

UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PARTIKEL PENGUAT Al_2O_3 TERHADAP
KEKERASAN DAN KEAUSAN ALUMINIUM KOMPOSIT
 Al_5Cu HASIL PROSES THIXOFORMING**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk
memperoleh gelar SARJANA TEKNIK**

**PANNY RICKY
0405040562**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
DESEMBER
2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Panny Ricky

NPM : 0405040562

Tanda Tangan :

Tanggal :

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Panny Ricky
NPM : 0405040562
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Tesis : Pengaruh partikel penguat Al_2O_3 terhadap
kekerasan dan keausan Aluminium Komposit
 Al_3Cu hasil proses Thixofoming

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA (.....)
Penguji : Dr. Ir. Winarto, M.Sc (.....)
Penguji : Prof. Dr. Ir. Arne Zullia, M.Phil. Eng (.....)

Ditetapkan di : Depok
Tanggal :

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan YME yang dengan kasih dan sayang-Nya telah memberikan taufik dan hidayah kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Saya yakin tanpa adanya pertolongan Tuhan Yang Maha Esa serta bimbingan dari berbagai pihak dari awal perkuliahan sampai proses penyusunan skripsi, sangat sulit bagi saya untuk menyelesaikannya. Oleh karena itu saya ingin mengucapkan ucapan rasa terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA, sebagai Pembimbing dan Wakil Dekan Fakultas Teknik Universitas Indonesia
2. Dr. Ir. Winarto, M.Sc sebagai Tim Penguji dan Sekertaris Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia
3. Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia, M.Phil. Eng sebagai Tim Penguji
4. Prof. Dr. Ing. Ir. Bambang Suharno sebagai Ketua Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia
5. Seluruh staf pengajar dan Teknisi di Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
6. Kedua Orang Tua yang senantiasa memberi dukungan dan doa.
7. Keluargaku dan temanku tercinta, Linna Sayuri, Lisbeth Ernawati dan Zulfahmi serta Tulus Swasono atas segala pengorbanan dan doanya.
8. Rekan-rekan di Program Magister Pasca Sarjana Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia terutama, Maman Kartaman, ST dan Anton Norman ST.
9. Rekan-rekan di Program Doktor Pasca Sarjana Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia terutama Ir. Wahyono, MT, Ir. Richard, MT dan Ir. Yusuf, MT.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa memberikan balasan kebaikan kepada semua pihak yang telah membantu penulisan skripsi ini. Semoga hasil penelitian ini memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu material di Indonesia.

Depok,

Penulis,



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Panny Ricky
NPM : 0405040562
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : **“PENGARUH PARTIKEL PENGUAT Al_2O_3 TERHADAP KEKERASAN DAN KEAUSAN ALUMINIUM KOMPOSIT Al_5Cu HASIL PROSES THIXOFORMING”** beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 29 Desember 2010

Yang Menyatakan

(Panny Ricky)

ABSTRAK

Nama : Panny Ricky

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Judul : **Pengaruh Partikel Penguat Al_2O_3 terhadap Kekerasan dan Keausan Aluminium Komposit Al_5Cu Hasil Proses Thixoforming**

Komposit Matrik Logam dengan penguat partikel banyak diterapkan pada bidang keteknikan dikarenakan memiliki sifat yang baik seperti kekuatan tinggi, kekerasan tinggi, sifat tahan aus, koefisien ekspansi panas rendah dan harga bersaing. Jenis paduan yang banyak digunakan di industri paduan aluminium-tembaga ($AlCu$) yang bila di kombinasikan dengan alumina dari jenis keramik yang kuat dan keras akan membentuk suatu material baru berupa komposit matrik logam. Salah satu metode pembuatan komposit yang sekarang banyak dikembangkan adalah metode pembentukan semisolid. *Thixoforming* adalah proses pembentukan material dalam kondisi semisolid dengan pemanasan ulang ingot yang berstruktur mikro globular. Pada penelitian ini dilakukan pembuatan komposit dengan proses *thixoforming* pada matrik paduan Al_5Cu serta penguat berupa 5, 10, 15 dan 20 % V_f partikel Al_2O_3 . Penambahan 4 % magnesium pada komposit dilakukan untuk meningkatkan sifat *wetting* partikel Al_2O_3 . Karakterisasi komposit matrik logam Al_5Cu/Al_2O_3 dilakukan dengan pengujian mekanik (uji kekerasan dan keausan), pengujian metalografi, *SEM/EDS* dan *XRF*. Hasil pengujian menunjukkan foto *SEM* memperlihatkan penyebaran partikel alumina tersebar merata pada matrik. Komposit hasil *thixoforming* mengalami peningkatan sifat mekanis (kekerasan dan keausan) dengan penambahan fraksi volume penguat partikel Al_2O_3 .

Kata kunci : Komposit Matrik Logam Al_5Cu/Al_2O_3 , Pembentukan semisolid, *Thixoforming*, Sifat Mekanis.

ABSTRACT

Name : Panny Ricky

Study Program : Metalurgy and Material Engineering

Title : *The Effect of Alumina Particle Reinforced (Al_2O_3) for Hardness and Wearness Alumunium Composite Al_5Cu which made from Thixioforming Process*

Metal Matrix Composite with reinforced particles have been applied mostly in engineering materials due to the high strength, high hardness, high wear resistance, low heat coeffisien expansion and competitive prices. The most types of MMC alloying used for industrial components is aluminum-copper Alloys ($AlCu$). When this alloying is combined with ceramic alumina (Al_2O_3) can be produced the new materials of MMC. One of the recent developed manufacturing method for MMC is used by semi-solid forming method. Thixoforming is one of semi-solid forming process by reheating the ingots of MMC and continued by forged them into the parts. The research is focused on manufacturing of metal matrix composite by thixoforming process using the alloying matrix of Al_5Cu with the addition of particle reinforcement of 5, 10,15 and 20 % volume fraction (vf) of Al_2O_3 . The wetting agent of Al_2O_3 particles is used by the addition of 4 % of magnesium. The characterization of MMC was carried out by mechanical tests (hardness and wear resistance), and by Metallographic tests (microstructure) and also using SEM/EDS to characterize the microstructure of both matrix and reinforcement of MMC. The results show that MMC manufactured by Thixoforming process have increased mechanical properties (hardness and wear resistance) by increasing the volume fraction of Al_2O_3 . However, the bulk density of MMC is dereased by increasing the the volume fraction of Al_2O_3 . The SEM photographs shows that the alumina particles are randomly distributed into the MMC matrix.

Keywords : *Metal Matrix Composite of Al_5Cu/Al_2O_3 , Semi-Solid Forming, Thixoforming, Mechanical Properties.*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH.....	5
1.3 RUANG LINGKUP PENELITIAN.....	7
1.3.1 Bahan Penelitian.....	7
1.3.2 Parameter Proses.....	7
1.3.2 Karakterisasi.....	8
1.4 TUJUAN.....	9
1.5 SASARAN PENELITIAN.....	9
1.6 HASIL YANG DIHARAPKAN.....	9
2. DASAR TEORI.....	10
2.1 KOMPOSIT Matrik Logam.....	10
2.2 ALUMINIUM Matrik Komposit.....	12
2.3 <i>STIR CASTING</i>	14
2.4 MATERIAL PENYUSUN KOMPOSIT Matrik LOGAM.....	16
2.4.1 Paduan Al-Cu.....	16
2.4.2 Alumina.....	21
2.5 Metode Pembentukan <i>Semisolid</i>	22
3. METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1 PENJELASAN DIAGRAM ALIR PENELITIAN.....	33
3.1.1 Tahapan Persiapan Bahan dan Percobaan	33
3.1.2 Proses Pembuatan Komposit Aluminium Al ₅ Cu/Al ₂ O ₃ dengan Metode <i>Semisolid</i>	35
3.1.2.1 Pembuatan Paduan Al ₅ Cu.....	35
3.1.2.2 <i>Stir Casting</i> Al ₅ Cu/Al ₂ O ₃	35
3.1.2.3 <i>Thixoforming</i> Komposit Al ₅ Cu/Al ₂ O ₃	37
3.1.3 Persiapan Sampel Uji dan Perlakuan Panas	38
3.1.4 Proses Karakterisasi Komposit Aluminium Al ₅ Cu/Al ₂ O ₃	40
4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
4.1 HASIL PENGUJIAN.....	
4.1.1 Perhitungan Fraksi Volume, Berat dan Densitas Komposit Teoritis.....	43
4.1.2 Analisa Kimia.....	44

4.1.3	Hasil Pengukuran Butir Partikel Alumina dengan <i>SEM</i>	45
4.1.4	Hasil Uji Kekerasan.....	46
4.1.5	Hasil Uji Laju Keausan.....	46
4.1.6	Distribusi Alumina didalam Al_5Cu	47
4.1.7	Hasil Pengamatan metalografi.....	44
4.1.8	Distribusi Alumina di dalam matrik Al_5Cu	47
4.1.9	Hasil Pengamatan Metalografi.....	51
4.1.10	Pengujian <i>SEM</i> dan <i>EDS</i>	55
4.2	PEMBAHASAN.....	55
4.2.1	Analisa Kimia.....	55
4.2.2	Pengaruh Fraksi Volume Penguat Al_2O_3 dan Parameter <i>Aging</i> terhadap Kekerasan.....	56
4.2.3	Pengaruh Fraksi Volume Penguat Al_2O_3 dan Parameter <i>Aging</i> terhadap Ketahanan Aus.....	60
4.2.4	Hubungan Metalografi dan Distribusi Partikel dengan Sifat Mekanis.....	64
4.2.5	Hubungan Metalografi dan Distribusi partikel dengan Sifat Mekanis.....	64
5.	KESIMPULAN.....	76
	DAFTAR REFERENSI.....	78
	LAMPIRAN.....	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi komposit matrik logam	8
Gambar 2.2	Bentuk umum penguat <i>fiber</i> , dapat berupa <i>straight continuous fibers</i> , <i>discontinuous fiber</i> atau <i>whiskers</i> , <i>particles</i> atau <i>flakes</i> , atau <i>continuous fibers</i> yang dianyam.....	11
Gambar 2.3	Metalurgi peleburan komposit matrik logam.....	12
Gambar 2.4	Grafik kekuatan tarik dari jenis penguat dan fraksi volume yang berbeda.....	13
Gambar 2.5	Skema proses <i>melt steering</i>	15
Gambar 2.6	Perbedaan kekuatan tarik maksimum dan kekuatan <i>yield</i> dari pengujian tarik terhadap sejumlah paduan aluminium.....	17
Gambar 2.7	Diagram fasa Aluminium-Tembaga, daerah diarsir adalah daerah paduan aluminium seri 2xxx dengan kemampuan dikeraskan secara <i>presipitasi</i>	18
Gambar 2.8	Mekanisme pengerasan <i>presipitasi</i> pada paduan AlCu...	19
Gambar 2.9	Diagram waktu dan temperatur proses pengerasan <i>presipitasi</i> paduan AlCu.....	19
Gambar 2.10	Pengaruh temperatur pada sudut kontak pada Al-Mg / Al ₂ O ₃ dan Al ₂ O ₃ murni.....	21
Gambar 2.11	Struktur mikro a) dendritik and (b) <i>globular</i>	23
Gambar 2.12	Skema pemutusan dan perbanyakan dendritik.....	23
Gambar 2.13	Skema ilustrasi evolusi struktur pada proses pembekuan cairan dibawah kondisi <i>steering</i> .: (a) <i>initial dendritic fragment</i> ; (b) <i>dendritic growth</i> ; (c) <i>rosette</i> ; (d) <i>ripened rosette</i> ; (e) <i>spheroid</i>	24
Gambar 2.14	Jenis stiring: (a) <i>mechanical stirring</i> ; (b) <i>passive stirring</i> ; (c) <i>electromagnetic .vertical. stirring</i> ; (d) <i>electromagnetic .horizontal. stirring</i>	25
Gambar 2.15	Fungsi volume fraksi likuid sebagai fungsi temperatur pada beberapa paduan aluminium.....	26

Gambar 2.16	Kurva fraksi volume solid pada paduan A356 dan Al4,4Cu. Garis putus-putus menunjukkan temperatur eutektik..	27
Gambar 2.17	Bagan proses pembuatan logam <i>Semisolid</i>	29
Gambar 3.1	Proses Pembuatan bahan matriks Komposit Matrik Logam Al ₅ Cu.....	31
Gambar 3.2	Skema Penelitian Komposit Matrik Logam dengan <i>Squeeze Casting</i>	32
Gambar 3.3	<i>Ingot</i> aluminium murni.....	33
Gambar 3.4	<i>Ingot</i> Magnesium murni.....	33
Gambar 3.5	Tembaga murni.....	33
Gambar 3.6	Oksida Aluminium (Al ₂ O ₃)	33
Gambar 3.7	Cetakan tempa <i>semisolid</i> yang dilengkapi pemanas.....	34
Gambar 3.8	Dapur listrik untuk pembuatan komposit	35
Gambar 3.9	Proses <i>steering</i> cairan aluminium tembaga sambil melakukan proses pencampuran partikel alumina secara bertahap.....	36
Gambar 3.10	<i>Ingot</i> komposit Al ₅ Cu/Al ₂ O ₃ hasil <i>casting</i>	36
Gambar 3.11	Proses pemanasan kembali Al ₅ Cu/Al ₂ O ₃ untuk mencapai fasa <i>semisolid</i>	37
Gambar 3.12	Proses penempatan material <i>semisolid</i> komposit Al ₅ Cu/AL ₂ O ₃ di cetakan	37
Gambar 3.13	Proses penekanan material semi solid dalam cetakan tertutup. (a) <i>punch</i> bergerak turun. (b) penekanan disertai penahanan 3 detik. (c). <i>puch</i> bergerak naik.....	38
Gambar 3.14	Produk hasil <i>thxioforming</i>	39
Gambar 3.15	Proses perlakuan panas komposit hasil <i>forming semisolid</i>	39

