan porositas yang terbentuk. Akan tetapi perilaku sebaliknya terjadi dengan waktu sinter, dimana pada waktu sintering selama 90 menit, terjadi perbesaran ukuran partikel, mengurangi densitas, memicu terbentuknya porositas dan imbasnya akan menurunkan tingkat kekerasan material. Pengaruh fraksi volume alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dan beban pemadatan terhadap sifat fisis aluminium berpenguat alumina juga telah diteliti oleh peneliti lainnya.

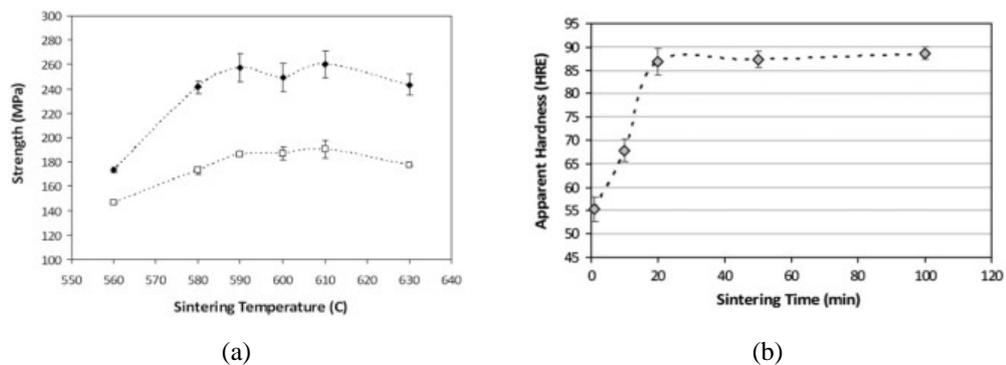


r 2.1 Mikrografi serbuk Al dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (a) Al, (b)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  3  $\mu\text{m}$ , (c)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  12  $\mu\text{m}$ , (d)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  48  $\mu\text{m}$  [14]



Nuruzzaman et al. [15] melakukan percobaan dengan membuat tiga sampel matriks aluminium-alumina dengan variasi kandungan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sebesar 10%, 20%, dan 30% serta variasi tekanan pemadatan sebesar 15 dan 20 ton. Hasilnya, dengan peningkatan beban pemadatan dari 15 ton menjadi 20 ton, terjadi peningkatan densitas. Pada peningkatan fraksi fraksi volume Alumina, densitas juga mengalami peningkatan tetapi setelah mengalami proses sintering, densitas sampel dengan beban kompaksi 20 ton lebih kecil daripada dengan beban 15 ton. Berbeda dengan pengujian metode rockwell yang menunjukkan dengan kompaksi sebesar 20 ton akan meningkatkan densitas pada sampel dibandingkan kompaksi 15 ton.

Boland et al. [16] meneliti pengaruh dari suhu sintering, waktu sintering dan tekanan kompaksi serta penambahan unsur timah ke dalam logam paduan terhadap struktur mikro dari paduan Aluminium-tembaga-magnesium yang dikerjakan dengan metode metalurgi serbuk. Boland menggunakan variasi temperatur sintering antara  $560^\circ\text{C}$  hingga  $630^\circ\text{C}$  serta waktu sintering antara 1 hingga 100 menit dengan tekanan kompaksi 100 MPa hingga 500 MPa. Hasil terbaik setelah pengujian densitas terjadi pada saat tekanan kompaksi 400 Mpa dan suhu sintering  $600^\circ\text{C}$  selama 20 menit dengan penambahan timah (Sn) pada paduan Al-Cu-Mg.

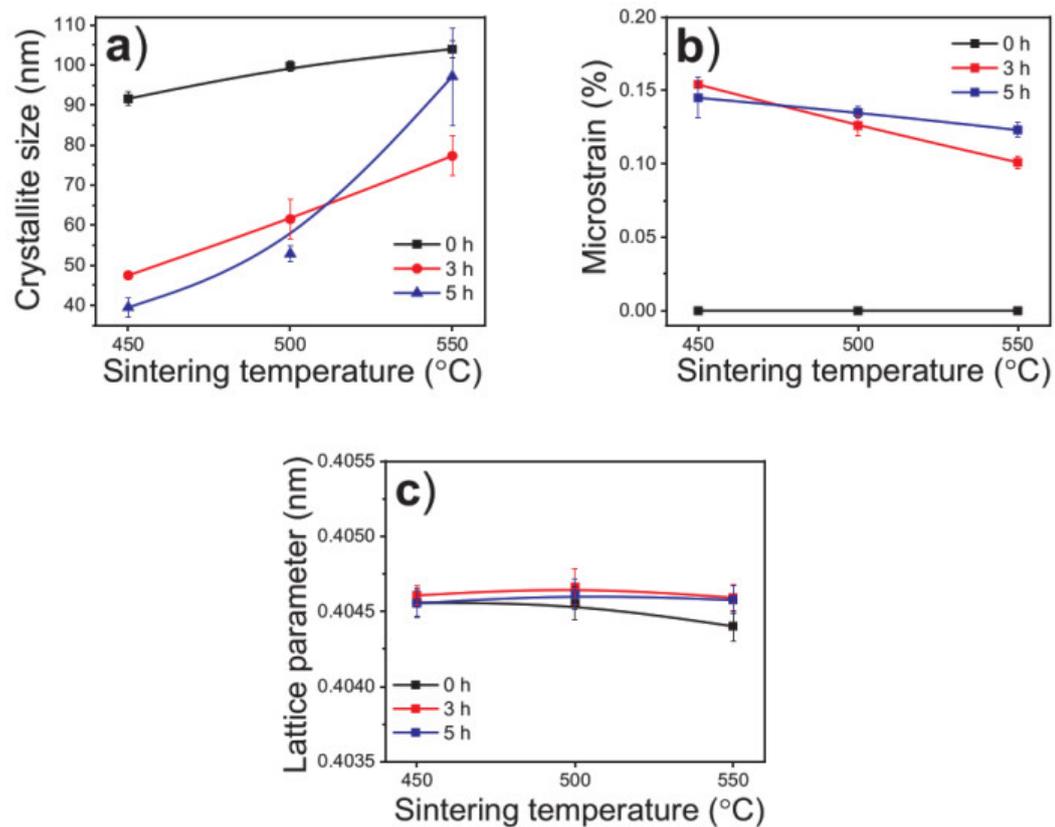


**Gambar 2.2** Efek variasi suhu sintering terhadap (a) ultimate tensile strength, dan (b) hardness [16]

Rodríguez et al. [10] juga melakukan penelitian yang hampir sama yaitu dengan meneliti paduan Al-Cu-Mg yang berpenguat tungsten karbida yang diberikan variasi waktu pengadukan dan suhu sintering terhadap struktur mikro menggunakan pengujian XRD, SEM dan mesin pengujian kekerasan Waktu pengadukan di set selama 3 dan 5 jam serta temperatur sintering  $^\circ\text{C}$ ,  $500^\circ\text{C}$ , dan  $550^\circ\text{C}$ . Hasilnya yang diperoleh adalah terdapat pengaruh



yang kuat antara lama pencampuran sampel dan temperatur sintering terhadap distribusi partikel, morfologi fasa serta densitas. Sampel dengan kualitas terbaik yang digiling selama 3 jam dan disinter pada suhu 450°C dengan menunjukkan hasil porositas paling rendah, material reinforcement tersebar secara homogen, serta terbentuk ikatan yang kuat pada interface dan matriks Al-Cu-Mg.

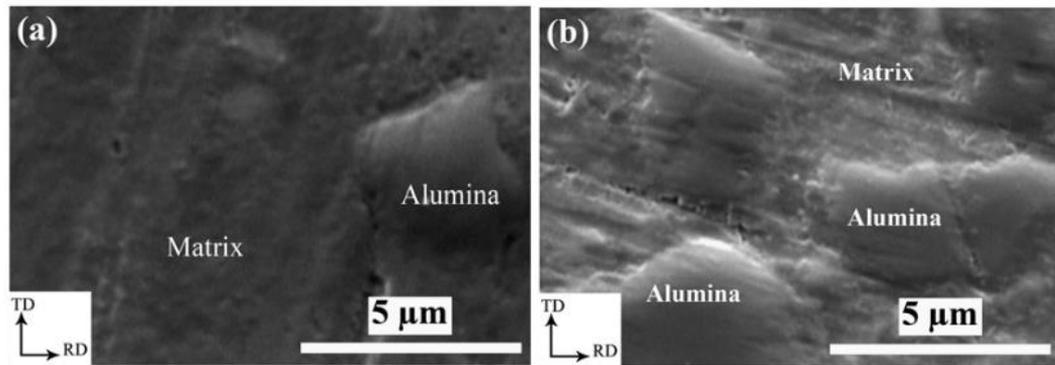


**Gambar 2.3** (a) Size kristal, (b) mikrostrain, (c) regangan kisi dari komposit Al-Cu-Mg/WC dengan variasi suhu sintering [10]

Pitchayyapillai et al. [17] juga melakukan dengan menambahkan variasi penguat alumina sebesar 4%, 8%, dan 12 % dan molybdenum disulphide sebanyak 2%, 4%, dan 6% menggunakan metode *Stir Casting*. Hasil yang sama pun ditunjukkan dengan meningkatnya sifat mekanis yaitu kekerasan dan kekuatan tarik komposit paduan seiring dengan meningkatnya fraksi berat alumina. Zabihi et al. [18] juga memvariasikan fraksi berat Alumina yaitu 2%, 4%, 6%, dan 10% ke



MCs menggunakan kombinasi metode metalurgi serbuk, *mechanical* dan *vacuum hot pressing*. Hasil yang sama pun terjadi yaitu dengan adanya nilai kekerasan serta kekuatan tarik dari komposit.



**Gambar 2.4** Mikrografi SEM dari partikel Alumina dengan komposisi (a) Al-2wt%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan (b) Al-4wt%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [18]

Suwanda et al. [19] juga melakukan penelitian terhadap matriks aluminium dengan menggunakan variasi temperatur sinter, tekanan kompaksi, dan waktu sinter. Hasilnya matriks aluminium memiliki tingkat kekerasan optimal pada tekanan kompaksi 170 Mpa, suhu sinter 500°C, dan waktu sinter selama 50 menit. Dengan kata lain, waktu, temperatur sinter dan tekanan kompaksi mempengaruhi karakter komposit.

## 2.2 Tinjauan Umum Komposit

Teknologi modern memerlukan material bahan yang tidak seperti biasanya dengan kombinasi sifat-sifat yang tidak ditemui dalam bahan paduan logam, keramik dan polimer konvensional. Hal tersebut benar khususnya untuk bahan-bahan yang diperlukan untuk penerbangan dan transportasi di dalam air. Insinyur-insinyur penerbangan sangat mencari bahan struktur yang mempunyai massa jenis rendah, tetapi kuat, kaku, tahan kikisan, tahan pukul, dan tidak mudah berkarat. Sering kali bahan yang kuat relatif berat dengan semakin meningkatnya kekuatan atau kekakuan yang berakibat menurun kekuatan impaknya. Komposisi sifat-sifat bahan diperluas dengan pengembangan bahan-bahan komposit. Komposit termasuk paduan logam multifasa, keramik-keramik, dan polimer-polimer.

Menurut Callister [20] istilah komposit digunakan untuk suatu bahan yang disusun dari material atau unsur, yang mana salah satu menjadi matriks, dan unsur jadi penguat dari matriks tersebut. Sedangkan secara umum, bahan adalah beberapa bahan atau unsur yang berbeda, yang kemudian bahan



material tersebut dicampur sehingga membentuk sebuah material atau komponen tunggal.

Komposit (*composites*) dapat dibagi menjadi tiga jenis: (1) komposit dengan penguat serat, (2) komposit dengan penguat partikel, dan (3) komposit disertai struktur. Komposit diperkuat serat (*fibre reinforced*) terbagi menjadi dua diantaranya serat menerus (*continuous*), serat terputus (*discontinuous*). Sedangkan serat pendek dibagi menjadi searah dan acak (*randomly oriented*). Komposit diperkuat partikel atau diperkuat suatu sebaran (*particles reinforced*) dibagi menjadi dua yaitu partikel keramik dan penguat sebaran. Untuk komposit struktur dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu laminasi dan sandwich panel [21].

Komposit dibentuk bertujuan sebagai berikut:

1. Meningkatkan karakter mekanis atau membentuk karakter tertentu pada material;
2. Memudahkan dalam pembentukan design yang rumit pada proses produksi;
3. Memudahkan pembentukan produk yang akan menghemat biaya;
4. Membentuk karakter material yang lebih dari material aslinya.

Material komposit terbentuk dari fasa yang sifatnya berbeda, yaitu :

1. Fasa yang berfungsi untuk menahan beban utama pada material komposit disebut penguat atau reinforcement.
2. Fasa yang memiliki jumlah mayoritas dalam fraksi volume komposit adalah matrik.

Dalam teknologi komposit, matriks berguna sebagai pengikat yang akan menjaga penguat, mendukung, dan juga dapat menyebarkan beban secara merata pada komposit. Karenanya fasa matrik harus memiliki karakter unsur yang kuat, ulet dan tangguh terhadap beban.

Berdasarkan jenis bahan matrik, komposit yang dapat dibedakan menjadi 3 tipe yaitu :

1. *Polymers Matrix Composite*

Jenis ini adalah yang cukup banyak digunakan. Komposit jenis ini menggunakan resin menjadi matriknya, dan jenis serat tertentu sebagai penguat, yaitu fiberglass dan karbon. Kelebihan dari PMC adalah ringan dan memiliki *tiffness* serta *strength* yang tinggi.



## 2. *Ceramic Matrix Composite*

Material komposit matriks keramik adalah material dengan matriksnya terbentuk dari keramik. Penggunaan material komposit matriks keramik sering diaplikasikan dalam kondisi lingkungan yang bertemperatur tinggi. Kelebihan dari komposit matriks keramik adalah tahan terhadap suhu yang tinggi, karakteristik permukaan yang memiliki ketahanan aus, kekuatan, ketangguhan, serta ketahanan terhadap korosi yang tinggi. Untuk kelemahan dari komposit matriks keramik adalah biaya produksi yang cukup mahal serta cukup sulit untuk diproduksi dalam jumlah massal.

## 3. *Metal Matrix Composites*

Komposit bermatriks logam, biasanya logam-logam non besi atau baja seperti Magnesium, Aluminium, Tembaga, dan Titanium. Matriks logam yang paling umum digunakan adalah dari jenis Aluminium. Kelebihan dari komposit matriks logam adalah transfer dari regangan dan tegangan yang baik, tidak mudah terbakar, ketahanan aus, tahan terhadap temperatur kerja yang ekstrim, *compressive strenght* dan geser yang baik serta pemuaian termal yang lebih baik. Adapun kekurangannya yaitu biaya produksi yang cukup tinggi.

Perubahan dari penggunaan bahan-bahan monolitik menuju penggunaan bahan komposit yang lebih efisien, membuat proses manufaktur produksi komposit semakin bervariasi. Maka dari itu perlu pengembangan dan inovasi khususnya pada bahan komposit agar dapat menjadi lebih baik lagi.

### 2.2 *Metal Matrix Composites (MMCs)*

Komposit matriks logam adalah perpaduan dari beberapa material, dua atau lebih unsur logam - logam ataupun logam – keramik, dengan unsur logam sebagai matriksnya, sedangkan untuk penguat, dapat dari unsur logam maupun partikel keramik. Pengembangan metal matrix composite awalnya untuk manufaktur komponen pesawat, tetapi saat ini telah banyak dikembangkan untuk aplikasi industri komponen otomotif, transportasi, dan lain-lain. Sifat mekanis komposit logam lebih unggul jika dibandingkan dengan unsur logam tunggal seperti besi, aluminium, dan titanium. Kelebihan komposit logam, kekuatan dan modulus elastisitas yang lebih tinggi, lebih tahan keausan, serta koefisien ekspansi termal yang lebih rendah.



Karakter dari MMCs dapat di atur dengan memperhatikan faktor-faktor seperti sifat, bentuk partikel dan fraksi volume dari bahan penguat, karakter dari unsur logam yang menjadi matriks, perilaku bahan penguat pada temperatur kerja yang ekstrim, yang nantinya akan mempengaruhi bentuk pada produk akhir.

Pada umumnya, aluminium dan titanium lebih populer digunakan sebagai matriks komposit MMCs. Densitas yang rendah dan mudah dalam proses fabrikasinya adalah faktor menarik yang membuat aluminium dilirik sebagai unsur utama MMCs karena akan menghasilkan produk akhir yang lebih ringan. Tetapi aluminium memiliki kekurangan seperti kekuatan dan ketahanan terhadap keausan yang rendah, sehingga unsur ini perlu diperkuat dengan bahan lain yang lebih tangguh, sehingga akan meningkatkan kekuatan bagi produk akhir.

Bahan baku yang sering ditambahkan pada matriks aluminium adalah grafit, alumina, silikon karbida, dan CNT, dengan harapan akan meningkatkan karakter dari aluminium yang berperan sebagai matriksnya. Tipe MMCs dapat dibagi menjadi dua jenis berdasarkan jenis penguatnya, yaitu:

#### 1. Reinforced Continuous

Untuk mengoptimalkan kekuatan tarik dari komposit MMCs, akan digunakan penguat dari jenis ini, karena kekuatan tarik akan bertumpu pada fiber-fiber yang di letakkan memanjang pada matriks. Tetapi kekuatan tarik hanya akan lebih optimal bekerja jika dibandingkan dengan pemberian beban secara tegak lurus (transversal) dari arah serat fiber pada komposit. Dan disanalah letak kelemahan dari tipe ini.

#### 2. Reinforced Discontinuous

Penyaluran beban kerja akan lebih merata jika komposit MMCs menggunakan jenis penguat tipe ini. Penguat dari reinforced discontinuous biasanya berbentuk partikel yang mudah menyebar di dalam matriks logam, sehingga kekuatan dari komposit akan merata di seluruh bidang, dengan syarat di perlukan teknik pencampuran (mixing) yang baik agar persebaran penguat dapat maksimal di dalam matriks logam.

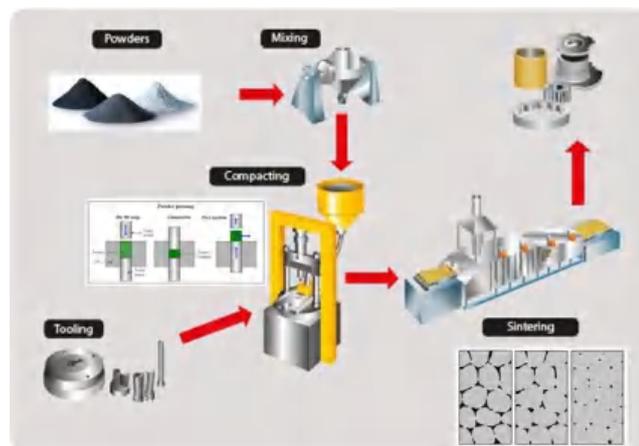


MCs dapat diproduksi dengan berbagai metode seperti casting, hot ekstrusi alurgi serbuk, yang mana pada tipe reinforced discontinuous sangat

memungkinkan untuk menerapkan metode metalurgi serbuk, yang selanjutnya akan dibahas pada subbab berikutnya.

### 2.3 Metalurgi Serbuk

Metode metalurgi serbuk atau sering juga disebut dengan *powder metallurgy* (P/M) adalah sebuah metode manufaktur produk logam yang awalnya hanya berbentuk serbuk logam, yang kemudian serbuk dimasukkan ke dalam cetakan, diberi tekanan dan suhu tertentu (dapat pula hanya menggunakan suhu ruang) hingga serbuk menjadi padat (di istilahkan sebagai *green compact*). Memadatnya serbuk logam dipengaruhi oleh proses difusi atom *interface* partikel. Selain itu untuk menentukan karakter dari produk akhir, diperlukan pengaturan terhadap fraksi massa dan fraksi volume secara teliti dari serbuk yang dipadukan. Setelah proses pemadatan, produk dipanaskan pada suhu tertentu hingga membentuk kepadatan dan ikatan partikel yang optimal pada produk akhir. Gambar 2.5 memperlihatkan tahapan metode metalurgi serbuk secara ringkas.



**Gambar 2.5** Diagram alir proses metalurgi serbuk

Metalurgi serbuk (P/M) tentu memberikan keunggulan lebih dalam membentuk sebuah produk, dimana metode ini mampu memberi nilai ekonomis dengan berdasarkan pemilihan material matriks dan penguat, perlakuan panas, dan lain-lain. Jika dibandingkan proses fabrikasi lainnya, keunggulan proses metalurgi

antara lain:

derhanaan proses fabrikasi yang mampu mempercepat produksi dalam massal;



2. Penggunaan energi termal yang rendah dalam proses konsolidasi atau pemaduan unsur atau bahan yang digunakan;
3. Mampu mengkombinasikan berbagai bahan baku logam, baik logam dengan logam, maupun logam dengan partikel keramik, sesuai dengan karakter produk akhir yang ingin diciptakan;
4. Karakter fisis dan mekanis produk mampu ditentukan dan di kendalikan hanya dengan memilih material bahan bakunya;
5. Ramah lingkungan dan ekonomis karena mampu meminimalisir bahan baku yang terbuang selama proses produksi.

Walaupun metalurgi serbuk memiliki sederet keunggulan dibandingkan metode produksi logam yang lain, tetap saja metode ini memiliki kelemahan-kelemahan sebagai berikut:

1. Rawan terjadi porositas pada produk;
2. Perlunya penanganan khusus pada penyimpanan serbuk bahan baku agar tidak terjadi oksidasi yang akan mempengaruhi kualitas dari serbuk itu sendiri;
3. Terbatasnya dimensi dari produk karena keterbatasan kemampuan dari mesin press dan pemanasan pada tahap sinterisasi.

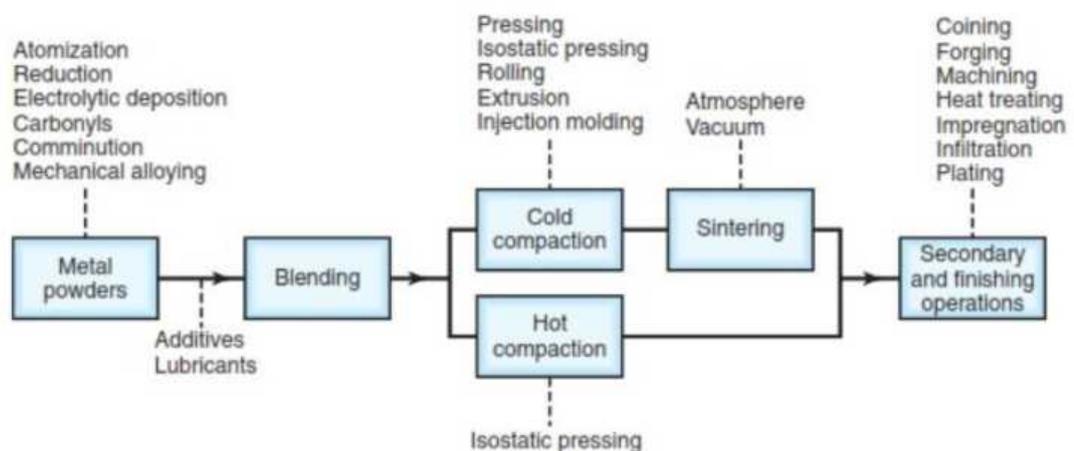
Untuk memperoleh karakter sesuai yang diinginkan pada produk akhir komposit, tentu harus dilakukan pemilihan dengan teliti terhadap serbuk yang akan digunakan. Penggunaan hanya satu jenis serbuk dari MMCs tidak memerlukan proses mixing sebelum tahapan kompaksi, tetapi dengan hanya menggunakan satu material saja, tidak akan meningkatkan sifat dari produk. Maka dari itu, umumnya digunakan beberapa jenis serbuk dan mencampurkannya menjadi satu komposisi serbuk sehingga diharapkan mampu mengubah karakteristik dari serbuk sebelum dilakukan pencampuran. Pencampuran akan sangat penting jika paduan logam menggunakan berbagai macam unsur non logam. Pencampuran serbuk harus dilakukan pada area khusus dan alat tertentu guna mencegah terjadinya oksidasi atau kecacatan.