Gambar 4.1	Hasil uji <i>XRF</i> terhadap serbuk Alumina.....	42
Gambar 4.2	(a), (b), Pengukuran butir serbuk alumina dengan <i>SEM</i> ...	46
Gambar 4.3	Distribusi Alumina pada matrik Al5Cu, hasil <i>casting</i> dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al_2O_3	47
Gambar 4.4	Distribusi Alumina pada matrik Al5Cu, hasil <i>thixoforming</i> tanpa <i>aging</i> dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al_2O_3	48
Gambar 4.5	Distribusi Alumina pada matrik Al5Cu, hasil <i>thixoforming</i> dan <i>Aging</i> 16 jam dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al_2O_3	49
Gambar 4.6	Distribusi Alumina pada matrik Al5Cu, hasil <i>Thixoforming</i> dan <i>aging</i> 28 jam dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al_2O_3	50
Gambar 4.7	<i>Metalografi</i> sampel hasil cor dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al_2O_3 . Perbesaran 500x.....	51
Gambar 4.8	<i>Metalografi</i> sampel hasil <i>thixoforming</i> dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al_2O_3 sebelum di <i>heat treatment</i> . Perbesaran 500x.....	52
Gambar 4.9	<i>Metalografi</i> sampel hasil <i>thixoforming</i> dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al_2O_3 setelah proses <i>solution treatment</i> 540 °C <i>hold</i> 4 jam kemudian di <i>aging</i> selama 16 jam. Perbesaran 500x.....	53
Gambar 4.10	<i>Metalografi</i> sampel hasil <i>thixoforming</i> dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al_2O_3 setelah proses 540 °C <i>hold</i> 4 jam kemudian di <i>aging</i> selama 28 jam. Perbesaran 500x.....	54
Gambar 4.11	Hasil uji kekerasan ingot komposit dan hasil <i>thixoforming</i> tanpa perlakuan panas.....	57
Gambar 4.12	Hasil uji kekerasan produk <i>thixoforming</i> di <i>solution treatment</i> pada temperatur 540 °C dan di <i>aging</i> pada temperatur 200 °C selama 16 dan 28 jam.....	59
Gambar 4.13	Grafik hasil uji laju keausan pada <i>ingot</i> komposit dan hasil <i>thixoforming</i>	62

Gambar 4.14	Grafik hasil uji laju keausan pada hasil <i>thixoforming</i> setelah di laku panas T6 dengan waktu <i>aging</i> 16 dan 28 jam	63
Gambar 4.15	Distribusi partikel alumina pada fraksi volume 5 % Al ₂ O ₃ ; (a) <i>ingot</i> , (b) <i>thixoforming</i> , (c) T6, <i>aging</i> 16 jam, (d) T6, <i>aging</i> 28 jam.....	65
Gambar 4.16	Distribusi partikel alumina pada fraksi volume 10 % Al ₂ O ₃ ; (a) <i>ingot</i> , (b) <i>thixoforming</i> , (c) T6, <i>aging</i> 16 jam, (d) T6, <i>aging</i> 28 jam	66
Gambar 4.17	Distribusi partikel alumina pada fraksi volume 15 % Al ₂ O ₃ ; (a) <i>ingot</i> , (b) <i>thixoforming</i> , (c) T6, <i>aging</i> 16 jam, (d) T6, <i>aging</i> 28 jam	67
Gambar 4.18	Distribusi partikel alumina pada fraksi volume 20 % Al ₂ O ₃ ; (a) <i>ingot</i> , (b) <i>thixoforming</i> , (c) T6, <i>aging</i> 16 jam, (d) T6, <i>aging</i> 28 jam	68
Gambar 4.19	Perubahan struktur mikro hasil laku panas T6 pada fraksi volume 5 % Al ₂ O ₃ ; (a) <i>ingot</i> , (b) <i>thixoforming</i> , (c) T6, <i>aging</i> 16 jam, (d) T6, <i>aging</i> 28 jam	69
Gambar 4.20	Perubahan struktur mikro hasil laku panas T6 pada fraksi volume 10 % Al ₂ O ₃ ; (a) <i>ingot</i> , (b) <i>thixoforming</i> , (c) T6, <i>aging</i> 16 jam, (d) T6, <i>aging</i> 28 jam	70
Gambar 4.21	Perubahan struktur mikro hasil laku panas T6 pada fraksi volume 15 % Al ₂ O ₃ ; (a) <i>ingot</i> , (b) <i>thixoforming</i> , (c) T6, <i>aging</i> 16 jam, (d) T6, <i>aging</i> 28 jam	71
Gambar 4.22	Perubahan struktur mikro hasil laku panas T6 pada fraksi volume 20 % Al ₂ O ₃ ; (a) <i>ingot</i> , (b) <i>thixoforming</i> , (c) T6, <i>aging</i> 16 jam, (d) T6, <i>aging</i> 28 jam	71
Gambar 4.23	Grafik perbandingan kekerasan dan keausan hasil casting	73
Gambar 4.24	Grafik perbandingan kekerasan dan keausan komposit... <i>thixoforming</i> tanpa perlakuan panas.....	73
Gambar 4.25	Gambar perbandingan kekerasan dan keausan komposit Hasil <i>thixoforming</i> dengan <i>solution treatment</i> 540 °C dan <i>aging</i> pada suhu 200 °C selama 16 jam.....	74

DAFTAR TABEL

Tabel I.1.1	<i>Physical properties</i> Alumina	14
Tabel I.1.2	<i>Mechanical properties</i> Alumina.....	17
Tabel II.1	Klasifikasi Paduan Alumunium.....	19
Tabel II.2	Kodifikasi Temper Paduan Alumunium.....	41
Tabel II.3	Karakterisasi Alumina.....	41
Tabel IV.1	Perhitungan Densitas Teoritis Paduan.....	42
Tabel IV.2	Perhitungan Berat Paduan.....	42
Tabel IV.3	Komposisi Kimia <i>Ingot</i> Magnesium	43
Tabel IV.4	Komposisi Kimia Serbuk Alumina.....	54
Tabel IV.5	Komposisi Kimia <i>Ingot</i> Alumunium.....	54
Tabel IV.6	Kekerasan <i>Ingot</i> komposit sebagai hasil cor.....	55
Tabel IV.7	Kekerasan hasil <i>Thxioforming</i>	59
Tabel IV.8	Analisa Kekerasan hasil <i>Thxioforming</i> setelah T6 dan <i>Aging</i> 16 jam.....	60
Tabel IV.9	Analisa Kekerasan hasil <i>Thxioforming</i> setelah T6 dan <i>Aging</i> 28 jam.....	60
Tabel IV.10	Analisa Perhitungan Laju Aus Komposit Hasil cor.....	62
Tabel IV.11	Analisa Perhitungan Laju Aus Komposit Hasil proses <i>Thxioforming</i> tanpa perlakuan panas.....	62

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Hasil Uji <i>SEM/EDS</i>	80
Lampiran 2	Data Uji Kekerasan.....	96
Lampiran 3	Data Uji Keusan.....	99





BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi material telah melahirkan suatu material jenis baru yang dibangun secara bertumpuk dari beberapa lapisan. Material inilah yang disebut komposit. Material komposit merupakan gabungan dari beberapa material yang dipadu sedemikian rupa tanpa terjadi proses kimiawi dengan tujuan menggabungkan sifat – sifat yang baik dari suatu material sehingga dihasilkan material yang memiliki karakter dan sifat yang berbeda. Pada umumnya komposit terdiri dari dua buah komponen, yaitu ,serat dan matriks. Serat berfungsi memberikan kekuatan tarik sedangkan matriks berfungsi untuk melindungi serat dari efek lingkungan dan benturan.

Banyak sekali serat yang digunakan pada material komposit, salah satunya adalah serat *carbon*. Komposit jenis ini memiliki sifat ringan dan kuat sehingga banyak digunakan pada struktur pesawat terbang, alat – alat olahraga dan pengganti tulang yang rusak. Selain itu polimer juga bisa digunakan sebagai serat atau penguat, *kevlar* merupakan salah satu contoh serat yang terbuat dari polimer. Serat polimer ini kuat dan ringan sehingga banyak digunakan sebagai rompi antipeluru.

Untuk tujuan khusus matriks logam bisa dibuat dari keramik, karbon dan logam. Ketiga material ini digunakan sesuai dengan kebutuhan yang diperlukan bagi dunia industri. Keramik digunakan pada lingkungan dengan temperatur tinggi sedangkan *carbon* digunakan pada produk yang menerima gaya gesek seperti : *bearing* dan *gear*. Pada umumnya komposit memiliki beberapa sifat unggul, yaitu : ketahanan lelah (*fatigue resistance*), ketahanan korosi (*corrosion resistance*), dan ketahanan aus (*wear resistance*) serta memiliki kekuatan yang dapat diatur (*tailorability*). Komposit Matriks logam (KML) dengan serat (penguat) partikel memiliki *mechanical properties* yang baik,

seperti : kekuatan tinggi, kekerasan tinggi, keausan tinggi, ketahanan *fatigue* dan kestabilan dimensi.

Salah satu paduan logam yang dipakai sebagai komposit adalah Alumunium tembaga atau AlCu. Paduan matriks ini dipadukan dengan serat atau penguat alumina atau karbida *silicon* sehingga akan dibentuk komposit matriks logam yang memiliki sifat kuat dan keras.

Pada sejumlah penelitian dan teori tentang teknologi komposit, sifat mekanis komposit almunium dengan perbedaan matriks dan serat bergantung dengan struktur mikronya. Sehingga pemilihan jenis, geometri dan volume fraksi dapat dikombinasikan untuk mendapatkan *mechanical properties* yang baik. Proses pembuatan komposit alumunium dapat dilakukan dengan berbagai cara, yaitu : *squeeze casting*, pembentukan *semisolid* dan lain – lain.

Penggunaan alumina sebagai penguat pada komposit matriks alumunium 7075 dengan proses *squeeze casting* menunjukkan peningkatan kekerasan secara linier terhadap fraksi volume alumina dan meningkatkan sifat tahan aus. Untuk meningkatkan sifat pembasahan antar matrik alumunium dengan serat Al₂O₃ maka ditambahkan logam magnesium pada campuran tersebut (lelehan alumunium).

Paduan AlCu dengan kadar Cu kurang dari 5,65 persen memiliki kemampuan untuk ditingkatkan kekerasannya dengan menggunakan metode presipitasi. Proses perlakuan panas T6 yang dilakukan pada paduan AlCu dengan presentase Cu 5% memperlihatkan bahwa kekerasan mengalami peningkatan secara signifikan pada aging 28 jam dengan temperatur 190 °C, yaitu 96 VHN.

Kemudian penelitian lain menunjukkan bahwa pada komposit matrik Al₅Cu/Al₂O₃ dapat meningkatkan kekerasan sampai 92,8% dan menurunkan laju keausan hingga 33,15%.

Pencegahan cacat *microsegregasi* dan *shrinkage* pada proses squeeze casting Al₄Cu₅ menunjukkan bahwa sound casting hanya dapat dicapai jika tekanan yang diberikan pada saat pembekuan berada pada kondisi $P_{sc} < P < P_{ms}$. Dari pengujian yang dilakukan diketahui bahwa *sound casting* dicapai pada temperatur cetakan yang tinggi dan temperatur cairan pada saat penuangan yang rendah (650-680 °C), pada tekanan 12-18 MPa dengan temperatur cetakan 250-300 °C. Jika tekanan $P > P_{sc}$ maka akan terjadi cacat mikrosegresi, dan jika $P < P_{ms}$ maka akan terjadi cacat *shrinkage*. Akan tetapi pengaruh temperatur cetakan lebih kecil dibanding pengaruh temperatur penuangan.

Proses *solution treatment* untuk aluminium 2014 (1 jam pada suhu 500 °C) tidak dapat menghasilkan homogenitas yang sempurna pada proses *thixoforming*. Dibutuhkan waktu yang lebih lama untuk pelarutan CuAl₂ yaitu 5 dan 17 jam. *Mechanical properties* yang baik dapat diperoleh apabila proses berlangsung selama 17 jam pada temperatur 500 °C, dilanjutkan dengan *quench* di air dan *aging* selama 24 jam pada temperatur 160 °C.

Proses pembentukan semisolid terbagi menjadi dua cara, yaitu : *thixoforming* dan *rheoforming*. *Thixoforming* merupakan proses pembentukan material dalam keadaan semisolid dengan pemanasan ulang ingot yang berstruktur mikro globular. Struktur logam semisolid merupakan jumlah butir dari dendrit yang terputus. Ini terjadi karena selama proses pembekuan terbentuk aliran yang menyebabkan lengan dendrit terputus sehingga yang terbentuk selanjutnya adalah partikel inti kedua. Tingginya *density* yang terbentuk membuat bertambahnya partikel non dendritik hal inilah yang menyebabkan terbentuknya *semisolid* logam material yang mempunyai dua fasa, yaitu cairan dan padatan.

Pada penelitian tentang fraksi volume solid paduan A356 dan Al4.4Cu diketahui kecilnya rentang temperatur 40-60% solid untuk paduan Al4.4Cu, yaitu pada rentang temperatur 625-635 °C. Terdapat beberapa keuntungan yang didapatkan pada pembentukan semisolid, salah satunya adalah sifat mekanis. Kekerasan dan ketahanan aus merupakan keuntungan yang didapatkan dari proses ini. Selain itu pula ketahanan korosi juga bisa diperoleh pada material *semisolid* ini. Keuntungan lain dari logam semisolid ini adalah mampu dilas dengan menggunakan TIG, MIG dan juga dapat diperlakukan proses heat treatment, misalnya T0 – T7. Disamping itu pula lapisan permukaan dari material ini baik.

Beberapa keunggulan dari sifat komposit matriks logam yang dibentuk melalui metode *thixoforming* inilah yang menjadi bahan pertimbangan dalam penelitian ini. Dengan variable penambahan fraksi volume penguat alumina (Al₂O₃) pada matrik AlCu.

Berikut ini adalah *physical properties* alumina (Al₂O₃)

Tabel 1.1.1 *physical properties* alumina (Al₂O₃)

Property	Value
Atomic composition	>99%
Crystalline structure	Corundum
Grain size (microns)	1-5
Density (g/cm ³)	3.95
Water absorption (%)	0

Berikut ini adalah *mechanical properties* pada suhu **20°C**

Tabel 1.1.2 *mechanical properties* alumina (Al_2O_3)

Property	Value
Vickers hardness (Hv 500g)	1800-2000
Tensile strength (N/mm^2)	200-250
Bending strength (N/mm^2)	200-600
Compressive strength (N/mm^2)	1900-2000
Young's modulus (N/mm^2)	3.8×10^5
Poisson's ratio	0.25-0.30
Fracture toughness $K_{IC}^{-1/2}$ (MPa.m)	4-5

Proses *thixioforming* ini diteruskan dengan proses *solution treatment* dan proses *artificial aging* dalam waktu yang berbeda supaya mendapatkan perlakuan panas optimum dan sifat mekanis yang baik.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Proses *thixioforming* dilakukan pada suhu antara garis solidus dan liquidus. Struktur butir sferoidit tersebar merata sebelum terjadinya proses *forging*. Proses nukleasi dan solidifikasi cairan eutektik merupakan factor utama untuk mendapatkan mikrostruktur yang ideal dan sifat mekanis yang baik pada proses *thixioforming*.

Pembuatan material *semisolid* dengan menggunakan metode *thixoforming* dapat dibagi menjadi 3 tahap. Tahap pertama adalah pembuatan logam batangan (*billet*). Mikrostruktur dari billet ini adalah *speorodite*. Struktur inilah yang biasanya terdapat pada aluminium casting AlCu. Kemudian setelah itu dilakukan proses pemanasan logam paduan AlCu pada temperatur antara garis solidus dan liquidus. Proses ini berlangsung sampai terjadi homogenisasi dan berlangsung cepat. Kemudian tahap akhir adalah proses pembentukan semisolid. Material yang telah dipanaskan tersebut di *forging* sampai terbentuk material *semisolid*.

Berdasarkan uraian diatas maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan pada proses pembuatan komposit matrik logam dengan proses *thixoforming* sebagai berikut:

1. Bertambahnya fraksi volume alumina (Al_2O_3) mampu meningkatkan sifat mekanis komposit terutama kekerasan dan ketahanan aus.
2. Rendahnya kemampuan sifat pembasahan alumina (Al_2O_3) terhadap matrik dapat ditingkatkan dengan penambahan magnesium
3. Proses pembuatan komposit dengan memberikan tekanan yang besar dapat meningkatkan sifat mekanis secara signifikan.
4. Pencegahan cacat mikrosegresi dan *shrinkage* pada proses *squeeze casting* Al4,5Cu menunjukkan bahwa pada *sound casting* hanya dapat dicapai pada temperatur cetakan yang tinggi dan temperatur cairan pada saat penuangan yang rendah.
5. Sifat mekanis yang baik pada aluminium 2014 diperoleh dengan melakukan *solution treatment* lebih lama dibanding waktu standar perlakuan panas T6
6. Fraksi volume solid paduan pada Al4.4Cu sulit dicapai secara tepat dikarenakan rendahnya rentang temperatur 40-60% solid, yaitu pada rentang temperatur 625-635 °C.⁹

1.3 RUANG LINGKUP PENELITIAN

Untuk mendukung kelancaran proses penelitian pada pembuatan material komposit matriks logam ini maka hal-hal penting, seperti : bahan baku komposit, parameter proses dan karakterisasi material harus dapat ditentukan.

1.3.1. Bahan Baku Penelitian

Bahan baku penelitian yang digunakan yaitu :

1. Aluminium murni
2. Tembaga (berasal dari kabel listrik)
3. Ingot magnesium sebagai *wetting agent*.
4. Al_2O_3 (99,91%) \pm 8,89-68,75 μm sebagai penguat (*reinforcement*)

1.3.2. Parameter Proses

Parameter proses digunakan sebagai pedoman pelaksanaan proses pembuatan komposit. Parameter tersebut diantaranya :

a). Parameter proses

Proses Pembuatan	: Tempa <i>thxioforming</i>
Prosentase Magnesium	: 4% berat
Prosentase Tembaga	: 5% berat
Prosentase penguat alumina	: 0, 5, 10, 15 dan 20 % berat
Temperatur proses pencairan	: 700 °C
Temperatur proses <i>thxioforming</i>	: 625-635 °C

b). Parameter *thxioforming*

Pouring temperature	: 635 °C
Dies temperature	: 300 °C
Pressure load	: 20 Ton
Pressure duration	: 3 detik

- Temperatur pengerjaan panas :
1. Solution heat treatment : 540 °C selama 4 jam
 2. Media quench : Air dengan suhu 26 °C
 3. Temperatur aging : 200 °C
- Waktu aging : 16 dan 28 jam

1.3.3 Karakterisasi material

Proses karakterisasi material dilakukan untuk mengetahui mechanical properties, berat jenis, porositas, komposisi kimia dan *metalography* serta mikrostruktur. Kesemuanya ini dilakukan sesuai dengan prosedur yang diatur ASTM maupun ISO dan JSM. Berikut ini adalah beberapa pengujian yang dilakukan beserta standar prosedur yang dilakukan :

Pengujian	Prosedur standar
Komposisi kimia (OES)	ASTM 227-90 (1996)
Tarik	ISO / TTA2 (1997)
Kekerasan	ASTM E 10-84 dan JIS Z 2243
Keausan	Manual book mesin Ogoshi
Porositas dan berat jenis	ASTM C 20-00
Metalography	ASTM E 407-93
SEM & EDS	Manual book JEOL-JSM-6390A

1.4 TUJUAN

Tujuan penelitian ini adalah untuk :

- a. Membuat komposit matrik logam dimana Al5Cu sebagai matrik dan Al₂O₃ sebagai penguat melalui proses *thxioforming*
- b. Mengetahui karakteristik komposit Al5Cu/Al₂O_{3(p)} yang dibuat dengan metode *thxioforming*

1.5 SASARAN PENELITIAN

Sasaran dari penelitian ini adalah :

- a. Mempelajari proses pembuatan material baru dengan menggunakan paduan Al5Cu sebagai matrik dengan Al₂O₃ sebagai penguat melalui proses *thxioforming*.
- b. Mengetahui pengaruh perbedaan fraksi volume penguat terhadap karakteristik komposit Al5Cu/ Al₂O₃ hasil proses *thxioforming*.
- c. Mengetahui pengaruh distribusi partikel Al₂O₃ terhadap sifat mekanik komposit.
- d. Mengetahui pengaruh perbedaan temperatur dan lamanya waktu penahanan (*holding time*) pada saat proses *aging* terhadap sifat mekanik komposit dan fasa-fasa yang terjadi.
- e. Mengetahui kelebihan dan kekurangan dari proses pembuatan komposit dengan proses *thxioforming*.

1.6 HASIL YANG DIHARAPKAN

Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan material Al5Cu (komposit) yang memiliki *mechanical properties* (kekerasan dan keausan) yang lebih baik dibandingkan material Al5Cu (komposit) sebelum ditambahkan partikel Al₂O₃ (penguat).

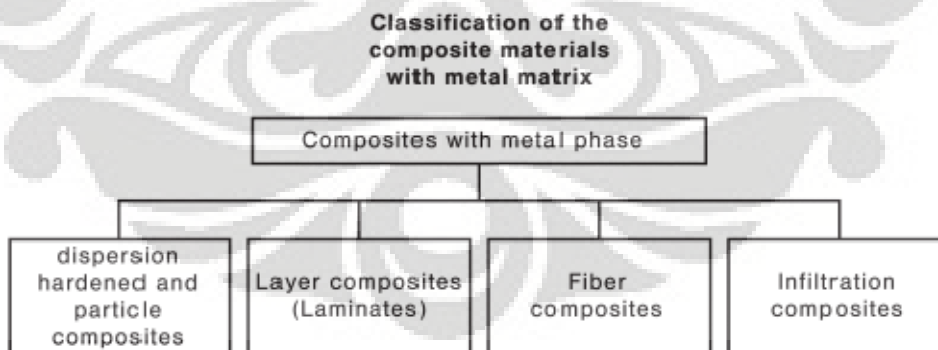
BAB 2

DASAR TEORI

2.1. KOMPOSIT MatriK LOGAM

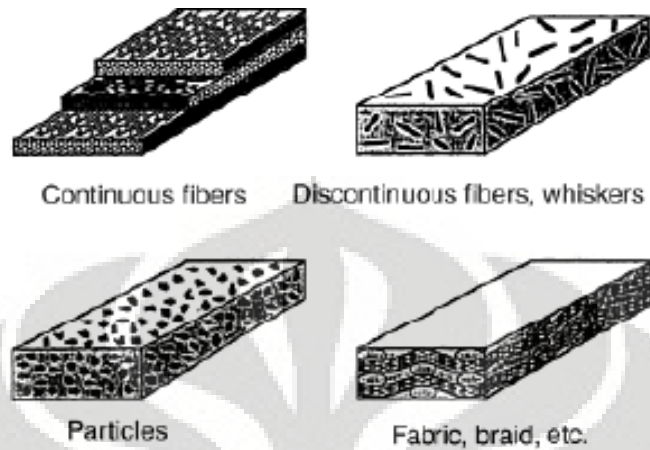
Komposit adalah perpaduan dalam skala makroskopis dari dua atau lebih material yang memiliki fasa berbeda, dipilih berdasarkan kombinasi fisik masing-masing material penyusun untuk menghasilkan material baru dengan sifat yang unik dibandingkan sifat dasar material sebelum dicampur dan terjadi ikatan permukaan antara material penyusun. Komposit terdiri dari dua penyusun, yaitu matrik dan penguat. Matriks adalah komponen penyusun dengan fraksi volume terbesar. Penguat adalah komponen yang dilindungi oleh matrik, berfungsi sebagai penahan beban utama.

Komposit matrik logam dapat diklasifikasi dengan beberapa cara. Salah satu klasifikasi adalah berdasarkan jenis dan kontribusi komponen penguat (*reinforce*) yang dapat berupa partikel, layer, fiber dan penetrasi material komposit .



Gambar 2.1 Klasifikasi komposit matrik logam¹²

Klasifikasi dari bentuk penguat fiber dapat dilihat dibawah ini :

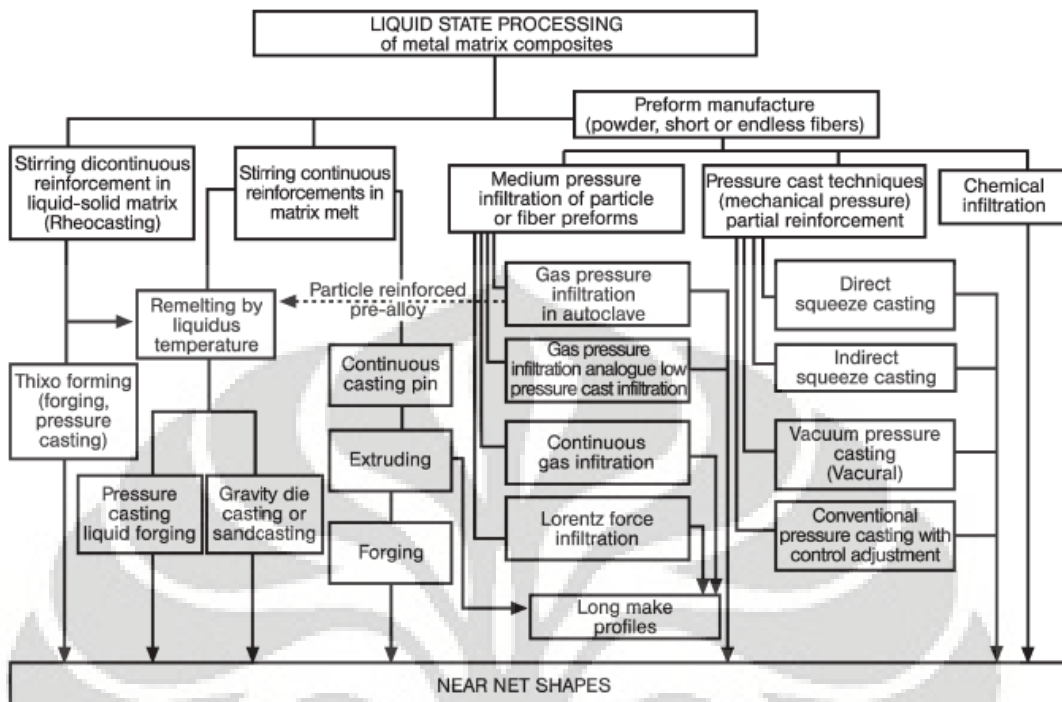


Gambar 2.2 Bentuk umum penguat *fiber*, dapat berupa *straight continuous fibers*, *discontinuous fiber* atau *whiskers* , *particles* atau *flakes*, atau *continuous fibers* yang dianyam.¹²

Untuk menghasilkan komposit matriks logam yang memiliki kekuatan yang baik serta ringan maka diperlukan adanya penyesuaian kombinasi matriks dan penguat yang tepat. Karakter material penguat yang baik memiliki sifat seperti :

1. Sifat mekanis yang baik
2. Kekuatan tarik yang tinggi
3. Kekuatan tekan yang tinggi
4. Modulus Young yang tinggi
5. Densitas yang rendah
6. Mudah diproses
7. Ekonomis

Metode yang paling banyak digunakan untuk menghasilkan komposit matriks logam adalah dengan teknik peleburan. Skema proses pembuatan komposit matriks logam dapat dilihat pada gambar 2.3



Gambar 2.3 Metalurgi peleburan komposit matrik logam. ¹²

2.2. ALUMINIUM Matrik Komposit

Paduan aluminium saat ini banyak digunakan pada berbagai aplikasi industri, khususnya pada industri otomotif. Hal ini terjadi karena sifat unggul dari material itu sendiri, misalnya : kekuatan, densitas rendah, mampu mesin, ketersediaan dan biaya yang murah dibanding paduan logam lain.

Beberapa keunggulan komposit aluminium dibandingkan paduannya yaitu :

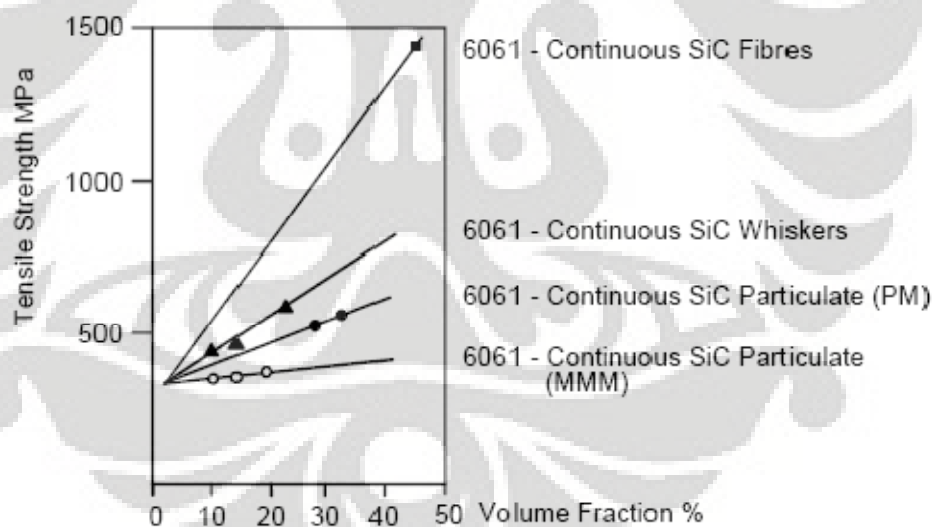
1. Kekuatan tinggi
2. Kekakuan meningkat
3. Densiti rendah dan tahan getaran
4. Menaikan sifat tahan temperatur tinggi
5. Memperbaiki koefisien panas ekspansi
6. Memperbaiki sifat tahan gesekan dan ketahanan aus

Berdasarkan jenis penguatnya, komposit matrik aluminium dapat dikelompokkan sebagai berikut :

- a. Penguat partikel
- b. Penguat whisker atau pendek
- c. Penguat fiber kontinu
- d. Penguat mono filamen.

Komposit matrik aluminium dengan penguat partikel memberikan sejumlah alternatif penggunaan karena komposit ini memiliki keunggulan dari sisi kapasitas panas spesifik dan konduktivitas panas tinggi, densiti rendah, kekuatan spesifik tinggi, kekakuan spesifik tinggi, koefisien ekspansi baik, ketahanan fatik kestabilan dimensi.