Untuk mengurangi tingkat gesekan terhadap dinding cetakan, memudahkan pengeluaran produk (ejeksi) dan meningkatkan kecepatan produksi, maka digunakan pelumas yang dioleskan pada dinding cetakan. Namun dengan menggunakan pelumas, akan memberikan peluang terbentuknya porositas pada



produk. Jenis pelumas yang umum digunakan adalah lithium stearat, serbuk grafit dan asam stearat.

Pemberian kontrol yang teliti terhadap komposisi unsur yang digunakan, dan tipe campuran tertentu yang tidak dapat di fabrikasi dengan proses produksi semisal hot ekstrusion ataupun casting, menjadikan metode metalurgi serbuk menjadi solusi atas problema tersebut. Gambar 2.6 menjelaskan garis besar dari alur metode metalurgi serbuk ini beserta alternatif-alternatif yang diberikan dalam setiap tahapannya.



**Gambar 2.6** Rute Proses Metalurgi Serbuk (P/M)

### 2.3.1 Preparasi Bahan / Pembuatan Serbuk

Awal dari metode P/M adalah mempersiapkan material serbuk yang akan digunakan. Tahapan ini menjadi sangat penting karena sangat mempengaruhi karakter dari produk akhir nantinya. Maka dari itu, perlu diketahui secara detail sifat-sifat khusus dari serbuk dan metode-metode yang digunakan dalam membentuk serbuk itu sendiri, sebagai berikut:

**Sifat serbuk logam.** Serbuk logam yang menjadi bahan baku utama dalam metode P/M, masing-masing memiliki sifat-sifat khusus yang akan sangat mempengaruhi karakter akhir produk dan yang perlu diperhatikan, antara lain:



n partikel

e pengayakan atau pengukuran menggunakan *scanning electron microscope* sering digunakan mengetahui ukuran dari partikel suatu unsur. Tabel

2.1 menunjukkan ukuran umum dari sebuah partikel dalam standar FEPA dan US serta dikonversi dalam ukuran micron. Terdapat sebuah kecenderungan bahwa ukuran partikel yang semakin kecil akan mempengaruhi level porositas yang terbentuk serta luas kontak interface akan semakin besar sehingga memaksimalkan nilai densitas dari komposit.

**Tabel 2.1** Standar US dan FEPA untuk ukuran butir [22]

US standart mesh	European standart (FEPA standart)	Main friction grain size, micrometers
100/120	D 151	150 – 125
120/140	D 126	125 – 106
140/170	D 107	106 – 90
170/200	D 91	90 – 75
200/230	D 76	75 – 63
230/270	D 64	63 – 53
270/325	D 54	53 – 45
325/400	D 46	45 – 38

## 2. Bentuk partikel

Morfologi dari suatu partikel akan mempengaruhi pembentukan karakter suatu komposit. Semakin seragam bentuk partikel penyusun tentu akan meningkatkan densitas dan meminimalisir porositas yang terbentuk.

## 3. Distribusi atau kemampuan alir

Mampu alir adalah karakter serbuk yang mampu mengisi celah-celah antar partikel terutama pada saat tahap kompaksi dan sintering.

## 4. Kemampuan sinter

Adalah kemampuan partikel serbuk untuk mengikat antar partikelnya dengan menggunakan panas yang diterima, terutama pada tahap sintesisasi.

## 5. Kompresibilitas

Perbandingan dari volume serbuk sebelum di kompaksi atau di tekan dan setelah melalui proses kompaksi atau penekanan disebut kompresibilitas. Nilai kompresibilitas setiap serbuk akan menjadi berbeda sesuai dengan ukuran dan bentuk partikelnya.

## 6. Sifat kimia



metode P/M diutamakan menggunakan partikel serbuk yang tidak idasi sehingga tidak mempengaruhi ikatan antar partikel matriks dan at. Jika oksidasi terbentuk, perlu ditambahkan unsur yang mampu

mereduksi oksidasi sehingga proses ikatan matriks – penguat mampu berjalan optimal.

**Metode produksi serbuk.** Metode yang digunakan dalam memproduksi serbuk tentu akan mempengaruhi sifat-sifat serbuk itu sendiri, seperti ukuran, bentuk, kemampuan alir dan sifat kimia. Berikut ini dirincikan beberapa metode produksi serbuk yang umum digunakan, yaitu:

1. Electrolytic Deposition, adalah proses elektrolisis yang umumnya menghasilkan serbuk rapuh namun reaktif. Hasil electrolytic deposit selanjutnya masih perlu diberikan proses pemanasan khusus dan produk serbuk yang dihasilkan biasanya berbentuk dendritik.
2. Decomposition adalah metode yang akan diterapkan pada unsur logam dengan cara memisahkan elemen-elemennya menggunakan temperatur suhu yang relatif cukup tinggi dan menggunakan reaktan berupa *reducing agent* dan senyawa metal.
3. Mechanical processing of solid materials adalah metode penghancuran material yang biasanya menggunakan *ball milling* dan digunakan pada material (keramik atau logam) yang memang mudah hancur.
4. Atomization of liquid metals adalah metode dengan mencairkan suatu material lalu mengalirkannya ke dalam nozzle yang dilalui udara bertekanan tinggi sehingga akan tercipta butiran-butiran kecil sebagai produk serbuk akhir.

### 2.3.2 Pencampuran (*mixing*)

Demi menambah karakter fisis dan mekanis suatu komposit, maka dilakukan proses pencampuran (*mixing*) dengan menambahkan material / bahan, baik logam maupun keramik, yang memiliki sifat berbeda dengan unsur logam utama. Begitu pun dengan proses *mixing* yang diatur sedemikian rupa untuk memastikan homogenitas hasil pencampuran. Proses *mixing* dapat melalui metode pencampuran kering (*dry mixing*) maupun metode pencampuran basah (*wet mixing*).



Penambahan pelarut polar pada tahap pencampuran unsur matriks dan bahan serbuk dapat dengan metode pencampuran basah (*wet mixing*). Pelarut polar memudahkan proses pencampuran dengan cara melapisi lapisan partikel

dari material sehingga tidak mudah terjadi oksidasi pada partikel dikarenakan serbuk yang memiliki kontak dengan udara luar.

Sedangkan pada metode pencampuran kering, tidak diperlukan pelarut polar dalam proses pencampuran dan unsur atau material dapat langsung dicampurkan pada alat mixing secara kering. Metode ini dapat digunakan jika unsur atau material yang dicampur merupakan bahan yang tidak mudah teroksidasi.

Terbentuknya campuran serbuk yang homogen merupakan faktor paling penting dalam tahap mixing. Kecepatan alat pencampur, durasi pencampuran, ukuran partikel, temperatur kerja saat proses pencampuran, dan tipe alat pencampur sangat mempengaruhi hasil akhir dari proses mixing. Contohnya, dengan menambah durasi pencampuran, meningkatkan kecepatan putar alat pencampur, serta memilih serbuk yang ukuran partikelnya lebih kecil maka akan distribusi partikel dalam campuran menjadi lebih seragam atau homogen. Hal ini juga akan mempengaruhi proses kompaksi nantinya karena ikatan partikel yang homogen menjadi lebih baik dan terdistribusi merata saat diberi gaya tekan.

### 2.3.3 Penekanan / Pematatan (*Powder Compaction*)

Tahap pembentukan logam dengan cara memasukkan serbuk logam ke dalam cetakan dan kemudian memberi tekanan terhadap serbuk disebut proses kompaksi. Kekuatan tekanan yang diberikan nantinya akan sangat mempengaruhi karakter produk awal (*green compact*). Proses kompaksi dapat dilakukan baik dengan pemberian tekanan satu arah maupun dengan tekanan dua arah secara bersamaan.

Tekanan kompaksi yang diberikan juga dipengaruhi dari jenis bahan yang akan di kompaksi. Besi, baja, nikel paduan adalah material dengan kekerasan yang cukup tinggi sehingga membutuhkan tekanan kompaksi yang tinggi pula. Berbeda dengan Aluminium, kuningan, perunggu misalnya, material ini memiliki kekerasan yang rendah sehingga hanya membutuhkan tekanan kompaksi yang rendah pula. Semakin besar tekanan kompaksi yang diberikan, maka akan semakin besar pula densitas dari produk awal (*green compact*), begitu pula sebaliknya.



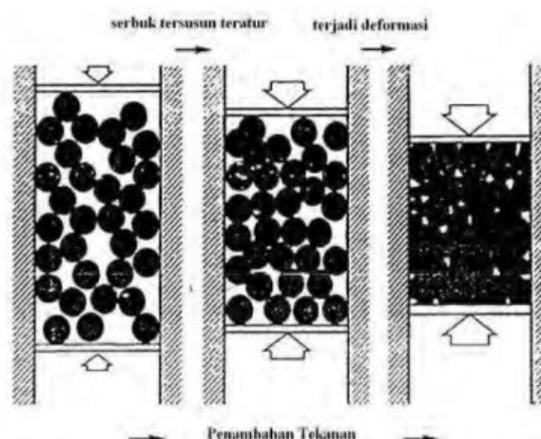
Metode kompaksi dibagi menjadi dua metode berdasarkan tipe bahan atau yang di kompaksi. Jika material mudah teroksidasi, sebaiknya akan metode *cold compression* atau penekanan dingin. Proses penekanan dilakukan pada suhu ruang. Jika material yang tidak mudah teroksidasi,

dapat menggunakan metode hot compression atau penekanan panas. Proses penekanan jenis ini dilakukan dalam temperatur diatas suhu ruang.

Di tahap kompaksi, terjadi gaya gesek baik sesama partikel material maupun partikel komposit terhadap dinding cetakan yang akan menyebabkan densitas komposit di bagian tepi dan tengah dari green compact menjadi tidak seragam. Untuk menyelesaikan permasalahan ini, sering dilakukan penambahan pelumas pada tahap kompaksi. Dalam memilih zat pelumas, sebaiknya menggunakan zat yang memiliki titik leleh rendah dan tidak reaktif pada suhu normal maupun tinggi sehingga pada saat tahap sinterisasi awal (pre heating), zat pelumas dapat menguap. Dalam pemberian zat pelumas di tahap kompaksi, terdapat dua metode yang umum digunakan, yaitu:

1. Pemberian zat pelumas langsung pada dinding cetakan, yang disebut metode die wall compression;
2. Mencampurkan zat pelumas ke dalam material yang akan di kompaksi pada saat proses mixing, yang disebut internal lubricant compression.