Pengaruh jenis penguat SiC terhadap kekuatan tarik paduan aluminium 6061 dapat dilihat pada gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4 Grafik kekuatan tarik dari jenis penguat dan fraksi volume yang berbeda¹³

Gambar 2.4 menjelaskan pengaruh dari berbagai geometri penguat berbeda terhadap kekuatan tarik. Dari grafik tersebut diketahui bahwa penguat jenis serat SiC memiliki kekuatan tertinggi dan penguat jenis partikel SiC memiliki kekuatan tarik terendah.

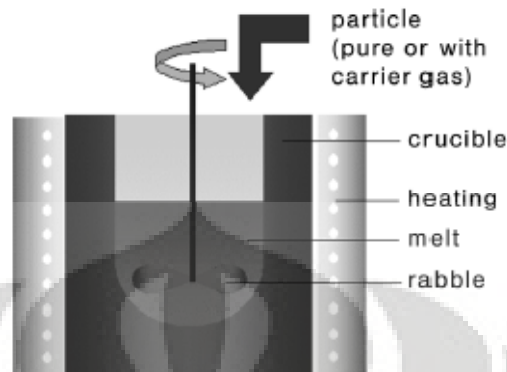
Pada sejumlah penelitian didapatkan bahwa sifat mekanis komposit logam sangat bergantung pada matriks dan penguat. Keduanya dapat mempengaruhi struktur mikro dari paduan tersebut. Oleh karena itu diperlukan adanya kombinasi yang tepat antara jenis, geometri dan volume fraksi yang dapat berpengaruh pada sifat dari komposit tersebut. Proses pembuatan komposit dapat dilakukan dengan berbagai cara, misalnya : infiltrasi cairan logam, *squeeze casting*, dan pembentukan dengan metode *thixoforming*, dan lain-lain.

Komposit dengan penguat partikel berukuran lebih dari 1 μm memiliki dua mekanisme penguatan yaitu partikel membawa beban dari matrik dan penguatan dengan pembentukan interface inkoheren antar partikel dengan matrik. Sehingga kekuatan komposit akan meningkat jika terdapat banyak dislokasi pada interface. Besarnya kekuatan komposit dipengaruhi oleh volume fraksi, distribusi dan bentuk partikel.

2.3. STIR CASTING

Stir casting merupakan proses peleburan matriks yang diikuti oleh pemberian penguat alumina disertai dengan pengadukan agar campuran antara matriks dan penguat menyatu sehingga dihasilkan leburan logam yang homogen. Pada saat dilakukan pengadukan, diusahakan pengadukan membentuk *vortex* pada cairan tersebut. Hal ini dilakukan untuk menghambat adanya partikel pengotor dan partikel penguat terbentuk dipermukaan lelehan. Tetapi terdapat kelemahan pada metode ini, udara akan terjebak masuk kedalam *vortex*, terutama pada saat viskositas lelehan meningkat.

Skema operasi dari *melt stirring* ditunjukkan gambar 2.5 ¹².



Gambar 2.5 Skema proses melt steering ¹²

Stir casting merupakan metode *liquid state fabrication* yang paling mudah dan efektif dibandingkan dengan metode lain, seperti : *gas pressure infiltration*, *squeeze casting infiltration*, dan *pressure die infiltration*. Stir casting menggunakan pengaduk logam dengan sudut pengadukan 45° . Hal ini dilakukan dengan tujuan agar partikel pada bagian atas menyatu dengan partikel dibagian bawah sehingga lelehan akan tercampur baik meskipun tidak mungkin dihasilkan campuran homogen yang sempurna antara penguat alumina dengan matriksnya.

Tipe pengaduk yang digunakan biasanya berbentuk blade atau turbin dan diusahakan memiliki titik leleh yang lebih tinggi daripada titik lebur matrik logam atau temperatur peleburan matriks dengan penguat (700°C). Oleh karena itu kebanyakan pengaduk terbuat dari baja yang *melting pointnya* lebih tinggi daripada temperatur peleburan. Misalnya : *carbon steel*, *alloy steel* dan lain – lain. Pada saat melakukan pengadukan leburan komposit disarankan bahwa posisi dari propeller dari bagian dasar *crucible* (h) dibandingkan dengan tinggi *crucible* (H) adalah $h/H = 0,35$. Untuk mendapatkan jumlah pori yang sedikit dan partikel yang banyak maka perbandingan antara $h/H = 0,5$.

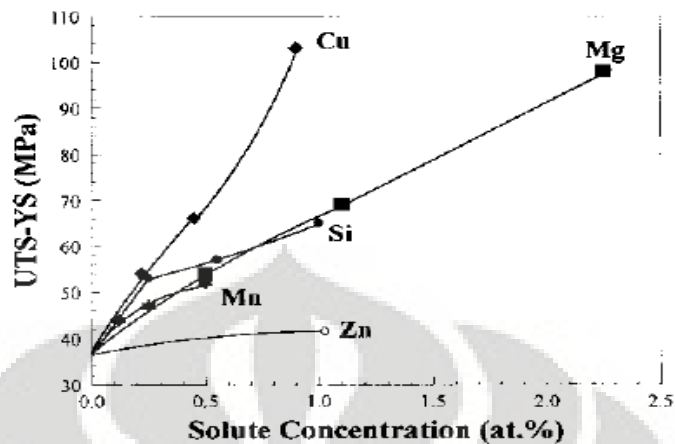
2.4. MATERIAL PENYUSUN KOMPOSIT Matrik Logam

2.4.1 Paduan Al-Cu

Paduan aluminium pada umumnya dapat dibagi menjadi 8 seri, hal ini dapat kita lihat pada tabel II.1. Pembagian paduan aluminium dilakukan berdasarkan jenis unsur dari paduan utamanya. Penulisan kode dari aluminium ini terdiri dari 4 digit, yang dimulai dengan angka 1 (seri 1xxx) sampai dengan 8 (seri 8xxx). Kedelapan seri ini dibagi lagi menjadi dua bagian, pembagian ini dilakukan berdasarkan kemampuan untuk dilakukan proses perlakuan panas (*heat treatment*). Pembagian klasifikasi itu dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu ; paduan yang dapat diberikan laku panas (*heat treatable*) dan tidak dapat di laku panas (*non heat treatable*).

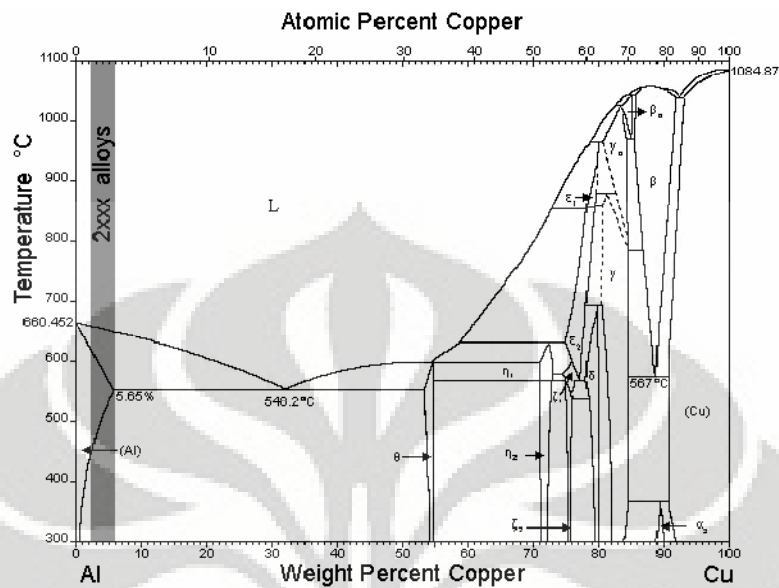
Tabel II.1. Klasifikasi Paduan Aluminium¹⁸.

	Major alloying element	Atoms in solution	Work hardening	Precipitation hardening		
WROUGHT ALLOYS*) EN AW-	1XXX	None (min. 99.00% Al)	X		Non-heat treatable alloys	
	3XXX	Mn	X			
	4XXX	Si	X			
	5XXX	Mg	X			
	2XXX	Cu	X	(X)	X	Heat treatable alloys
	6XXX	Mg + Si	X	(X)	X	
	7XXX	Zn	X	(X)	X	
	8XXX	Other	X	(X)	X	



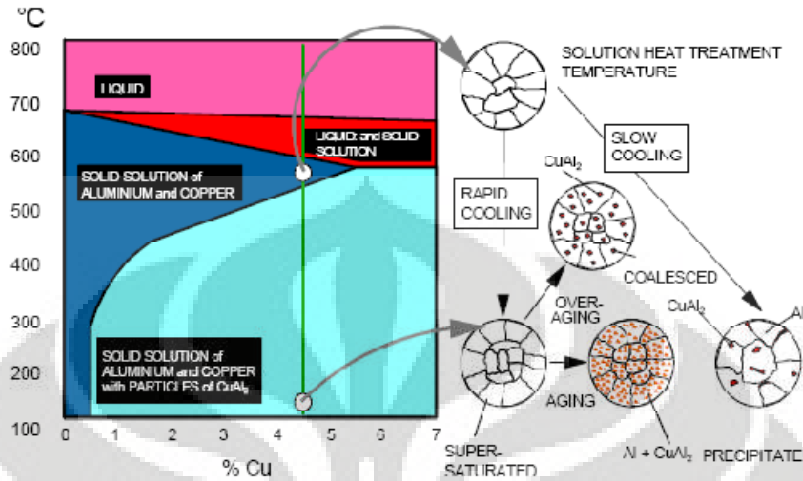
Gambar 2.6 Perbedaan kekuatan tarik maksimum dan kekuatan yield dari pengujian tarik terhadap sejumlah paduan aluminium¹⁹.

Pada grafik yang terdapat pada Gambar 2.6 menunjukkan perbedaan kekuatan tarik paduan aluminium dengan beberapa logam paduan. Pada Gambar 2.6 memperlihatkan bahwa unsur logam Cu memiliki kekuatan tarik yang lebih besar dibandingkan dengan logam Mg, Si, Mn dan Zn. Oleh karena itu paduan logam aluminium tembaga banyak digunakan pada aplikasi yang membutuhkan kekuatan tarik yang tinggi. Paduan yang mempunyai kekuatan tarik tinggi mampu menahan tegangan maksimum yang diberikan pada material tersebut, oleh karena itu material dengan kekuatan tarik tinggi banyak digunakan untuk *aircraft*, *automotive*, aplikasi *manufacturing industries*, *bridge*, *building* dan lain – lain. Dari gambar 2.6 juga terlihat bahwa *yield strength* dari Cu lebih tinggi daripada logam Mn, Zn dan Si meskipun nilainya lebih kecil daripada Mg. hal ini membuktikan bahwa logam paduan Cu memiliki kemampuan deformasi yang tinggi sehingga cukup sulit dilakukan perubahan dimensi dibandingkan unsur Mn, Zn dan Si apabila dilakukan proses *forging*.



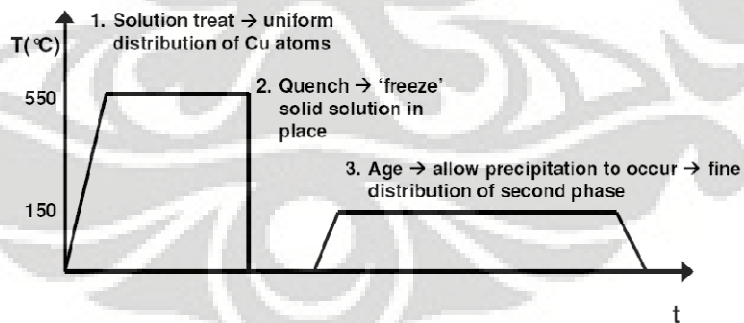
Gambar 2.7 Diagram fasa Aluminium-Tembaga, daerah diarsir adalah daerah paduan aluminium seri 2xxx dengan kemampuan dikeraskan secara presipitasi¹⁵

Paduan hipoeutektik ini lebih dikenal dengan paduan aluminium seri 2xxx, memiliki kandungan tembaga antar 2,3 – 6,3 %. Garis solvus pada diagram Al-Cu di gambar 2.7, menunjukkan kemampuan material untuk dikeraskan dengan metode presipitasi. Cara pengerasan tersebut adalah dengan memanaskan material pada temperatur disekitar daerah fasa solid dan kemudian di *aging* di temperatur rendah.



Gambar 2.8 Mekanisme pengerasan presipitasi pada paduan Al5Cu.¹⁸

Proses pengerasan presipitasi pada gambar diatas merupakan salah satu cara untuk meningkatkan kekuatan atau kekerasan. Presipitasi dilakukan dengan cara pembentukan larutan lewat jenuh (*supersaturated*) dan kemudian dilakukan penyebaran endapan (*presipitat*).



Gambar 2.9 Diagram waktu dan temperatur proses pengerasan presipitasi paduan AlCu.

Pengerasan presipitasi dilakukan dengan melalui dua tahapan proses. Tahap pertama adalah pemanasan hingga kondisi lewat jenuh yang dinamakan *solution treatment*. Kemudian tahap selanjutnya adalah proses aging, proses ini dilakukan setelah pendinginan cepat (*quenching*). *Aging* adalah pemanasan yang bertujuan untuk untuk mempercepat pembentukan fasa kedua dan koherensi presipitat. Fasa koheren ini berfungsi sebagai penghambat pergerakan dislokasi sehingga menghasilkan paduan yang keras dan tangguh.

Solution treatment dilakukan dengan memanaskan paduan pada temperatur sedikit dibawah titik lebur paduan, kemudian temperatur ditahan hingga aluminium melarutkan sebagian besar unsur tembaga. Selanjutnya paduan didinginkan secara cepat agar diperoleh sebanyak mungkin unsur tembaga yang terjebak dalam aluminium hingga dihasilkan larutan padat lewat jenuh. Kondisi lewat jenuh ini tidak stabil. Proses selanjutnya adalah penuaan (*aging*) di atas temperatur ruangan (*artificial aged*), untuk mempercepat proses presipitasi. Rentang waktu dan temperatur *aging* tergantung pada jenis paduan.

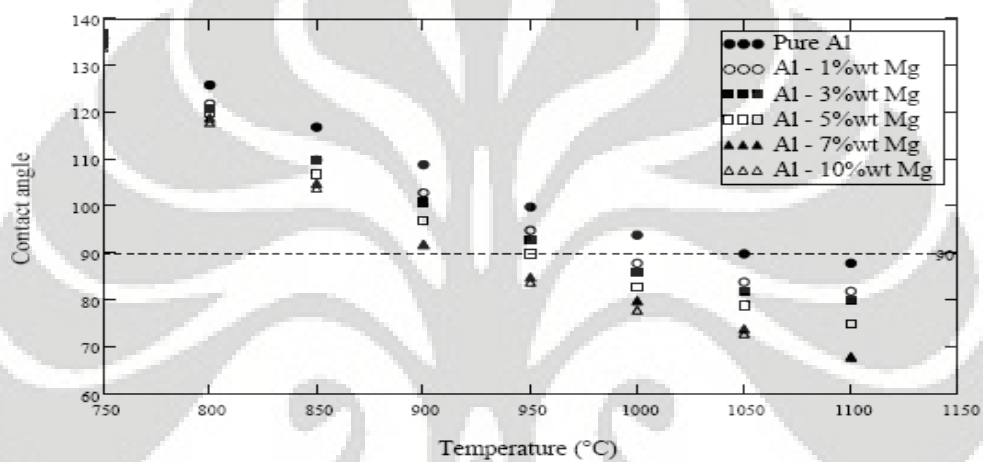
Pada proses *aging* yang di *solution treatment* pada temperatur 500 °C selama 2 jam lalu di *quenching* di air dan di *aging* pada temperatur 190 °C, diperoleh hasil bahwa kekerasan tertinggi dicapai oleh paduan Al5Cu yang diaging selama 28 jam. Jenis perlakuan panas ini adalah Perlakuan panas T6 untuk paduan mampu dilaku panas sebagaimana pada tabel diatas.

Tabel II.2 Kodifikasi temper paduan aluminium

XXXX	-F -O	as-fabricated annealed	
XXXX	-H1 -H2 -H3 -H32 -H34 -H36 -H38	Work-hardened only Work-hardened and partially annealed Work hardened and stabilized by low temperature treatment Quarter-hard Half-hard Three-quarter-hard Fully-hard	NON-HEAT TREATABLE ALLOYS
		} Degree of cold working	
XXXX	-T2 -T4 -T5 -T6 -T8	Cooled from an elevated temperature and naturally aged Solution heat-treated and naturally aged Cooled from an elevated temperature shaping process and artifically aged Solution heat treated and artifically aged Solution heat-treated, cold worked and aged	HEAT TREATABLE ALLOYS

2.4.2. Alumina

Alumina memiliki sifat *wetting* yang kurang baik. Oleh karena itu diperlukan perlakuan khusus atau penambahan unsur tertentu untuk meningkatkan sifat *wetting* alumina. *Wetting* pada Al/Al₂O₃ dapat terjadi pada temperatur diatas 1050 °C, namun jika ditambahkan magnesium Al-Mg/ Al₂O₃ temperatur *wetting* dicapai pada temperatur 900-1000 °C³.



Gambar 2.10 Pengaruh temperatur pada sudut kontak pada Al-Mg/Al₂O₃ dan Al/ Al₂O₃ murni³.

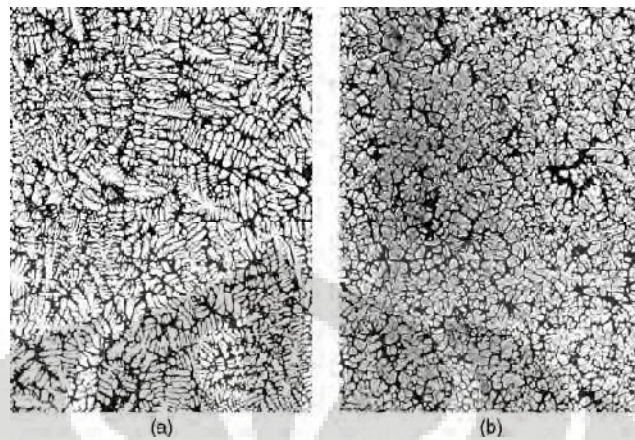
Pada grafik diatas dapat dilihat bahwa peningkatan temperatur memperkecil sudut kontak dengan alumina. Dari garafik tersebut juga diperlihatkan bahwa paduan dengan kandungan Mg tinggi membutuhkan temperatur yang lebih rendah agar terjadi *wetting* pada alumina. Paduan Al-7%Mg dan Al-10%Mg dapat membasahi alumina pada temperatur 900 °C. Pada gambar 2.10 diketahui sudut kontak lebih kecil dari 90° untuk penambahan 5 % Mg baru tercapai di atas suhu 950 °C. Namun sudut kontak akan semakin kecil jika persentase magnesium ditingkatkan.

Tabel II.3 Karakteristik alumina³

		Category		Alumina				
		Mark	AR-99.6	AR(P)	ARW	ARK	AR-4N	
Properties	Unit	Method						
Purity (Al ₂ O ₃)	%	—	99.6	99.96	99.6	96.0	99.99	
Color	—	—	Ivory	Yellow	White	White	White	
Density	g/cm ³	R 1634	3.94	3.98	3.90	3.75	3.94	
Mechanical	Bending Strength	MPa[3point]	R 1601	370	425	400	370	330
	Young's Modulus	GPa	R 1602	390	410	370	340	360
	Hardness(HV)	GPa	R 1610	14.7	15.7	14.7	14.0	15.7
	Poisson's Ratio	—	R 1602	0.24	0.24	0.24	0.24	0.23
	Fracture Toughness	MPa m ^{1/2}	R 1607,SEVNB	4.0	4.0	3.0	3.0	4.0
Thermal	CTE	x10 ⁻⁶ [RT~800°C]	R 1618	7.7	7.8	7.7	7.7	7.7
	Thermal Conductivity	W/(m·K)	R 1611	32.0	34.0	28.0	23.0	31.0
	Specific Heat	J/(kg·K)	R 1611	0.78 × 10 ³	0.78 × 10 ³	0.78 × 10 ³	0.78 × 10 ³	0.78 × 10 ³
Electrical	Dielectric Constant	[1MHz]	Non-contact Electrode Method	10.2	9.8	9.7	9.5	9.5
	Dissipation Factor	x10 ⁻⁴ [1MHz]	Non-contact Electrode Method	70	5	5	5	5
	Volume Resistivity	Ω·cm	C 2141	>10 ¹⁵	>10 ¹⁵	>10 ¹⁵	>10 ¹⁵	>10 ¹⁵
	Withstand Voltage	kV/mm	C 2110	13.0	15.0	14.5	14.5	13.0
Optical	Reflectivity	% [λ =240~2,600nm, Ra0.8]	R 3106	—	—	—	—	—

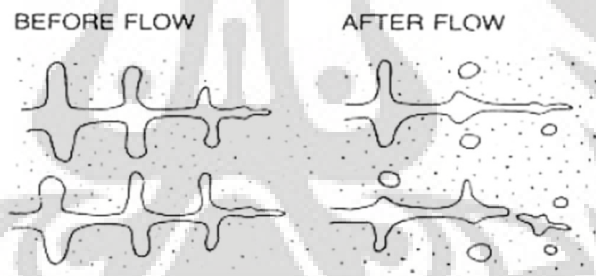
2.5. Metode Pembentukan Semi Solid

Proses pembentukan logam *semisolid* tergolong teknologi yang baru. Metode ini ditemukan oleh Flemings pada tahun 1971. Flemings dan rekannya meneliti sifat solidifikasi cairan logam yang partikel solidnya berbentuk *globular*, dimana pada kondisi normal mikrostruktur logam berbentuk dendritik seperti ditunjukkan gambar 2.11. Proses pembentukan logam dalam keadaan *semisolid* atau fasa lumpur adalah melakukan pembentukan logam pada kondisi *semisolid* dimana dalam matrik fasa cairan tersebar partikel solid non dendritik atau globular.



Gambar 2.11 Struktur mikro a) dendritik and (b) globular

Pada gambar 2.12 ditunjukkan bahwa pada saat terjadi proses pembekuan lengan dendritik mengalami proses pencairan atau pemutusan lengan sehingga dihasilkan partikel solid yang berbentuk globular. Pertumbuhan sel non dendritik atau globular inilah yang menyebabkan terbentuknya semisolid logam.



Gambar 2.12 Skema pemutusan dan perbanyakan dendrit

Semisolid logam dapat dibagi menjadi dua macam :

- a. Cairan seperti lumpur yang didalamnya tersebar partikel solid dan jika dikenai gaya dari luar memiliki sifat seperti fluida.
- b. Solid seperti lumpur yang terdiri dari putusan fasa solid memiliki sifat seperti solid.

Terdapat beberapa hal yang dapat mempengaruhi kondisi semisolid.

- Pengaruh fraksi *semisolid*

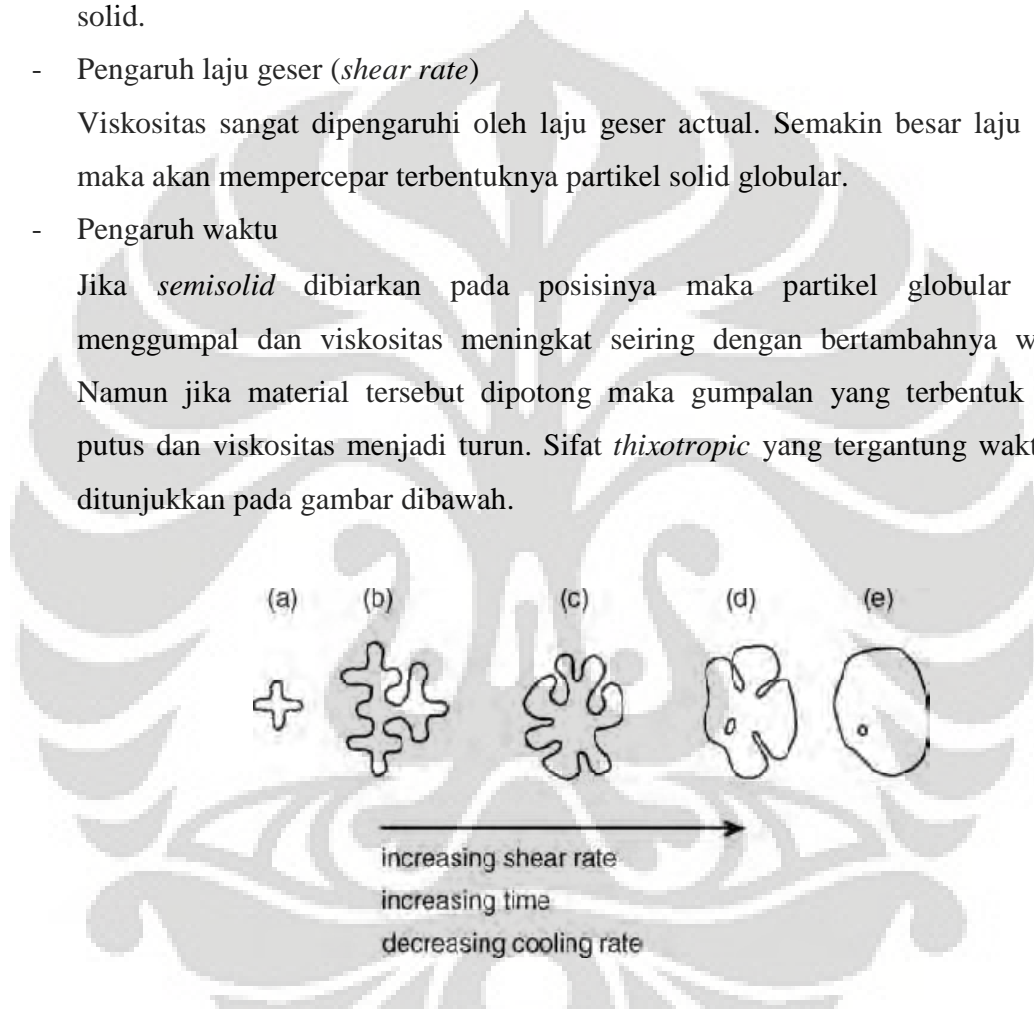
Viskositas *semisolid* dipengaruhi oleh besarnya volume fraksi partikel solid. Kondisi *semisolid* yang ideal biasanya jika terdapat lebih dari 35-50% partikel solid.

- Pengaruh laju geser (*shear rate*)

Viskositas sangat dipengaruhi oleh laju geser actual. Semakin besar laju geser maka akan mempercepat terbentuknya partikel solid globular.

- Pengaruh waktu

Jika *semisolid* dibiarkan pada posisinya maka partikel globular akan menggumpal dan viskositas meningkat seiring dengan bertambahnya waktu. Namun jika material tersebut dipotong maka gumpalan yang terbentuk akan putus dan viskositas menjadi turun. Sifat *thixotropic* yang tergantung waktu ini ditunjukkan pada gambar dibawah.

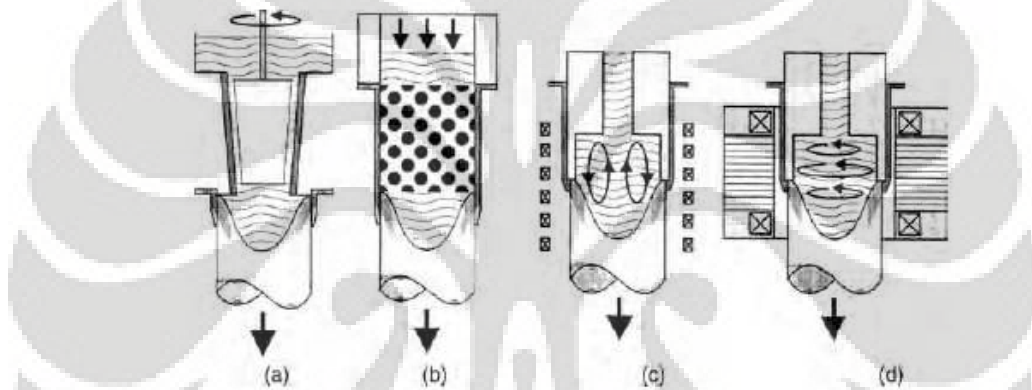


Gambar 2.13 Skema ilustrasi evolusi struktur pada proses pembekuan cairan dibawah kondisi steering.: (a) *initial dendritic fragment*; (b) *dendritic growth*; (c) *rosette*; (d) *ripened rosette*; (e) *spheroid*²³

Pembuatan komponen dengan *semisolid* terdiri dari tiga tahap²².

a. Pembuatan bilet

Pembuatan bilet ini ditujukan untuk membuat bilet dengan mikrostruktur berupa butiran halus berbentuk bulatan kecil. Pembuatan bilet dapat dilakukan dengan metode stir casting sebagaimana gambar 2.14.



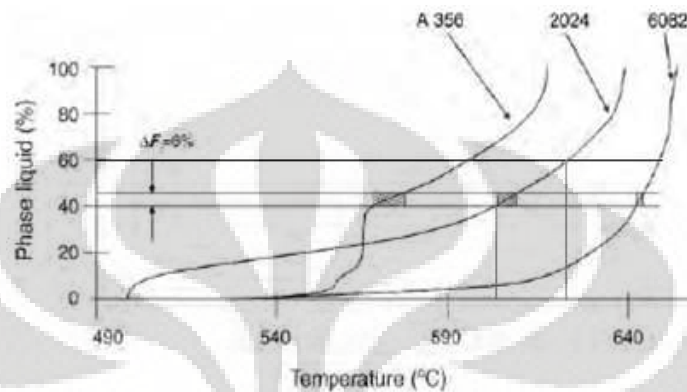
Gambar 2.14 Jenis stirring: (a) *mechanical stirring*; (b) *passive stirring*; (c) *electromagnetic .vertical. stirring*; (d) *electromagnetic .horizontal. stirring*²²

b. Pemanasan ulang untuk mencapai kondisi semi solid

Pemanasan bilet secara akurat dan homogen hingga mencapai *semisolid* membutuhkan strategi dan peralatan khusus yang dilengkapi dengan sistem kontrol. Biasanya yang digunakan adalah pemanas induksi. Pemanasan bilet harus memenuhi syarat:

- Cepat, untuk menghindari pertumbuhan butir
- Ketepatan dalam mencapai jumlah fasa cair yang diinginkan
- Homogen pada seluruh volume bilet untuk menghindari perbedaan sifat.