Parameter utama dalam menentukan densitas green compact terletak pada besar tekanan kompaksi yang diberikan, perilaku mekanis dan kecepatan penekanan diterapkan. Proses kompaksi akan mendeformasi serbuk menjadi sebuah produk awal yang memiliki bentuk dalam densitas yang cukup tinggi, tetapi masih memiliki kekuatan dan ketangguhan yang rendah. Dengan menambah tekanan kompaksi akan meningkatkan packing pada partikel dan menurunkan porositas yang akan terbentuk. Gambar 2.7 menunjukkan skema dari sebuah proses kompaksi yang terjadi.



**Gambar 2.7** Skema proses kompaksi serbuk logam [23]



Berdasarkan gambar 2.7 memperlihatkan deformasi plastis yang terjadi pada sejumlah partikel serbuk. Ketika tekanan kompaksi di tingkatkan maka akan membuat deformasi plastis meningkat dan homogen seluruhnya. Setelah proses penekanan di rasa cukup, partikel serbuk akan mengalami strain hardening, bersamaan dengan porositas yang semakin berkurang [23]. Tabel 2.2 menunjukkan referensi tekanan kompaksi yang diberikan berdasarkan beberapa jenis material.

**Tabel 2.2** Referensi tekanan kompaksi pada serbuk logam dan keramik [24]

Metal	Pressure (MPa)
Bronze	200 - 275
Iron	350 - 800
Tungsten	70 - 140
Aluminium	70 - 275
Tantalum	70 - 140
Brass	400 - 700
Other Materials	
Cemented Carbides	140 - 400
Aluminium Oxide	110 - 140
Carbon	140 - 165
Ferrites	110 - 165

### 2.3.4 Pemanasan (*sintering*)

Tahapan yang penting dan penentu dalam metalurgi serbuk adalah tahap sintering. Selama proses sintering, biasanya ditemukan dua fenomena yang sering terjadi pada sampel yaitu yang pertama adalah terjadinya penyusutan (*shrinkage*).

Fenomena terbentuknya pertumbuhan butir yang mengeliminasi pori dinamakan penyusutan atau shrinkage, yang terjadi saat sampel belum mencapai titik jenuh dan setelah sampel melewati titik jenuh. Faktor-faktor seperti temperatur sintering, durasi, kecepatan pendinginan, laju pemanasan dan jenis atmosfer sinter akan menjadi parameter penting dalam tahap sintesis ini dan dijelaskan sebagai berikut:

#### 1. Temperatur sinter

Tingkat penyusutan dan densitas akan semakin meningkat dengan penambahan inter yang berlebih, tetapi tingkat porositas akan semakin berkurang.



2. Ukuran serbuk

Semakin berkurangnya ukuran partikel serbuk maka akan mempercepat proses laju sintering. Semakin besar ukuran partikel, maka membuat proses sintering menjadi lebih lama.

3. Durasi sinter

Pertumbuhan butir yang semakin besar seiring bertambahnya waktu sinter, begitu pula level shrinkage yang meningkat. Selain itu, durasi sinter juga mempengaruhi tingkat densitas walaupun tidak sekuat pengaruh temperatur sinter.

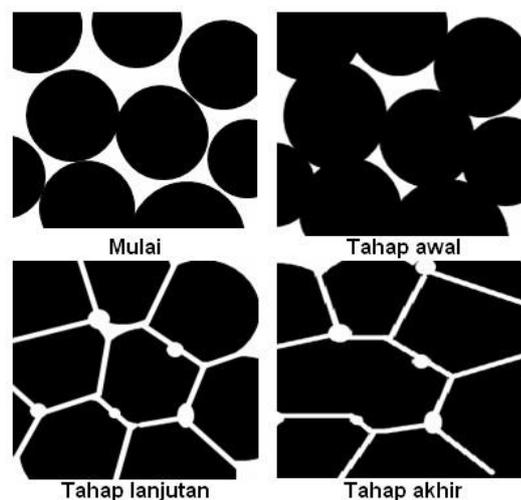
4. Densitas green compact

Semakin tinggi level densitas dari green compact hasil kompaksi, maka akan semakin tinggi pula tingkat densitas dari produk sinter.

5. Tekanan kompaksi

Tekanan kompaksi yang semakin tinggi akan meningkatkan densitas green compact sehingga mempercepat durasi sinter, tetapi akan menghasilkan level shrinkage yang lebih tinggi.

Gambar 2.8 menunjukkan skema pertumbuhan ikatan dari partikel selama proses sintering. Difusi atau pengikatan partikel akan terjadi di dalam proses sintering yang terbagi menjadi empat tahapan, yaitu



**Gambar 2.8** Ilustrasi pertumbuhan ikatan antar partikel sampel selama proses sinter [23]

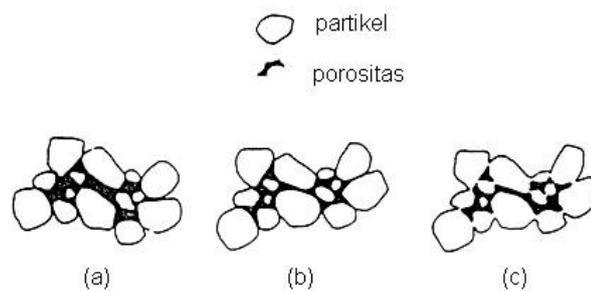


### 1. Point contact

Partikel mulai membentuk suatu titik kontak pada antar partikel dengan orientasi secara acak, namun dalam ikatan yang masih lemah serta green compact belum mengalami perubahan dimensi. Pada tahap ini, densitas dari green compact akan sangat mempengaruhi kontak partikel yang terbentuk. Dengan kata lain, semakin padat green compact maka akan semakin baik titik kontak antar partikelnya, begitu pula sebaliknya. Zat pengotor yang ada juga akan menurun secara perlahan pada tahap ini.

### 2. Initial stage

Partikel awal akan tersusun kembali dan mulai terbentuk formasi necking pada tahapan ini. Sejumlah partikel mulai bergerak untuk meningkatkan sejumlah titik kontak dengan partikel lainnya dan akhirnya membentuk ikatan [23]. Gambar 2.9 menampilkan tahapan dari initial stage.

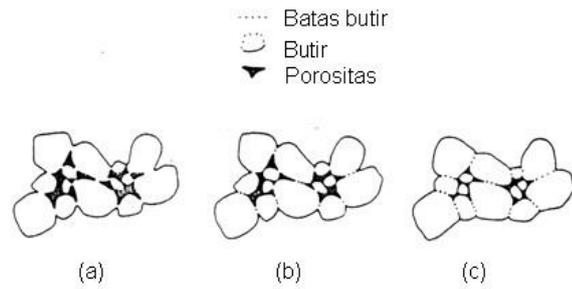


**Gambar 2.9** Tahap pertama proses *sinter*, (a) partikel awal, (b) penyusunan kembali, (c) terbentuknya formasi necking [23]

### 3. Intermediate stage

Pertumbuhan necking yang diiringi dengan pertumbuhan butir dan berkurangnya pori menandai dimulainya tahap intermediate stage. Inti partikel akan bergerak saling mendekati secara bersamaan, bersamaan dengan proses penyusutan terjadi secara maksimal pada tahap ini [23]. Gambar 2.10 menampilkan skema dari intermediate stage.

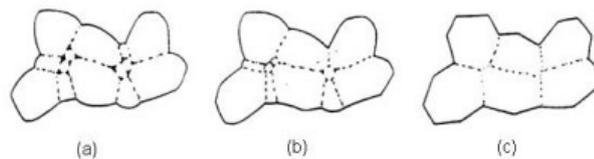




**Gambar 2.10** Pertumbuhan necking dengan (a) peningkatan level penyusutan (b) batas butir semakin memanjang, (c) pertumbuhan butir terus berlanjut dan batas butir meluas [23]

#### 4. Final stage

Porositas yang menurun signifikan disertai dengan pertumbuhan butir telah terjadi secara optimal menandai final stage. Batas butir telah muncul dan struktur pori telah menghilang seperti ditunjukkan pada gambar 2.11.



**Gambar 2.11** Pertumbuhan necking dengan (a) discontinues pore-phase, (b) pertumbuhan butir disertai porositas yang mengecil, (c) pertumbuhan butir [23]

Setelah tahap sintering memasuki final stage, umumnya akan ada dua fenomena yang terjadi pada produk akhir, yaitu:

##### 1. Shrinkage

Jika proses kompaksi terbentuk pola ikatan bola-bidang maka akan terjadi fenomena shrinkage atau penyusutan yang disebabkan oleh degassing (keluarnya gas saat sintering). Terbentuknya liquid bridge / necking karena proses difusi permukaan partikel antara fasa matrik dan penguat, apabila temperatur sinter terus meningkat. Eliminasi terhadap pori-pori disebabkan terbentuknya liquid bridges atau necking sehingga tingkat porositas menurun drastis.



ing

in atau cracking biasanya disebabkan proses kompaksi yang kurang rna, adanya shockwave thermal karena level pemuaihan matriks dan

penguat yang berbeda, dapat juga dikarenakan kualitas partikel komposit yang tidak mampu menahan tekanan seperti trapping gas. Trapping gas dapat terjadi jika telah terbentuk liquid bridges sedangkan gas yang terjebak belum sempat keluar karena jalur keluar gas telah tertutup rapat. Gas yang terjebak akan menekan ke segala arah sehingga terjadi bloating (mengembang), sehingga tekanan pada area pori lebih tinggi dibandingkan tekanan di luar sampel dan akhirnya memicu terbentuknya retakan.

## 2.4 Komposit Matrik Aluminium

Komposit dengan matriks Aluminium memiliki prospek pengembangan yang sangat menjanjikan, didasari oleh keunggulan sifat-sifatnya, seperti hardness dan kekuatan yang tinggi bahkan pada temperatur tinggi, *high stiffness*, *low density* atau ringan, tahan terhadap abrasi dan bahan material yang mudah ditemukan [25]. sedangkan kekurangannya yaitu biaya mahal dan porositas yang tinggi.

Komposit bermatriks Aluminium adalah salah satu jenis bahan material yang dalam perkembangannya, komposit bermatriks Aluminium umum digunakan dalam industri kendaraan, kedirgantaraan, persenjataan, dan lain sebagainya. Komposit matriks Aluminium juga digunakan pada produk yang membutuhkan performa kinerja tinggi, seperti dalam permesinan pesawat terbang, juga aplikasi dalam industri kendaraan seperti piston, *pushrods*, serta komponen pengereman [26].

Pada penelitian ini akan dibahas mengenai sebuah komposit matriks aluminium (AMCs) dengan penguat berbentuk partikel. Adapun material penyusun dari komposit yaitu aluminium, tembaga, magnesium dan alumina.

### 2.4.1 Aluminium

Penggunaan aluminium sangat luas hingga penerapannya pada komponen pesawat, kapal laut, otomotif dan moda transportasi lainnya, selain dari produk rumah tangga, dikarenakan aluminium memiliki karakter mekanis seperti densitas rendah, tahan terhadap sifat korosif dan mampu menghantarkan listrik dengan baik. Aluminium juga memiliki jumlah yang cukup melimpah hingga unsur terbanyak ketiga setelah oksigen dan silikon, namun bernilai cukup rendah karena proses pengolahannya yang cukup sulit.





**Gambar 2.12** Simbol periodik unsur aluminium (sumber: chemistrylearner.com)

Tabel 2.3 ditampilkan beberapa karakter fisik dari aluminium. Aluminium memiliki struktur kristal face centered cubic (FCC), dengan densitas sebesar 2.7 kg/m<sup>3</sup>, jari-jari atom 0.134 nm serta yield strength 60 x 10<sup>3</sup> psi. Aluminium dapat bereaksi dengan unsur oksigen membentuk aluminium oksida jika berada di udara terbuka.