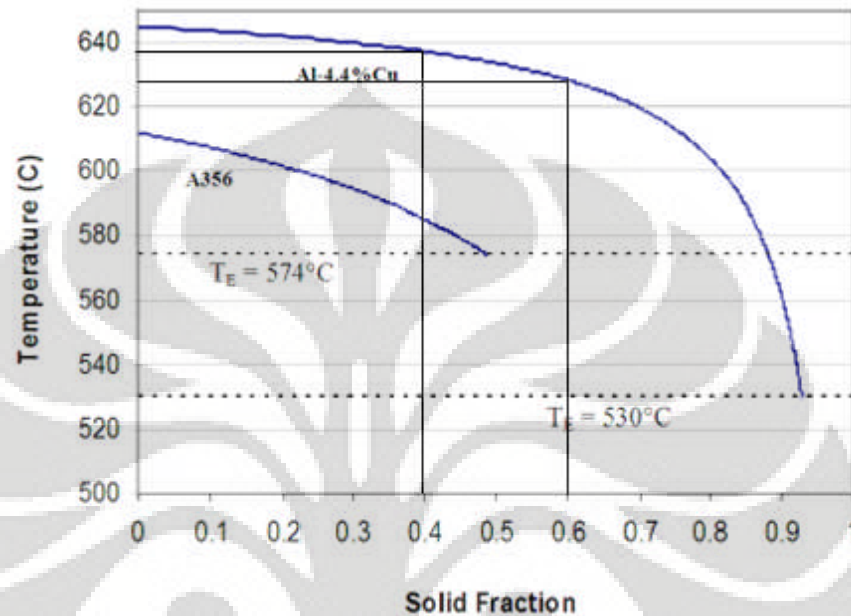
Pada gambar 2.15 terlihat daerah interval temperatur *semisolid* sangat kecil, sehingga perubahan kecil pada temperatur mengakibatkan perubahan signifikan pada fraksi cairan yang terbentuk



Gambar 2.15 Fungsi volume fraksi likuid sebagai fungsi temperatur pada beberapa paduan aluminium.

Proses pengukuran suhu untuk mengetahui kondisi semisolid dapat dilakukan dengan menggunakan termokopel. Termokopel diletakkan pada bagian dasar tungku peleburan, tepatnya diselah – sela antara pemanas dan wadah peleburan. Penggunaan termokopel ini masih memiliki kekurangan, salah satu kekurangan dari penggunaan alat ini adalah tidak dapat mendeteksi konduktivitas elektrik dari billet tersebut sehingga diperlukan adanya metode pengukuran yang lebih baik daripada termokopel. Salah satu pengukuran suhu yang cukup akurat adalah dengan menggunakan alat pengukur khusus yang menggunakan *infrared temperature sensor*. Alat ini dapat mengukur sampai 3000 °C. Alat ini dibuat untuk peleburan *ferrous* dan *nonferrous*, *furnace*, *petroleum*, *induction heating*, dan lain – lain. Dengan menggunakan sensor *infrared* yang diletakkan dicelah tungku bagian bawah maka akan dihasilkan pengukuran secara digital pada layar pengukuran. Kekurangan alat ini adalah tidak memiliki system penghenti pada saat temperatur yang kita inginkan tercapai, hal ini akan mengakibatkan pengukuran suhu akan tidak terkontrol apabila tidak diawasi secara cermat pada alat tersebut.

Pada gambar dibawah ini kita dapat melihat bahwa setiap paduan alumunium memiliki fraksi volume yang berbeda. Paduan Al4.4Cu memiliki fraksi solid sebesar 40 – 60 % pada rentang temperatur sekitar 625-635 °C.



Gambar 2.16 Kurva fraksi volume solid pada paduan A356 dan Al4,4Cu. Garis putus-putus menunjukkan temperatur eutektik.⁹

Terdapat berbagai macam metode pembentukan paduan semisolid, beberapa metode tersebut antara lain :

1. UBE rheocasting

Merupakan proses rekayasa pembentukan paduan semipadat dengan mengatur kondisi pembekuan. Leburan metal dengan suhu mendekati garis liquidus dituang kedalam tungku peleburan dan terjadi proses pembentukan inti butir pada sisi tungku tersebut. Butir yang terbentuk memiliki struktur yang halus karena terbentuk pada suhu dekat mendekati garis liquidus. Proses ini memerlukan biaya yang lebih murah dibandingkan dengan menggunakan metode thxioforming. Pada metode ini scrap dapat langsung direcycled didalam plant.

2. The Cooling Slope Method

Merupakan metode dengan menggunakan proses penuangan yang sederhana dari kondisi yang panas dengan menggunakan lekukan miring atau bidang miring yang kemudian jatuh dicetakan dan membeku. Struktur Kristal globular terbentuk dibidang miring. Pada leburan mengandung sejumlah inti kristal, membeku dicetakan, sehingga dihasilkan struktur kristal globular yang halus. Ukuran dari ingot dapat ditentukan dari berat leburan logam dan diameter cetakan. Ingot yang dihasilkan dari proses ini dapat langsung digunakan untuk proses *rheofforming* atau *thxioforming* apabila telah dilakukan proses reheating yang sesuai.

3. Gas Bubble Technique

Merupakan metode pembentukan paduan semipadat dengan mengalirkan gelembung gas kedalam leburan sehingga dihasilkan agitasi selama tahapan awal proses pembekuan. Proses percobaan dengan paduan aluminium A357 menunjukkan bahwa kemungkinan terbentuknya struktur globular semisolid. Dengan menggunakan gas sebagai *diffuser* yang ditempatkan dibawah leburan, gelembung gas argon dialirkan. Proses ini berhenti sampai temperatur pembentukan *semisolid* tercapai, lalu dilakukan proses pendinginan leburan sehingga dihasilkan struktur globular yang halus.

4. The SEED Process

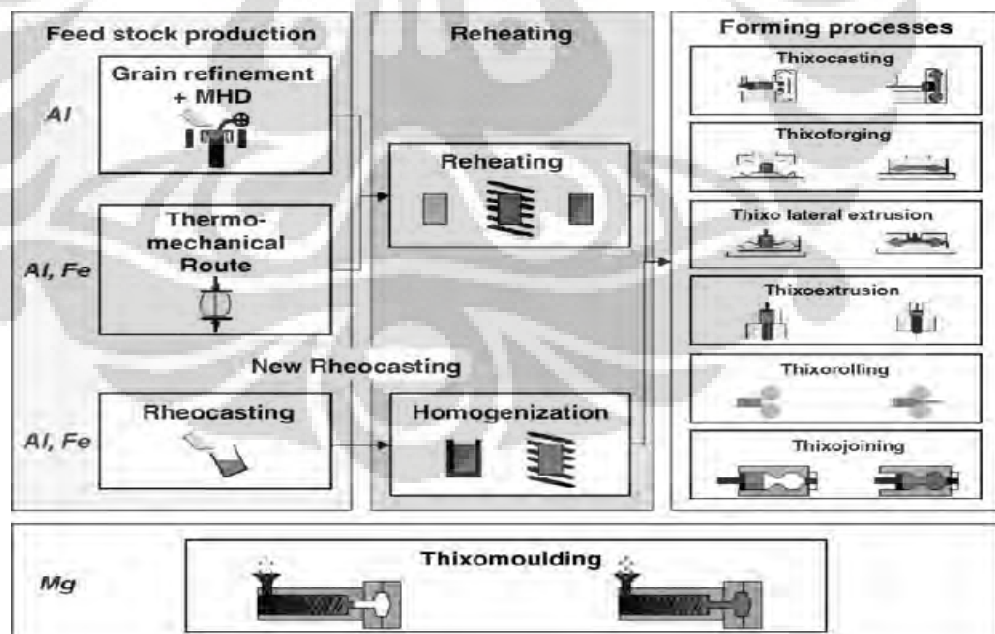
Proses ini digunakan untuk bahan dasar yang mahal, beberapa contoh dari paduan komposisi tempa yang dibuat dengan menggunakan metode ini, diantaranya : A206, A319, A356, AA6061, AA6082. Selain itu metode ini dapat menghasilkan produk berdimensi peluru dan bahkan dapat menghasilkan produk sampai dengan 18 kg. Metode ini terbagi menjadi dua tahap, tahap pertama adalah proses penyaringan panas sampai terbentuk campuran padat dan cair sedangkan tahap kedua adalah pembuangan cairan yang berlebih untuk membentuk *semisolid slug* yang terbentuk pada tekanan tertentu. Prinsip dari teknologi ini adalah pencapaian *rapid thermal*

equilibrium diantara *metallic container* dan *bulk of metal* dengan menggunakan parameter proses yang pantas seperti : temperatur penuangan, *eccentric mechanical strring*, dan pembuangan cairan fasa *eutectic liquid*.

5. Liquid Electrolysed Alumunium

Merupakan metode pembuatan billet dengan menggunakan elektrolisis cairan alumunium. Teknologi ini dipakai untuk skala industri, seperti yang dilakukan diCina, dimana dihasilkan 25 ton billet dengan diameter 60 – 90 mm dan panjang sekitar 4 meter. Setelah proses elektrolisis cairan alumunium, paduan alumunium dituang kedalam sistem cetakan pada temperatur sekitar 0-10°C diatas garis liquidus. Melalui pengadukan elektromagnetik, *mechanical vibration* dan pembekuan paduan cairan membentuk lumpur semisolid.

Teknologi pembentukan paduan *semisolid* yang dilakukan pada saat sekarang ini adalah dengan mengalirkan gas *inert* kedalam leburan logam pada temperatur sedikit dibawah garis *liquidus* dan ditahan sampai terbentuk mikrostruktur *globular* yang halus.



Gambar 2.17 . Bagan proses pembuatan logam *Semisolid* ²².

c). Metode pembentukan semisolid

Setelah proses pemanasan billet, maka selanjutnya dilakukan proses pembentukan (forming). Proses pembentukan ini dapat dilakukan melalui dua cara, yaitu :

1. Thixoforging

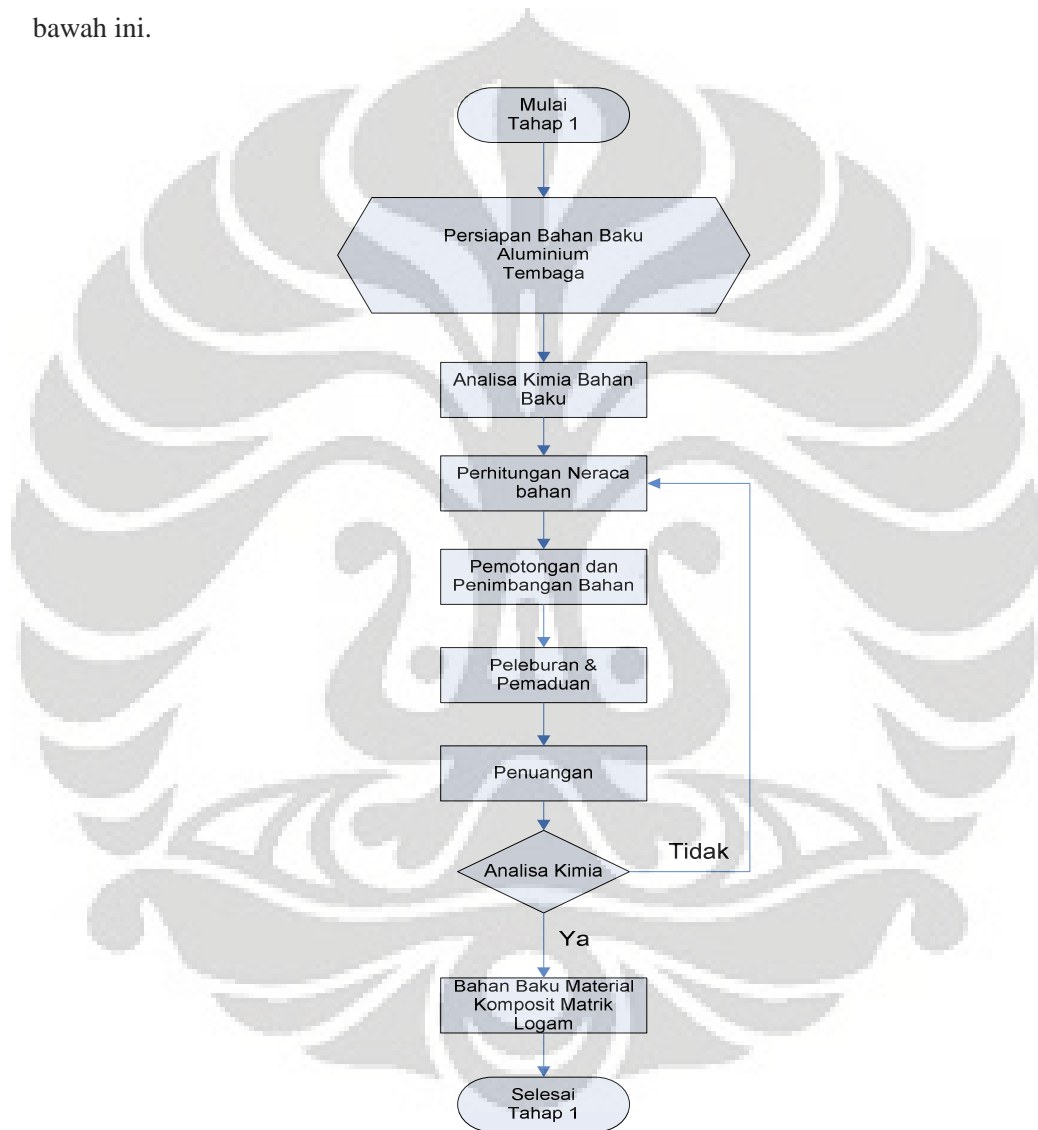
Thixoforging adalah proses pembentukan billet dengan cara penempaan gaya kompresi terlokalisasi yang dilakukan secara terbuka (*open die*) maupun secara tertutup (*closed die*).

2. Thixocasting adalah proses pembentukan billet yang dilakukan pada tekanan tinggi kedalam sebuah cetakan. Pada proses *thixocasting* fraksi cair billet berada pada rentang 40 – 60 % pada saat penekanan piston dilakukan sedangkan pada *thixoforging* fraksi solid billet berada pada rentang 30 – 40 % pada saat diberi tekanan pada cetakan

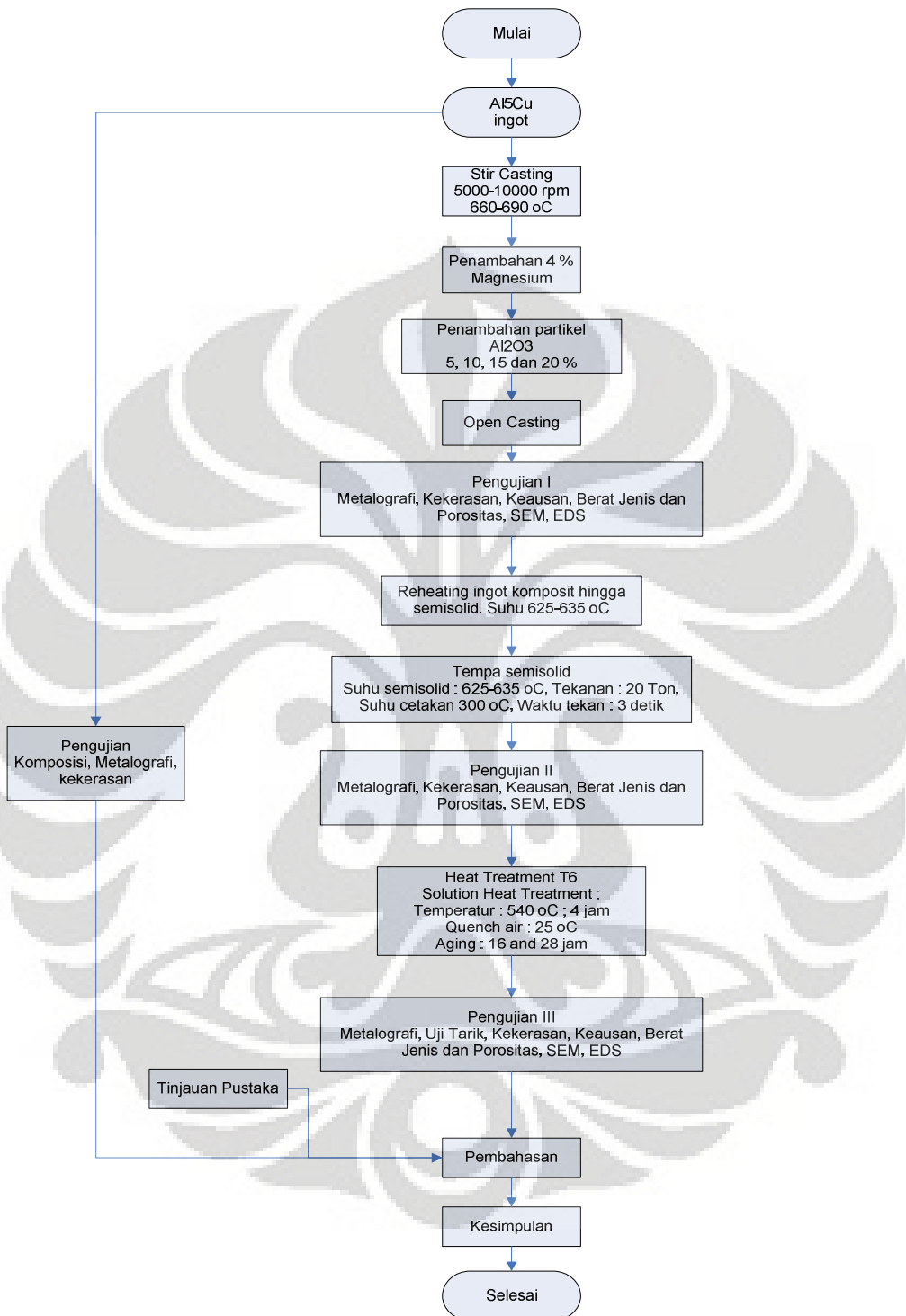
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada kedua bagan di bawah ini.



Gambar 3.1 Proses Pembuatan Bahan Matriks Komposit Matriks Logam Al5Cu



Gambar 3.2 Skema Penelitian Komposit Matrik Logam dengan Squeeze Casting

Dibawah ini akan dijelaskan mengenai proses pembuatan komposit matriks logam, mulai dari bahan dasar sampai dengan proses pembuatan komposit matriks logam pada kondisi semisolid, tahapan proses tersebut meliputi beberapa hal berikut : persiapan bahan dan peralatan, proses pembuatan, parameter proses dan karakterisasi material.

3.1 PENJELASAN DIAGRAM ALIR PENELITIAN

3.1.1 Tahapan Persiapan Bahan dan Peralatan

a. Persiapan bahan baku dasar

Bahan baku dasar yang digunakan pada percobaan ini yaitu :

- Aluminium murni ingot
- Magnesium murni ingot
- Batangan tembaga murni
- Serbuk alumina (Al_2O_3)



Gambar 3.3 Ingot aluminium murni



Gambar 3.4 Ingot magnesium murni



Gambar 3.5 Tembaga murni



Gambar 3.6 Oksida Aluminium (Al_2O_3)

b). Persiapan peralatan

Beberapa peralatan yang digunakan untuk proses pembuatan komposit matriks logam diantaranya yaitu :

1. Tungku peleburan (*burner*)
2. Tungku pemanas
3. *Crucible stir casting*
4. Propeler *stir casting*
5. Motor stir casting
6. Cetakan squeeze casting
7. Mesin tempa
8. Cetakan tempa *semisolid*
9. Termokopel
10. Stop watch
11. Timbangan digital besar
12. Timbangan digital kecil
13. Ceramics fiber
14. Gerinda potong
15. Mesin las
16. Dan lain - lain



Gambar 3.7 Cetakan tempa *semisolid* yang dilengkapi pemanas

b). Peralatan pengujian

Beberapa peralatan pengujian yang digunakan pada penelitian ini diantaranya :

1. Alat uji analisis kimia
2. Alat uji kekuatan tarik
3. Alat uji kekerasan
4. Alat uji metalografi
5. Alat uji keausan
6. SEM-EDS

3.1.2 Proses Pembuatan Komposit Aluminium Al₅Cu/Al₂O₃ dengan Metode *Semisolid*

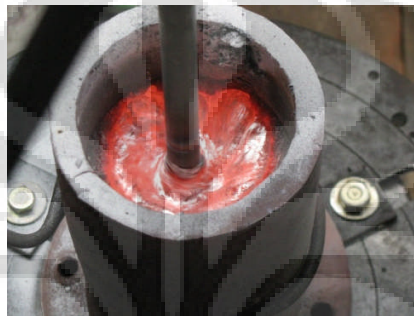
3.1.2.1 Stir Casting Al₅Cu/Al₂O₃

Pembuatan komposit matrik aluminium dengan penguat alumina dilakukan didalam tungku pemanas elektrik 3000 watt. Jumlah paduan Al₅Cu yang digunakan setiap kali peleburan adalah satu kilogram dan ditambahkan magnesium sebagai wetting agent sebanyak 4 % dari berat total komposit. Sedangkan jumlah alumina yang digunakan bervariasi mulai 5, 10, 15 dan 20 %.



Gambar 3.8 Dapur listrik untuk pembuatan komposit dan pemanasan hingga mencapai kondisi *semisolid*

Paduan Al5Cu dileburkan pada temperature 800 °C, lalu ditambahkan logam magnesium dengan cara dicelupkan kedalam leburan tersebut sampai logam magnesium mencair. Kemudian masukan serbuk alumina kedalam leburan tersebut sesuai dengan fraksi volume yang telah ditentukan sedikit demi sedikit sambil diaduk dengan menggunakan alat pengaduk dengan kecepatan putaran 5000 rpm selama 5 menit.



Gambar 3.9 Proses *steering* cairan aluminium-tembaga sambil melakukan pencampuran partikel alumina secara bertahap.

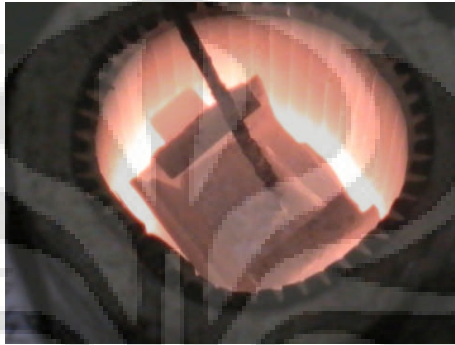
Pada saat dilakukan pencampuran serbuk alumina kedalam leburan Al5Cu untuk fraksi volume 15 % dan 20 % diperlukan kecepatan pengadukan yang lebih tinggi dari 5000 rpm oleh karena itu kecepatan pengadukan ditingkatkan menjadi 10000 rpm. Hal ini dilakukan dengan tujuan agar serbuk alumina tersebut tercampur secara sempurna sehingga dihasilkan campuran yang homogen antara serbuk dan leburan Al5Cu. Setelah proses pengadukan selesai maka dilakukan proses penuangan leburan kedalam suatu media cetakan sehingga akan dihasilkan ingot komposit dengan ukuran 21 x 8 x 3 cm.



Gambar 3.10 Ingot komposit Al5Cu/ AL₂O₃ hasil casting

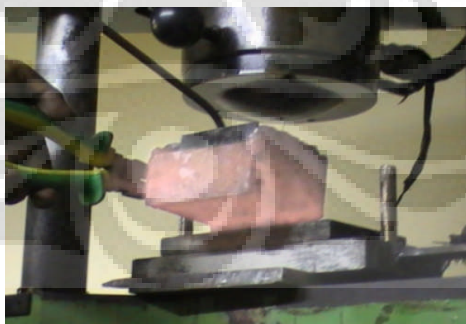
3.1.2.2 Thixoforming Komposit Al₅Cu/AL₂O₃

Sebelum dilakukan proses pemanasan billet untuk mendapatkan bentuk semisolid maka dilakukan proses pemotongan billet agar dapat masuk kedalam tungku pemanasan. Hal ini dapat dilihat pada gambar 3.12, dimana billet telah dipotong sehingga dapat masuk kedalam tungku pembakaran.

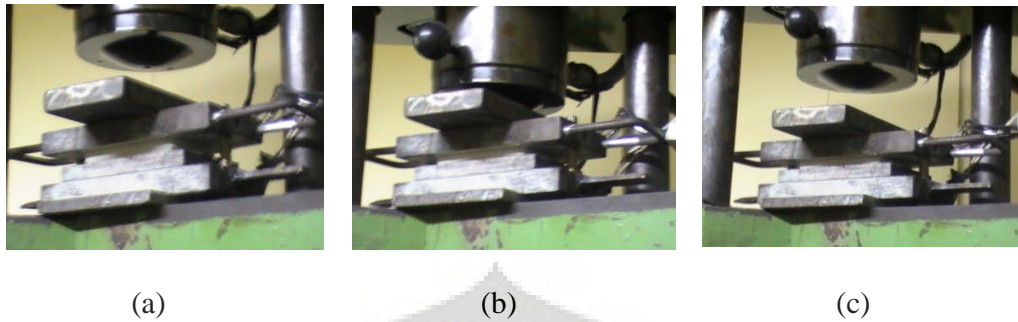


Gambar 3.11 Proses pemanasan kembali ingot komposit Al₅Cu/ AL₂O₃ untuk mencapai fasa *semisolid*.

Proses pemanasan kembali dengan menggunakan tungku listrik dilakukan sampai mendapatkan bentuk *semisolid*. Setelah bentuk *semisolid* didapatkan maka leburan semisolid tersebut dituang kedalam cetakan yang telah disiapkan dimesin tarno untuk dilakukan proses tempa (*forging*) dengan menggunakan dengan *actual pressure* sebesar 20 ton.



Gambar 3.12 Proses penampatan material *semisolid* komposit Al₅Cu/ AL₂O₃ di cetakan



Gambar 3.13 Proses penekanan material semi solid dalam cetakan tertutup. (a) *punch* bergerak turun. (b) penekanan disertai penahanan 3 detik. (c). *puch* bergerak naik

Logam hasil proses forging dengan menggunakan mesin tarno dapat dilihat dibawah ini.



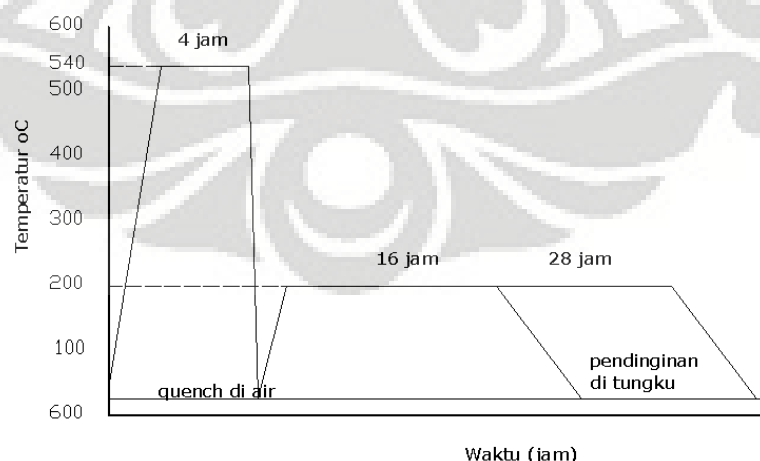
Gambar 3.14 Produk hasil proses *thixoforming*

3.1.3 Proses Persiapan Sampel dan Proses Perlakuan Panas

Untuk melakukan proses pengujian sampel maka dilakukan proses pemotongan sampel dengan menggunakan mesin freis pada logam tempa hasil dari proses *thixoforming*.

Kemudian pada sampel dilakukan perlakuan panas T6, dimana pada perlakuan panas ini terjadi proses *solution treatment* lalu *quench* dan proses *aging*. Proses perlakuan panas ini dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan kekerasan dan juga kekuatan paduan komposit tersebut dengan cara melakukan perubahan mikrostruktur. Metode penguatan yang dilakukan pada *solution treatment* ini adalah penguatan dengan menggunakan fasa endapan didalam matriks paduan logam tersebut sehingga akan meningkatkan *mechanical properties* dari komposit tersebut.