**Tabel 2.3** Sifat fisis logam aluminium (sumber: Ptable.com)

Sifat Fisis	Nilai
Series	Logam miskin
Densitas STP (kg/m <sup>3</sup> )	2.70
Densitas liquid (kg/m <sup>3</sup> )	2.375
Kekerasan vickers (HV)	17.03
Titik leleh (°C)	660.32
Titik didih (°C)	2519
Modulus bulk (GPa)	76
Modulus young (GPa)	70
Modulus shear (GPa)	26
Konduktivitas elektrik (MS/m)	38
Konduktivitas termal (W/mK)	235

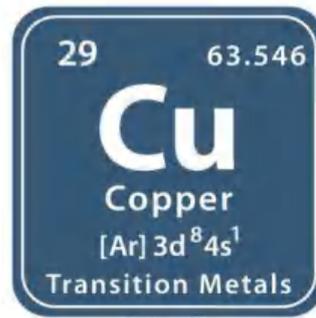
Penjelasan lebih rinci dari karakter fisis dan mekanisnya adalah sebagai berikut:

1. Anti korosi dan lebih ringan dari unsur logam lainnya sehingga sering digunakan sebagai bahan produksi alat rumah tangga hingga komponen moda transportasi;
2. Kuat jika dipadukan dengan logam yang lain;
3. Pengerjaan Aluminium yang mudah dibentuk karena dapat disambung dilas atau dikombinasikan dengan logam/material lainnya;
4. Kemampuan menghantar termal yang cukup baik;



5. Tangguh dalam kondisi temperatur dingin atau suhu ruang serta tidak getas seperti beberapa jenis logam lainnya;
6. Mampu dibentuk ulang setelah melalui proses recycle atau daur ulang limbah sehingga lebih ramah lingkungan.

#### 2.4.2 Tembaga (Copper)



**Gambar 2.13** Simbol periodik unsur tembaga (sumber: chemistrylearner.com)

Tembaga merupakan penghantar listrik dan panas yang baik, tahan terhadap korosi, memiliki bentuk fisik dengan warna kemerahan dan mudah di tempa. Selain itu, tembaga yang juga memiliki titik didih yang cukup tinggi sebesar 2562°C dan titik lebur sebesar 1084.62°C sehingga dapat menjadi alternatif penguat pada AMCs karena mampu meningkatkan kekuatan mekanis, khususnya ketahanan aus dan kekerasan komposit. Tabel 2.4 menampilkan karakter fisik dari tembaga.

**Tabel 2.4** Sifat fisis logam tembaga (sumber: Ptable.com)

Sifat Fisis	Nilai
Series	Logam transisi
Densitas STP (kg/m <sup>3</sup> )	8.96
Densitas liquid (kg/m <sup>3</sup> )	8.02
Kekerasan vickers (HV)	37.6
Titik leleh (°C)	1084.62
Titik didih (°C)	2562
Modulus bulk (GPa)	140
Modulus young (GPa)	130
Modulus shear (GPa)	48
Konduktivitas elektrik (MS/m)	59
Konduktivitas termal (W/mK)	400



#### gnesium

gnesium sering digunakan dalam paduan komposit untuk produk-produk yang kendaraan. Struktur fisik magnesium berwarna abu-abu mengkilap

dengan totalnya cukup banyak di permukaan bumi yang mayoritas berasal dari olahan air laut, selain dari lapisan mantel bumi.



**Gambar 2.14** Simbol periodik unsur magnesium(sumber: chemistrylearner.com)

Magnesium memiliki struktur kristal hexagonal close packed, dengan densitas  $1.74 \text{ gr/cm}^3$ , titik leleh yang cukup rendah sebesar  $649^\circ\text{C}$ , umumnya digunakan sebagai wetting agent (agen pembasah) yang akan mereduksi lapisan oksida pada komposit aluminium serta meningkatkan ikatan antar partikel selama proses sintering [27]. Karena itu, magnesium menjadi logam ketiga yang banyak digunakan setelah besi dan aluminium. Tabel 2.5 menampilkan karakter fisik dari unsur magnesium.

**Tabel 2.5** Sifat fisis logam magnesium (sumber: Ptable.com)

Sifat Fisis	Nilai
Series	Logam alkali tanah
Densitas STP ( $\text{g/cm}^3$ )	1.738
Densitas liquid ( $\text{g/cm}^3$ )	1.584
Kekerasan Vickers (HV)	2.71
Titik leleh ( $^\circ\text{C}$ )	649
Modulus bulk (GPa)	45
Modulus young (GPa)	45
Modulus shear (GPa)	17
Konduktivitas elektrik (MS/m)	23
Konduktivitas termal (W/mK)	160

Sebagai logam yang tersedia cukup melimpah, yaitu sekitar 13% dari berat kerak bumi seperti besi dan oksigen, magnesium cukup ringan, densitas yang rendah, logam yang mudah luluh dan lentur dengan penampilan abu abu putih.



nya yang hanya 2/3 dari aluminium membuatnya lebih mudah dibentuk dan dudukan dalam metode seperti casting dan ekstrusi. Magnesium juga

memiliki ketahanan korosi karena adanya lapisan magnesium oksida pada permukaannya.

#### 2.4.4 Aluminium Oksida (Alumina)

Alumina merupakan salah satu senyawa keramik oksida yang sangat luas penggunaannya seperti pada komponen mesin, refraktori, pemotong, biokeramik dan bahan dielektrik. Gaya pengikatan inter atomiknya, sebagian ionik dan sebagian kovalen, sangat kuat dan struktur kristal alumina secara fisis tetap stabil hingga temperatur 1500 - 1700°C [28]. Alumina memiliki kekerasan yang tinggi, tahan terhadap korosi, memiliki titik leleh yang cukup tinggi, memiliki konduktivitas termal yang rendah dan tahan terhadap suhu tinggi. Dengan sifat mekanik yang tinggi tersebut tidak mengherankan jika keramik alumina mampu menahan proyektil berkecepatan tinggi berbahan dasar baja, tungsten karbida maupun timah [29].

Bentuk yang paling umum dari kristal alumina dikenal sebagai korundum. Korundum adalah aluminium oksida berbentuk kristal yang paling umum terjadi secara alami. Ion-ion oksigen hampir membentuk struktur heksagonal dengan ion aluminium mengisi dua-pertiga dari celah oktahedralnya. Dalam istilah kristalografi, korundum mengadopsi kisi trigonal Bravais dengan sebuah gugus ruang R-3c (nomor 167 Daftar Internasional).



**Gambar 2.15** Aluminium oksida (alumina)



Alumina juga dikenal sebagai senyawa berpori sehingga dimanfaatkan sebagai adsorben. Sifat lain dari alumina yang diunggulkan adalah daya tahannya terhadap korosi dan titik lebur yang tinggi, yakni mencapai 2053 – 2072°C. Alumina oksida adalah isolator listrik tetapi memiliki konduktivitas termal yang tinggi ( $30 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) untuk bahan keramik. Dalam bentuk kristal yang

paling sering terjadi, disebut korundum atau  $\alpha$ -aluminium oksida, kekerasannya membuatnya cocok untuk digunakan sebagai abrasif dan sebagai komponen dalam alat pemotong. Aluminium oksida bertanggung jawab untuk ketahanan logam aluminium atas pelapukan. Logam aluminium sangat reaktif dengan oksigen atmosfer, dan pasivasi alumina lapisan tipis (ketebalan 4 nm) terbentuk sekitar 100 picosecond pada setiap permukaan aluminium yang terkena. Lapisan ini melindungi logam dari oksidasi lebih lanjut.

**Tabel 2.6** Sifat fisis aluminium oksida (sumber: Ptable.com)

Sifat Fisis	Nilai
Formula Kimia	$\text{Al}_2\text{O}_3$
Struktur kristal	Trigonal
Densitas ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	3.95
Kekerasan Vickers (HV)	880
Titik didih ( $^{\circ}\text{C}$ )	2977
Titik lebur ( $^{\circ}\text{C}$ )	2072
Massa molar ( $\text{g}/\text{mol}$ )	101.96
Konduktivitas termal ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	30

## 2.5 Karakteristik Serbuk Logam

Setiap serbuk logam tentu memiliki karakternya masing-masing, dimulai dari densitas, kemampuan tekan, kemampuan alir, ukuran dan bentuk partikel serbuk serta sifat sinter yang nantinya akan mempengaruhi karakter produk akhir. Penjelasan mengenai karakterisasi dari serbuk logam pun ditampilkan.

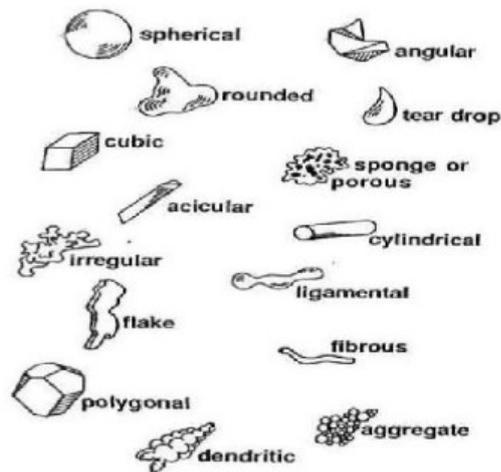
### 2.5.1 Bentuk Serbuk

Partikel serbuk terbentuk tergantung dari metode yang digunakan saat memproduksinya. Semakin besar bentuk suatu partikel maka akan berpengaruh terhadap kontak antar partikelnya sehingga luas permukaan spesifik serbuk akan berhubungan gaya gesek dari antar partikel. Menurut standar ISO, bentuk serbuk diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Flake : berbentuk serpihan
  2. Granular : berbentuk tidak beraturan dan hampir bulat
  3. Spherical : berbentuk bulat
- lar : berbentuk tidak beraturan atau tidak mempunyai simetri
- ar : berbentuk bulat dan tidak beraturan
- lar : berbentuk jarum



7. Dendritic : berbentuk kristalin dan bercabang
8. Angular : berbentuk polyhedral kasar dengan tepi yang tajam
9. Fibrous : berbentuk serabut yang beraturan atau tidak beraturan



**Gambar 2.16** Berbagai tipe bentuk serbuk [23]

### 2.5.2 Ukuran dan Distribusi Partikel Serbuk

Porositas, densitas, karakter mekanis dari green compact akan sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel.

**Tabel 2.7** Standar ukuran partikel serbuk (Sumber: ASTM E 11)

Sieve designation mesh	Sieve openings	
	$\mu\text{m}$	inchi
30	600	0.0232
40	425	0.0164
50	300	0.0116
60	250	0.0097
80	180	0.0069
100	150	0.0058
140	106	0.0041
200	75	0.0029
230	63	0.0024
325	45	0.0017



Ukuran partikel dapat dianalisa dengan metode ayakan. Semakin besar partikel maka akan semakin besar level porositas yang rawan terbentuk. Tabel menunjukkan standar dari ukuran partikel serbuk logam maupun keramik.

Ukuran partikel dapat didefinisikan sebagai ukuran linear partikel oleh analisa ayakan. Ukuran disini akan menentukan besar kecilnya porositas dan densitas, serta sifat mekanik dari serbuk hasil kompaksi (green compact). Semakin kecil (halus) ukuran partikel serbuk, maka densitas green compact akan semakin besar. Serbuk logam yang sesuai untuk proses metalurgi serbuk umumnya memiliki ukuran dengan kisaran antara 0.1 – 1000  $\mu\text{m}$ . Beberapa pengaruh ukuran partikel serbuk terhadap karakteristik serbuk, antara lain:

1. Ukuran partikel yang halus sangat diperlukan untuk kompaksi serbuk yang keras atau getas seperti tungsten dan alumina karena semakin tinggi gesekan partikel akan membantu meningkatkan kekuatan adhesi green compact untuk memudahkan dalam proses selanjutnya.
2. Serbuk-serbuk yang halus mempunyai luas kontak antar partikel yang lebih banyak sehingga akan meningkatkan mekanisme ikatan antar partikel secara difusi pada saat proses sinter, tetapi sangat sulit memperoleh densitas kompaksi yang seragam dengan luas bagian yang besar.
3. Serbuk yang kasar memiliki kepadatan yang seragam saat dilakukan kompaksi, akan tetapi luas permukaan kontak antar partikel menjadi kecil yang mengakibatkan difusi pada saat proses sintering menjadi kurang baik sehingga menyebabkan terjadinya banyak pori dan menurunkan sifat mekanik produk.

### 2.5.3 Flowability

Flowability adalah salah satu karakteristik serbuk yang menggambarkan kemampuan serbuk untuk memenuhi ruang cetakan dan beberapa faktor yang mempengaruhi adalah bentuk, densitas, distribusi ukuran dan kelembapan serbuk.

### 2.5.4 Sifat Kimia

Sifat kimia merupakan sebuah spesifikasi yang ada hubungannya dengan kemudian kemudian suatu serbuk logam. Hal berkaitan dengan jumlah oksida yang diizinkan dan persentase elemen lain yang diizinkan.

### 2.5.5 Compressability

Mampu tekan atau compressability adalah perbandingan antara volume mula-mula dengan volume serbuk setelah dikompaksi dan nilainya pun berbeda tergantung distribusi ukuran dan bentuk serbuknya. Serbuk yang halus memiliki mampu tekan yang lebih tinggi daripada serbuk yang kasar.



### 2.5.6 Density

Densitas merupakan tingkat kerapatan dari serbuk. Dalam proses powder metallurgy terdapat istilah mengenai densitas, diantaranya:

1. Bulk density didefinisikan sebagai berat per satuan volume aktual dari serbuk dalam keadaan (relatif) tanpa agitasi.
2. Tap density didefinisikan sebagai berat jenis tertinggi yang dicapai dengan vibrasi tanpa aplikasi tekanan dari luar.
3. Green density didefinisikan sebagai berat jenis setelah serbuk mengalami penekanan kompaksi untuk sintering.
4. Theoretical density didefinisikan sebagai berat jenis sesungguhnya dari material serbuk ketika ditekan hingga menghasilkan serbuk tanpa pori.

### 2.5.7 Sifat Sinter

Sinter adalah proses pengikatan partikel melalui proses pemanasan. Waktu pemanasan yang dibutuhkan sesuai dengan jenis logam.

## 2.6 Aplikasi Komposit Al-Cu-Mg berpenguat Alumina

Penelitian ini penting untuk dilakukan karena memberikan beberapa manfaat yaitu dalam jangka panjang diharapkan dapat membuka peluang pengembangan material untuk komponen otomotif, contohnya produk spare part connecting rod, crankshaft, suspension arm pada mobil. Pengaplikasian pada produk tegangan tinggi seperti piston dan cylinder liner juga menggunakan paduan Aluminium berpenguat alumina. Pada tabel 2.8 menunjukkan aplikasi dari produk komposit paduan Al-Cu-Mg-Alumina.

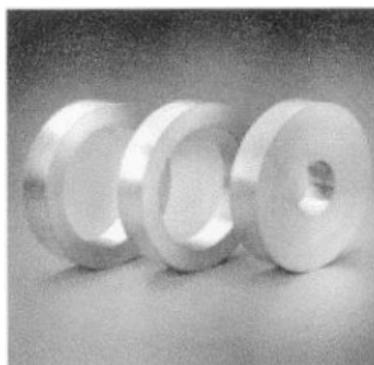
Salah satu perusahaan multinasional yaitu The 3M Company (Minnesota Mining and Manufacturing Company) telah mengembangkan produk-produk berbasis *Aluminium matrix composite* dengan berpenguat Alumina. Dibandingkan dengan produk baja berkekuatan tinggi, *continuous fibre-reinforced aluminium matrix composites* (CFAMCs) berbasis alumina menawarkan komposit dengan kekuatan yang setara produk baja, dengan nilai densitas yang kurang dari setengah densitas baja pada umumnya, serta dengan kekuatan pada suhu hingga 300°C lebih dari itu. Komposit jenis ini telah ditargetkan untuk beberapa jenis aplikasi seperti *automotive push rod*, *flywheel*, dan *brake callipers* [26].



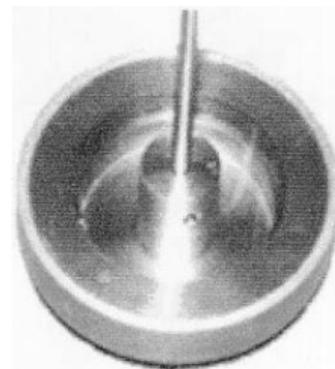
**Tabel 2.8** Pengaplikasian produk komposit AMCs

Material	Application	Improved Property	Feature	Manufacturer
Al-Short Fibre	Piston Ring	Abrasion Resistance Performance Lower Cost	High Temp. Engine	Toyota
Al-Short Fibre (Saffil)	Combustion Bowl of Piston	High Temperature Performance	Improved Durability	Consortium
Al-Short Fibre (Saffil)	Selective Reinforcement of Motor Block	High Temperature Performance		Peugot
Al-Short Fibre (Saffil)	Cylinder Liner	Improved Stiffness Wear Resistance Closer Tolerances Better Heat Conducting	Improved Durability	Honda
Al-SiC Particles	Connecting Rod	Specific Strength Specific Stiffness	Higher Performance	DWA Duralcan Nissan
Al-Alumina Particles	Connecting Rod	Specific Strength Specific Stiffness	Higher Performance	Dupont Crysler

*Aluminum matrix composite* (AMCs) berpenguat alumina memberikan manfaat dalam pengaplikasian berbagai produk otomotif. Penggunaannya pada flywheel, memungkinkan produk dibuat lebih kecil dibandingkan flywheel dengan bahan komposit polimer. Pada ring penahan di motor berkecepatan tinggi, dapat menahan kecepatan rotasi yang sangat tinggi sambil tetap mempertahankan bentuk presisinya. Pada produk *brake calliper*, dapat menawarkan keunggulan produk seperti peningkatan redaman terhadap getaran, mengurangi berat “unsprung” pada kendaraan, dan meningkatkan efisiensi bahan bakar dikarenakan bobot spare part yang lebih ringan. Dengan keunggulan berikut menjadikan brake calliper dengan bahan AMCs berpenguat alumina lebih efektif dan efisien dibandingkan produk brake calliper dengan bahan besi tuang [26].

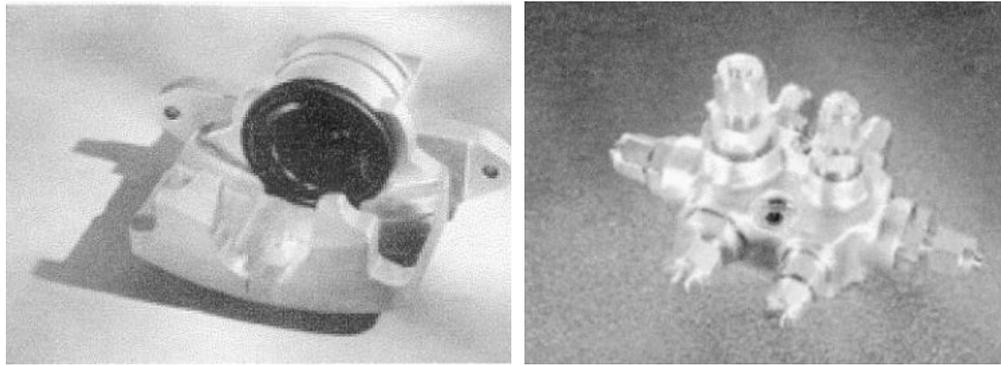


a.



b.





c.

d.

**Gambar 2.17** Beberapa produk AMCs berpenguat alumina (a) flywheel, (b) ring penahan (c) brake calliper, (d) control hydraulic manifold [26]

## 2.7 Penentuan Volume dan Fraksi Massa

### 2.7.1 Perhitungan Densitas Teoritis Komposit

Untuk mengetahui sifat komposit selain dengan pengambilan data pada eksperimen, juga bisa didapatkan secara teori. Dengan menggunakan *Rule of Mixture* (ROM) yang dinyatakan dengan persamaan (2.1) :

$$\rho_c = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f \quad (2.1)$$

Dimana :

- $\rho_c$  = Densitas komposit
- $\rho_m$  = Densitas matriks
- $\rho_f$  = Densitas penguat
- $V_m$  = fraksi berat matriks
- $V_f$  = fraksi berat penguat

### 2.7.2 Perhitungan Volume Unsur Komposit

Setelah didapatkan volume cetakan komposit dan diketahui fraksi volume dari serbuk Aluminium, tembaga, magnesium dan alumina, maka dapat dihitung volume dari masing-masing serbuk bahan baku menggunakan persamaan (2.2) :

$$v_{unsur} = V_{unsur} \times v_{AMC} \quad (2.2)$$



Dimana :

$v_{unsur}$  = volume unsur

$V_{unsur}$  = fraksi volume unsur

$v_{AMC}$  = volume komposit matrik logam

### 2.7.3 Perhitungan Berat Unsur Komposit

Setelah mengetahui volume dari unsur-unsur yang digunakan, maka dapat dihitung berat dari masing-masing unsur komposit dengan persamaan (2.3) :

$$m_{unsur} = \rho_{unsur} \times v_{unsur} \quad (2.3)$$

Dimana :

$m_{unsur}$  = massa unsur

$\rho_{unsur}$  = densitas unsur

$v_{unsur}$  = volume unsur

Bentuk dan ukuran partikel juga memegang peranan penting dalam menentukan kualitas komposit. Semakin kecil ukuran partikel yang terikat maka kualitas kontakannya semakin baik, karena semakin luas permukaan antar partikel. Ikatan antar partikel dalam material komposit salah satunya disebabkan karena adanya *interlocking* antar partikel yang dipengaruhi oleh bentuk partikel yang digunakan.

## 2.8 Karakterisasi Komposit Paduan Al-Cu-Mg-Alumina

Beberapa jenis pengujian dan analisis yang dibahas untuk keperluan penelitian ini antara lain pengujian sifat fisis (densitas, porositas, dan penyusutan), sifat mekanis (kekerasan dan laju keausan) serta analisis struktur mikro (SEM-EDS dan XRD).

### 2.8.1 Sifat Fisis - Densitas

Densitas merupakan besaran fisis yaitu perbandingan massa ( $m$ ) dengan volume ( $V$ ). Pengukuran densitas yang materialnya berbentuk padatan atau cairan dilakukan dengan menggunakan metode Archimedes. Untuk menghitung nilai densitas aktual dan menggunakan persamaan (2.4) dan persamaan (2.5) :



## 1. Densitas Aktual:

$$\rho_s = \frac{W_u}{(W_u - W_a)} \times \rho_a \quad (2.4)$$

dimana :

 $\rho_s$  : densitas sampel ( $g/cm^3$ ) $\rho_a$  : densitas air ( $1 g/cm^3$ ) $W_u$ : massa sampel di udara (gram) $W_a$ : massa sampel di air (gram)

## 2. Densitas teoritis

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.5)$$

dimana :

 $\rho$  : densitas ( $gr/cm^3$ )

m : massa sampel (gram)

v : volume sampel ( $cm^3$ )**2.8.2 Sifat Fisis – Porositas**

Porositas dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah volume ruang kosong yang dimiliki oleh zat padat terhadap jumlah dari volume zat padat itu sendiri. Porositas suatu bahan dinyatakan dengan persamaan (2.6):

$$\varepsilon = \frac{m_b - m_k}{m_k} \times 100 \% \quad (2.6)$$

dimana :

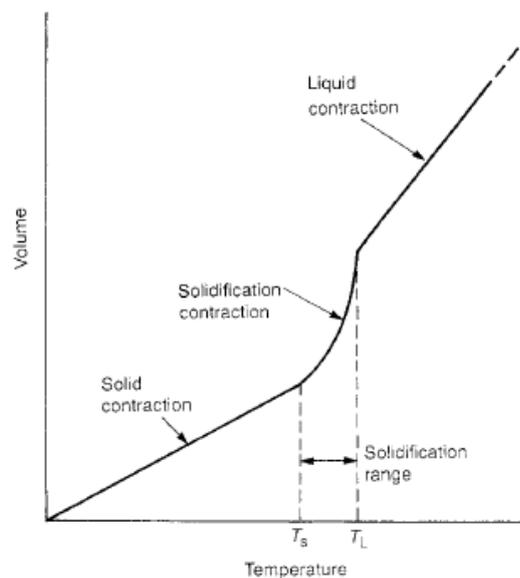
 $\varepsilon$  : porositas (%) $m_k$  : massa sampel setelah dikeringkan di dalam oven (gram) $m_b$  : massa sampel setelah direndam di dalam air (gram)**at Fisis – Penyusutan / Shrinkage**

at pada logam, baik melalui proses coran (*casting*) ataupun metalurgi rupa cekungan pada spesimen sampel disebut dengan *shrinkage*. Hal ini

disebabkan penyusutan volume logam pada saat proses pembekuan atau pendinginan. Sebagai contoh pada proses *casting*, proses pembekuan tidak diiringi dengan pasokan logam cair dari *riser*. Pada proses pembekuan logam cair, terjadi perbedaan kecepatan pembekuan yang berlainan dan cacat *shrinkage* biasanya terbentuk pada bagian yang membeku paling akhir.

**Tabel 2.9** Solidifikasi *shrinkage* beberapa material [30]

Metal	Struktur kristal	Melting point	Perubahan volume
Al	FCC	660	7.14
Au	FCC	1063	5.47
Co	FCC	1495	5.26
Cu	FCC	1083	5.30
Ni	FCC	1453	5.11
Pb	FCC	327	3.22
Fe	BCC	1536	3.16
Li	BCC	181	2.74
Na	BCC	97	2.60
K	BCC	64	2.54



**Gambar 2.18** Ilustrasi shrinkage pada setiap fasa [31]

Ketika proses sintering atau peleburan terjadi proses pemuaihan pada logam padat. Logam padat akan mengalami perubahan volume yang lebih besar karena mendapatkan energi dari luar sehingga molekul-molekul di dalam logam padat lebih aktif. Molekul yang bergerak lebih aktif ini menyebabkan jarak antar bertambah lebar, dan apabila energi yang diterima bertambah banyak tar molekul dapat terlepas sehingga logam padat dapat berubah menjadi



logam cair. Sedangkan pada proses pembekuan, logam akan mengalami penyusutan yang membuat volume logam semakin kecil. Jadi jika dibandingkan dengan ukuran pada rongga cetak, ukuran produk akan berbeda, yaitu ukurannya menjadi lebih kecil dibandingkan rongga cetaknya. Ilustrasi *shrinkage* dapat dilihat pada gambar 2.18.

Cacat *shrinkage* dapat dihindari dengan menggunakan penambah (*riser*) ataupun dengan memberikan pendinginan (*chiller*) pada spesimen. Besaran nilai solidifikasi *shrinkage* dari beberapa material dapat dilihat pada tabel 2.9

#### 2.8.4 Sifat Mekanis – Kekerasan Mikro

Kekerasan logam dapat diartikan sebagai ketahanan suatu bahan logam terhadap penetrasi, dan memberikan indikasi cepat mengenai perilaku deformasi (Murtiono, 2012). Harga kekerasan bahan tersebut dapat dianalisis dari besarnya beban yang diberikan terhadap luasan bidang yang menerima pembebanan. Kekerasan juga dapat didefinisikan sebagai ketahanan sebuah benda (benda kerja) terhadap penekanan atau daya tembus dari bahan lain yang lebih keras (*penetrator*) (Purwanto H, 2011). Penekanan terhadap suatu bahan tersebut dapat berupa mekanisme penggoresan (*stretching*), pelanggaran ataupun indentasi dari material terhadap suatu permukaan benda uji. Berdasarkan penekanan tersebut, maka dibagi menjadi tiga metode kekerasan yaitu :

##### 1. Metode Gores

Metode ini dikenal oleh Fredrich Mohs yang membagi kekerasan material di dunia ini berdasarkan skala Mohs. Skala ini bervariasi dari nilai 1 untuk kekerasan yang paling rendah, sebagaimana dimiliki oleh material talk, hingga skala 10 sebagai kekerasan tertinggi, sebagaimana dimiliki oleh intan.

##### 2. Metode elastis/pantul (pantulan)

Kekerasan suatu material ditentukan oleh alat Scleroscope yang mengukur tinggi pantulan suatu pemukul (*hammer*) dengan berat tertentu yang dijatuhkan dari suatu ketinggian terhadap benda uji. Tinggi pantulan (*rebound*) yang ditunjukkan mewakili kekerasan benda uji. Semakin tinggi pantulan tersebut, yang ditunjukkan pada alat pengukur, maka kekerasan benda uji dinilai semakin tinggi.



### 3. Metode Indentasi

Tipe pengetasan kekerasan material atau logam ini adalah dengan mengukur tahanan plastis dari permukaan suatu material konstruksi mesin dengan spesimen standar terhadap *penetrator*. Pada penelitian ini akan menggunakan pengujian kekerasan vickers. Pengujian kekerasan dengan metode Vickers bertujuan menentukan kekerasan suatu materi dalam bentuk daya tahan material terhadap intan berbentuk piramida dengan sudut puncak  $136^\circ$  yang ditekankan pada permukaan material uji tersebut. Angka kekerasan Vickers (*Vickers hardness number*, VHN) didefinisikan sebagai beban dibagi dengan luas permukaan lekukan. VHN ditentukan oleh persamaan (2.7) :

$$\mathbf{HV} = 1,854 \frac{P}{d_1 \times d_2} \quad (2.7)$$

dimana :

HV = Nilai kekerasan skala Vickers

P = Beban yang digunakan (kg)

$d_1, d_2$  = Panjang diagonal rata rata (mm)

#### 2.8.5 Sifat Mekanis – Laju Keausan

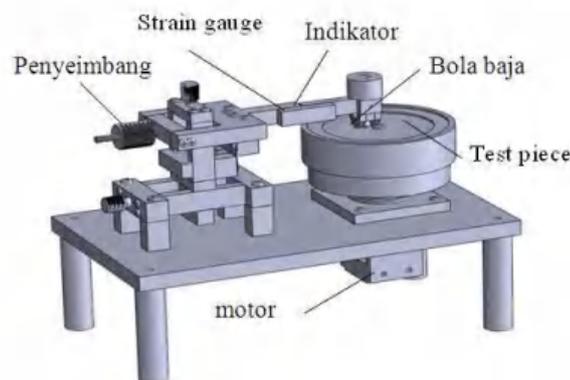
Uji keausan merupakan suatu uji karakteristik fisik yang digunakan untuk mengetahui seberapa besar tingkat keausan benda (permukaan benda) terhadap gesekan atau goresan. Keausan merupakan bahan dari suatu permukaan atau perpindahan bahan dari permukaannya ke bagian yang lain atau Bergeraknya bahan pada suatu permukaan. Keausan yang terjadi pada suatu material disebabkan oleh adanya beberapa mekanisme yang berbeda dan terbentuk oleh beberapa parameter yang bervariasi meliputi, bahan, lingkungan, kondisi operasi, dan geometri permukaan yang terjadi keausan.

Mekanisme keausan menurut Koji Kato, dikelompokkan menjadi tiga macam, yaitu keausan yang disebabkan perilaku mekanis (*mechanical*), keausan yang disebabkan perilaku kimia (*chemical*), dan keausan yang disebabkan perilaku panas (*thermal wear*). Keausan yang disebabkan perilaku tersebut digolongkan lagi *abrasive, adhesive, corrosive, dan fatigue wear*.



1. Keausan *abrasive*, adalah proses pengikisan yang terjadi jika suatu partikel abrasif yang kasar dan keras berkontak dengan permukaan suatu material yang lebih lunak sehingga terjadi pemotongan pada material yang lebih lunak.
2. Keausan gesek atau *adhesive wear*, adalah keausan yang terjadi jika dua permukaan material saling berkontak dan bergerak relatif antara satu sama lain serta mengalami pembebanan, sehingga kontak permukaan dari kedua material tersebut mengakibatkan perlekatan serta deformasi plastis. Akhirnya, terjadi proses *bonding* dan pelepasan sebagian kecil permukaan material yang satu oleh material yang lain.
3. Keausan korosi atau *corrosive wear* adalah proses kerusakan yang dimulai dengan perubahan kimiawi material di permukaan oleh faktor lingkungan yang korosif. Kontak dengan lingkungan ini menghasilkan pembentukan lapisan pada permukaan dengan sifat yang berbeda dari material induk dan konsekuensinya adalah material akan mengarah ke perpatahan interface antara lapisan permukaan dan material induk serta seluruh lapisan permukaan material akan terlepas.
4. Keausan lelah atau *fatigue wear* adalah mekanisme keausan yang terjadi akibat interaksi permukaan dimana permukaan yang mengalami beban berulang akan terbentuk retak-retak mikro dan menghasilkan pengelupasan material.

Pengujian keausan pada penelitian ini, tipe keausan yang terjadi adalah *abrasive wear*. Keausan *abrasive* terjadi jika partikel keras atau permukaan keras yang kasar menggerus dan memotong permukaan sehingga mengakibatkan hilangnya material yang ada di permukaan tersebut (*earth moving equipment*).



**Gambar 2.19** Skema pengujian keausan pin on disc



Pengujian keausan dapat dilakukan dengan berbagai macam metode dan teknik, yang semuanya bertujuan untuk mensimulasikan kondisi keausan aktual. Salah satunya adalah dengan metode Ogoshi dimana benda uji memperoleh beban gesek dari *disk* yang berputar (*revolving disc*). Pembebanan gesek ini akan menghasilkan kontak antar permukaan yang berulang-ulang yang pada akhirnya akan mengambil sebagian material pada permukaan benda uji. Besarnya jejak dari material yang tergesek itulah yang dijadikan dasar penentuan tingkat keausan pada material. Semakin besar dan dalam jejak keausan maka semakin tinggi volume material yang terlepas dari benda uji. Ilustrasi skematis dari kontak permukaan antara revolving disc dan benda uji yang diberikan oleh Gambar 2.19. Rumus volume keausan spesifik yang terjadi pada spesimen ditentukan sesuai dengan ASTM G99-95a [32] menggunakan persamaan (2.8).

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho} \times 1000 \quad (2.8)$$

dimana :

- V = Volume keausan ( $\text{mm}^3$ )
- $m_1$  = massa sebelum pengujian (gram)
- $m_2$  = massa setelah pengujian (gram)
- $\rho$  = massa jenis spesimen ( $\text{gram}/\text{cm}^3$ )

Untuk pengujian keausan dilakukan dengan menggunakan alat uji *pin on disc* dan penentuan laju keausan per satuan panjang lintasan dapat dinyatakan dengan persamaan (2.9)

$$\text{Laju keausan } (\text{mm}^3/\text{m}) = \frac{V}{2\pi RNt} \quad (2.9)$$

dimana:

- V = volume keausan ( $\text{mm}^3$ )
- R = radius lintasan pengujian (m)
- N = kecepatan putar (rpm)
- t = periode pengujian keausan (menit)
- $\rho$  = massa jenis spesimen uji ( $\text{gram}/\text{cm}^3$ )

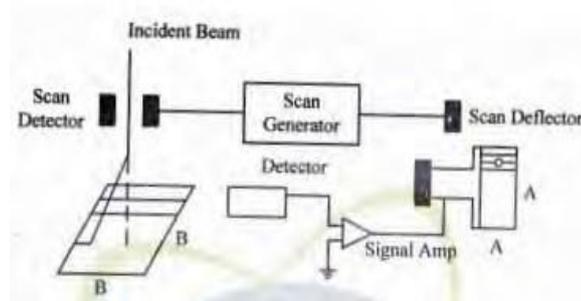


Keausan dapat didefinisikan sebagai kehilangan sebagian volume karena rusaknya permukaan padatan, umumnya melibatkan kehilangan material yang progresif akibat adanya gesekan (friksi) antar permukaan padatan. Keausan bukan merupakan sifat dasar material, melainkan respon material terhadap pengaruh gaya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

### 2.8.6 Analisa Struktur Mikro – SEM-EDS Mapping

*Scanning Electron Microscope (SEM)* merupakan mikroskop elektron yang banyak digunakan untuk analisa suatu permukaan dan mengamati material padat seperti morfologi dan topologi permukaan material. SEM juga dapat digunakan untuk menganalisis data kristalografi, sehingga dapat dikembangkan untuk menentukan elemen atau senyawa. Prinsip kerja SEM dapat dilihat pada gambar 2.20, dimana dua sinar elektron digunakan secara bersamaan. Satu *strike specimen* digunakan untuk menguji dan *strike* yang lain adalah *Cathode Ray Tube (CRT)* memberi tampilan gambar.

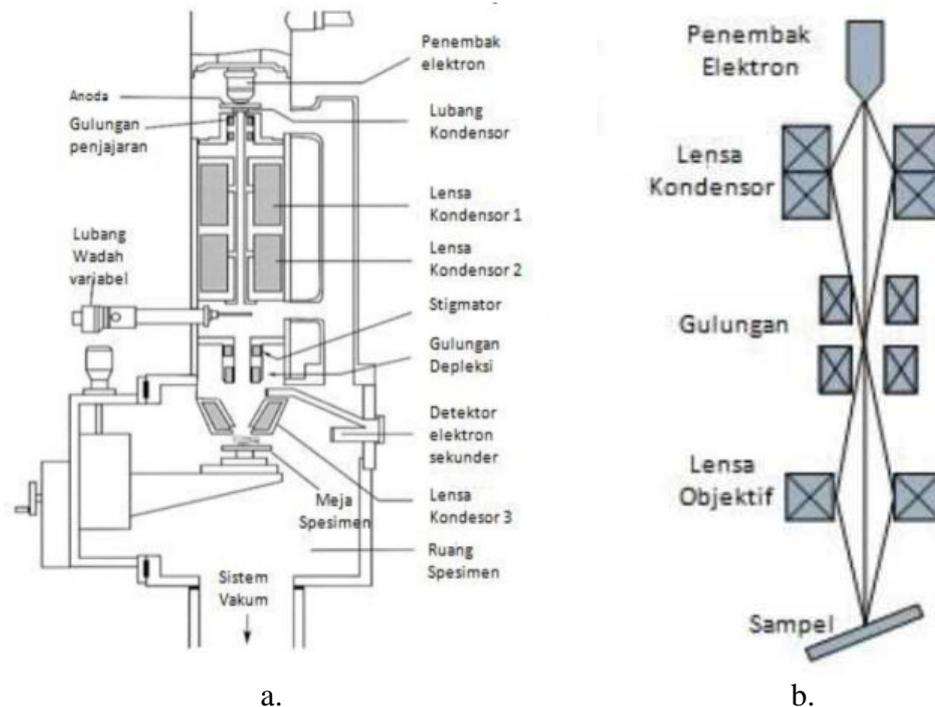
SEM menggunakan prinsip scanning, maksudnya berkas elektron diarahkan dari titik ke titik pada objek. Gerakan berkas elektron dari satu titik ke titik yang lain pada suatu daerah objek menyerupai gerakan membaca. Gerakan membaca ini disebut dengan *scanning*. Komponen utama SEM terdiri dari dua unit, yaitu *elektron column (B)* dan *display console (A)*. *Elektron column* merupakan model *electron beam scanning* sedangkan *display console* merupakan elektron sekunder yang didalamnya terdapat CRT. Energi elektron pancaran tinggi yang dihasilkan oleh *electron gun* yang kedua tipenya berdasar pada pemanfaatan arus.



Gambar 2.20 Skema prinsip dasar SEM [33]



Setiabudi [34] dalam bukunya, memperlihatkan skema interaksi antara elektron dengan sampel pada mikroskop elektron, terjadi jika elektron dengan energi tinggi sekitar 100 – 400 keV bertumbukan dengan sampel. Dalam pengukuran SEM, diketahui terdapat dua jenis elektron yaitu elektron primary dan elektron secondary. Elektron secondary yang akan ditangkap oleh detector dan mengubah sinyal tersebut menjadi suatu sinyal gambar.



**Gambar 2.21** Skema instrumen (a) skema instrumen SEM yang lebih detail, (b) skema SEM yang disederhanakan [34]

SEM dapat mengamati struktur maupun bentuk permukaan yang berskala lebih teliti yang dilengkapi dengan EDS (Electron Dispersive X-Ray Spectroscopy). EDS adalah suatu teknik analisis yang digunakan untuk menganalisa unsur atau karakterisasi kimiawi dari sampel. Spektroskopi sinar-X dispersif energi (EDS, juga disingkat EDX atau XEDS) adalah teknik analitik yang memungkinkan karakterisasi kimia/analisis unsur bahan. Sampel yang dieksitasi oleh sumber energi (seperti berkas elektron dari mikroskop elektron) melepaskan sebagian energi yang diserap dengan mengeluarkan elektron inti-elektron kulit terluar berenergi lebih tinggi kemudian mulai mengisi a, melepaskan perbedaan energi sebagai sinar-x ray yang memiliki karakteristik berdasarkan atom asalnya. Ini memungkinkan untuk analisis



komposisi volume sampel tertentu yang telah dieksitasi oleh sumber energi. Posisi puncak dalam spektrum mengidentifikasi elemen, sedangkan intensitas sinyal sesuai dengan konsentrasi elemen.

Seperti yang dinyatakan sebelumnya, berkas elektron memberikan energi yang cukup untuk mengeluarkan elektron kulit inti dan menyebabkan emisi sinar-X. Informasi komposisi, hingga ke tingkat atom, dapat diperoleh dengan penambahan detektor EDS ke mikroskop elektron. Saat probe elektron dipindai melintasi sampel, sinar-X karakteristik dipancarkan dan diukur; setiap spektrum EDS yang direkam dipetakan ke posisi tertentu pada sampel. Kualitas hasil tergantung pada kekuatan sinyal dan kebersihan spektrum. Kekuatan sinyal sangat bergantung pada rasio signal-to-noise yang baik, terutama untuk deteksi elemen jejak dan minimalisasi dosis (yang memungkinkan perekaman lebih cepat dan hasil bebas artefak). Kebersihan akan berdampak pada banyaknya puncak palsu yang terlihat; ini adalah konsekuensi dari bahan yang membentuk kolom elektron.

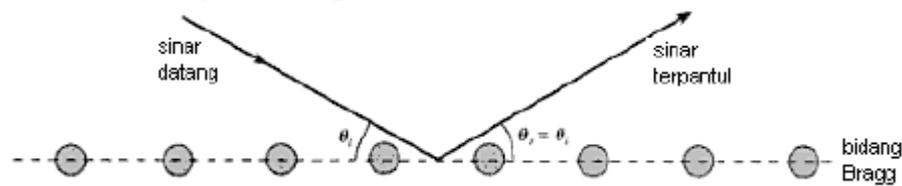
### 2.8.7 Analisa Struktur Mikro – X-Ray Diffraction

X-Ray Diffraction adalah salah satu pengujian material yang dapat digunakan untuk analisis kualitatif seperti identifikasi terhadap unsur ataupun senyawa, dan juga analisis kuantitatif seperti penentuan komposisi, ukuran kristal, densitas dislokasi, dan regangan mikro. Instrumen XRD menggunakan sinar x-ray untuk mengidentifikasi material, sinar x-ray ditembakkan secara terus menerus dengan perubahan sudut datangnya, sehingga menciptakan spektrum yang menjadi karakter dari material [35].

Hukum Bragg merupakan perumusan matematik mengenai proses difraksi yang terjadi sebagai hasil interaksi antara sinar x yang dipantulkan oleh material. Pantulan tersebut terjadi tanpa mengalami kehilangan energi sehingga menghasilkan pantulan elastis atau elastic scattering. Bragg menunjukkan bahwa bidang yang berisi atom-atom di dalam kristal akan memantulkan radiasi dengan cara yang sama persis dengan peristiwa pemantulan cahaya di bidang cermin.

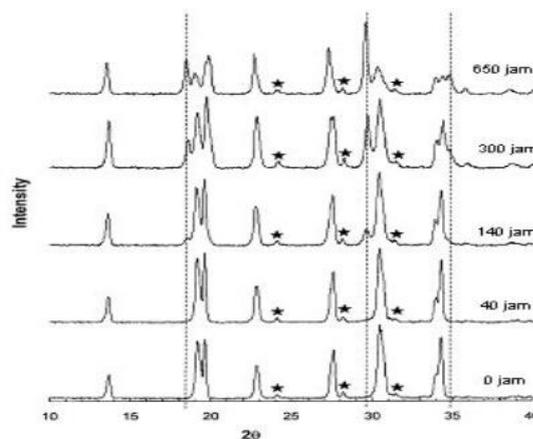
2.22 menampilkan skema dari pemantulan cahaya terhadap bidang Bragg.





**Gambar 2.22** Pemantulan cahaya pada bidang Kristal (bidang Bragg)

Diffractionmeter mencatat intensitas difraksi dari  $2\theta$  rendah hingga  $2\theta$  tinggi, pola difraksi yang dimunculkan merupakan sidik jari material dengan setiap puncaknya menunjukkan pola difraksi bidang tertentu. Full width at Half Maximum (FWHM) sangat responsif terhadap variasi didalam mikrostruktur dan akumulasi tegangan di dalam material. Perhitungan FWHM dikaitkan dengan distorsi butir, dislokasi dan tegangan sisa. Gambar 2.23 merupakan ilustrasi FWHM dari profil puncak XRD. Peningkatan pada kekerasan dan banyaknya cacat menyebabkan pelebaran FWHM dari puncak XRD. Selain itu, dengan keberadaan tegangan tarik di dalam material menyebabkan pelebaran FWHM, sebaliknya penghilangan tegangan akan menghasilkan penyempitan FWHM.



**Gambar 2.23** Skema ilustrasi FWHM dari profil puncak XRD

Pada analisa difraksi sinar x-ray dan kristalografi menggunakan persamaan Scherrer. Persamaan ini menjelaskan hubungan ukuran kristal dengan pelebaran puncak dalam pola difraksi, bentuk persamaan Scherrer ditampilkan pada persamaan (2.10) [36]:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2.10)$$



dimana:

- D = Ukuran kristal rata-rata (nm)
- K = Faktor bentuk kristalit (kristal kubik,  $K=0.94$ )
- $\lambda$  = Panjang gelombang sinar x-ray (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 (2.11) [36]:

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (2.11)$$

dimana:

- $\delta$  = Densitas dislokasi ( $nm^{-2}$ )
- D = Ukuran kristal rata-rata (nm)