Proses yang pertama kali dilakukan adalah pemanasan awal pada sampel yang dilakukan didalam tungku pembakaran yang dilakukan pada temperatur 320 °C selama 30 menit, setelah dilakukan proses *preheating* maka dilakukan proses pemanasan sampai dengan temperatur 540 °C selama 4 jam yang diakhiri oleh proses pendinginan pada media air tawar dengan temperature air 27 °C. Setelah itu sebagian sampel yang didinginkan dimasukan kembali kedalam tungku untuk dilakukan proses artificial aging pada temperature 200 °C selama 16 jam. Kemudian sebagian sampel dikeluarkan pada tungku pembakaran dan didinginkan pada media air pada suhu 27 °C. Setelah itu dilakukan proses artificial aging kembali pada temperatur 200 °C selama 28 jam. Untuk lebih jelas mengenai proses perlakuan panas T6, kita dapat melihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.15 Proses perlakuan panas komposit hasil forming *semisolid*

3.1.4 Proses Karakterisasi Komposit Aluminium Al5Cu/Al₂O₃

Proses karakterisasi material dilakukan untuk mengetahui sifat *mechanical properties* dari paduan komposit tersebut. Berikut ini adalah beberapa pengujian yang dilakukan untuk mengetahui sifat *mechanical properties* paduan komposit tersebut, yaitu :

a. Pengujian analisis kimia

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *spectro analyzer*, dimana sampel dipotong dengan ukuran terkecil sekitar 25 x 25 mm dengan ketebalan 3 mm.

b. Pengujian ketahanan aus

Pengujian ketahanan aus ini dilakukan dengan menggunakan mesin OGOSHI. Beban gesek diberikan pada permukaan sisi dari sampel dengan memanfaatkan gaya gesek pada cincin yang berputar, hal ini akan memberikan cekungan penetrasi atau jejak pada permukaan sampel tersebut. Besarnya jejak permukaan dari material tergesek itulah yang akan dijadikan dasar penentuan tingkat keausan pada material. Semakin besar jejak yang dihasilkan pada pembebanan tersebut maka semakin besar pula volume material yang terlepas akibat gesekan tersebut sehingga dapat disimpulkan bahwa sampel mudah terkena beban aus.

Dengan B adalah tebal revolving disc (mm), r jari-jari disc (mm), b lebar celah material yang terabrasi (mm) maka dapat diturunkan besarnya volume material yang terabrasi (W):

$$= \frac{\cdot}{12} \dots\dots\dots (3.4)$$

Laju keausan (V) dapat ditentukan sebagai perbandingan volume terabrasi (W) dengan jarak luncur x (setting pada mesin uji):

$$= \frac{\dots}{\dots} \dots \dots \dots (3.5)$$

$$= \frac{\dots}{12. \dots} \dots \dots \dots (3.6)$$

Adapun variable nilai yang didapatkan pada mesin OGOSHI yaitu : diameter cincin putar 29,99 mm dengan tebal 3 mm, jarak luncur 200 m, kecepatan 0,250 m/detik, dan pembebanan 2,11 kg.

c). Pengujian kekerasan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kekerasan dari specimen pada tiap – tiap perlakuan panas yang diberikan. Prosedur mengenai pengujian ini menggunakan standar ASTM 10-84. Pengujian ini menggunakan skala Brinnel, dimana indentor yang digunakan berbentuk *spherical* berbahan dasar baja dengan diameter 3,2 mm. Mesin yang digunakan pada pengujian ini adalah alat uji kekerasan Brinnel merek HOYTOM Minor 69 dengan beban P= 31,25 kg dan waktu tekan selama 15 detik.

d). Pengujian metalografi

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui mikrostruktur dari sampel uji baik sebelum maupun sesudah proses perlakuan panas. Untuk dapat dilakukan proses metalografi maka sampel akan dipotong sesuai kebutuhan lalu dimounting dan kemudian diampelas serta terakhir dipoles menggunakan mesin poles. Pada saat proses pengamplasan, ukuran kertas ampelas yang digunakan mulai dari tingkat kekasaran tinggi (# 180) sampai dengan halus (#1500). Setelah diperoleh permukaan yang rata maka sampel dipoles dengan menggunakan larutan titanium oksida kemudian hasil poles dietsa dengan menggunakan larutan HF 0,5 %.

Kemudian pengamatan dilakukan dengan perbesaran 100x, 200 x dan 500x. Dari hasil foto metalografi tersebut, dipilih beberapa sampel yang akan diuji dengan menggunakan mesin SEM-EDS.

e). Pengujian SEM-EDS

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) untuk mengetahui struktur mikro dan fasa penyusun sampel dengan perbesaran 10.000 x.





BAB 4

PEMBAHASAN

Berikut ini adalah pengujian yang telah dilakukan pada paduan logam hasil proses pembuatan komposit matrik logam dengan metode *thixoforming* beserta pembahasannya.

4.1 HASIL PENGUJIAN

4.1.1 Perhitungan Fraksi Volume, Berat dan Densitas Komposit Teoritis

Tabel IV.1 Perhitungan densitas teoritis paduan

NO	Komposit	Unsur	% Volume	% Berat	Densitas	Densitas komposit
1	Al5Cu	Al	95	85,2	2,7	3,01
		Cu	5	14,8	8,9	
2	Al5Cu + 5% Al ₂ O ₃	Al5Cu	95	93,5	3,01	3,06
		Al ₂ O ₃	5	6,5	3,95	
3	Al5Cu + 10% Al ₂ O ₃	Al5Cu	90	87,3	3,01	3,10
		Al ₂ O ₃	10	12,7	3,95	
4	Al5Cu + 15% Al ₂ O ₃	Al5Cu	85	81,2	3,01	3,15
		Al ₂ O ₃	15	18,8	3,95	
5	Al5Cu + 20% Al ₂ O ₃	Al5Cu	80	75,3	3,01	3,20
		Al ₂ O ₃	20	24,7	3,95	

Berikut ini adalah data berat Al5Cu, serbuk alumina, magnesium dan juga komposit.

Tabel IV.2 Perhitungan Berat Paduan

NO	Fraksi Volume Alumina	Berat (gram)			
		Al5Cu	Al ₂ O ₃	Mg	Komposit
1	5 %	945,4	65,72	40,44	1011,12
2	5 %	943,8	65,61	40,37	1009,41
3	10 %	1069	155,51	48,98	1224,51
4	10 %	1209	175,88	55,39	1384,87
5	15 %	1156	267,64	56,94	1423,64
6	15 %	1163	269,26	57,29	1432,26
7	20 %	844,2	276,91	44,84	1121,116
8	20 %	844	276,85	44,83	1120,84

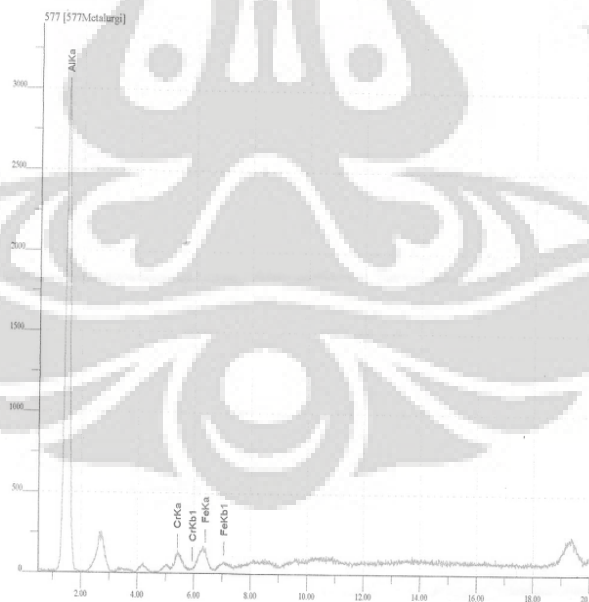
4.1.2 Analisis Kimia

Hasil pengujian kimia terhadap material magnesium, alumina, aluminium tembaga dapat dilihat pada tabel 5 – tabel 44.

Tabel IV.3 Komposisi Kimia Ingot Aluminium Tembaga hasil cor

NO	Unsur, % berat					
	Al	Cu	Mg	Fe	Si	Zn
1	92,8	4,98	0,216	0,477	0,934	0,251
2	Unsur, % berat					
	Ti	Cr	Ni	Pb	Sn	Mn
	0,0177	< 0,001	0,0234	0,0326	0,0458	0,0774

Penyusun serbuk alumina yang digunakan sebagai penguat telah dilakukan pengujian XRF untuk mengetahui komposisi unsur yang terkandung didalamnya. Berikut adalah hasil yang didapatkan :



Gambar 4.1 Hasil uji XRF terhadap serbuk Alumina

Tabel IV.4 Komposisi kimia serbuk alumina

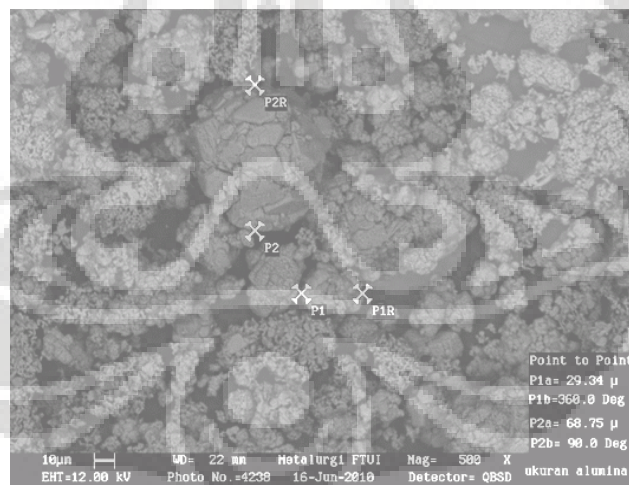
NO	Unsur, % berat		
	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
1	99,6056	0,2581	0,1363

Tabel IV.5 Komposisi kimia ingot magnesium

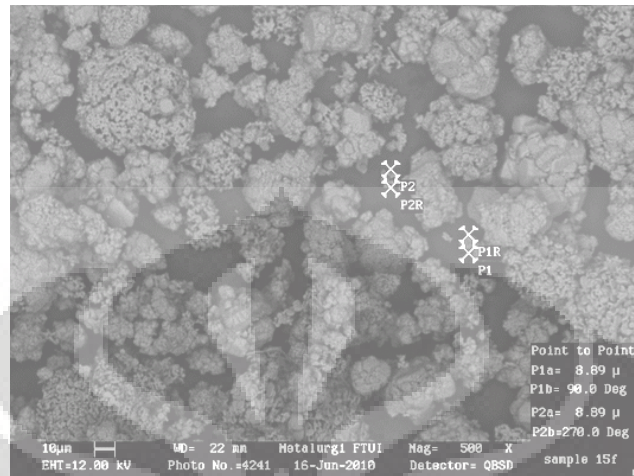
NO	Unsur, % berat				
	Mg	Al	Mn	Si	Cu
1	99.91	0.019	0,014	0.02	0.0025
2	Unsur, % berat				
	Fe	Ni	Cl	Pengotor lain	Total Pengotor
	0.015	0.0007	0.004	0.0148	0.09

4.1.3 Hasil Pengukuran Butir Partikel Alumina dengan SEM

Ukuran butir partikel alumina diukur dengan menggunakan pengujian SEM adalah berikut ini :



(a)



(b)

Gambar 4.2 (a), (b), Pengukuran butir serbuk alumina dengan SEM

Dari pengukuran menggunakan SEM didapatkan bahwa besarnya diameter butir partikel alumina tersebut antara 8,89 - 68,75 μm .

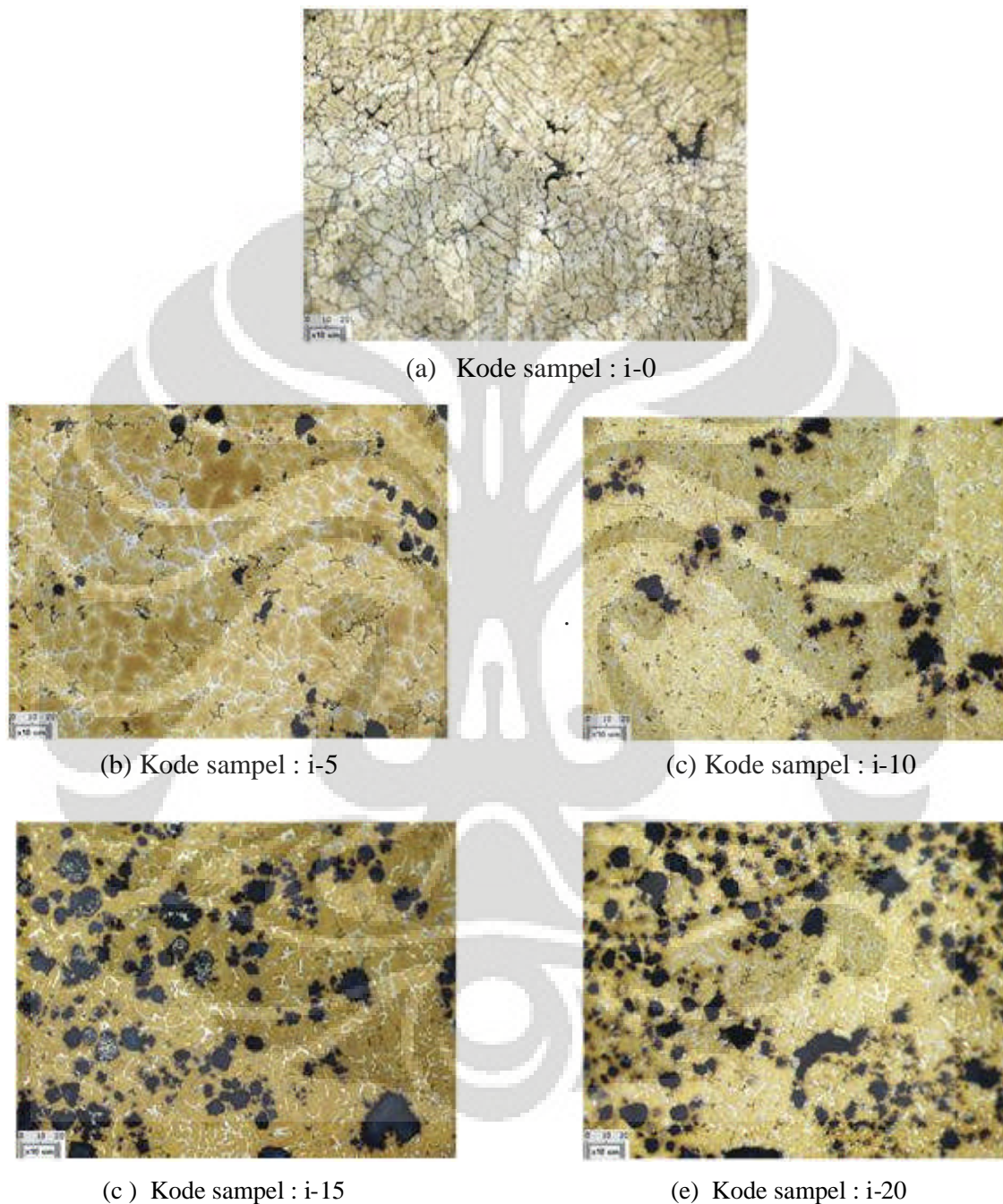
4.1.4 Hasil Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan pada sampel hasil *casting*, dan *thixoforming* yang dilanjutkan *heat treatment* T6 dilakukan dengan menggunakan standar pengujian Brinnell, pengujian dilakukan pada tiga titik berbeda sebagaimana pada lampiran 1, adapun hasil uji kekerasan ditampilkan pada gambar 4.27 dan 4.28.

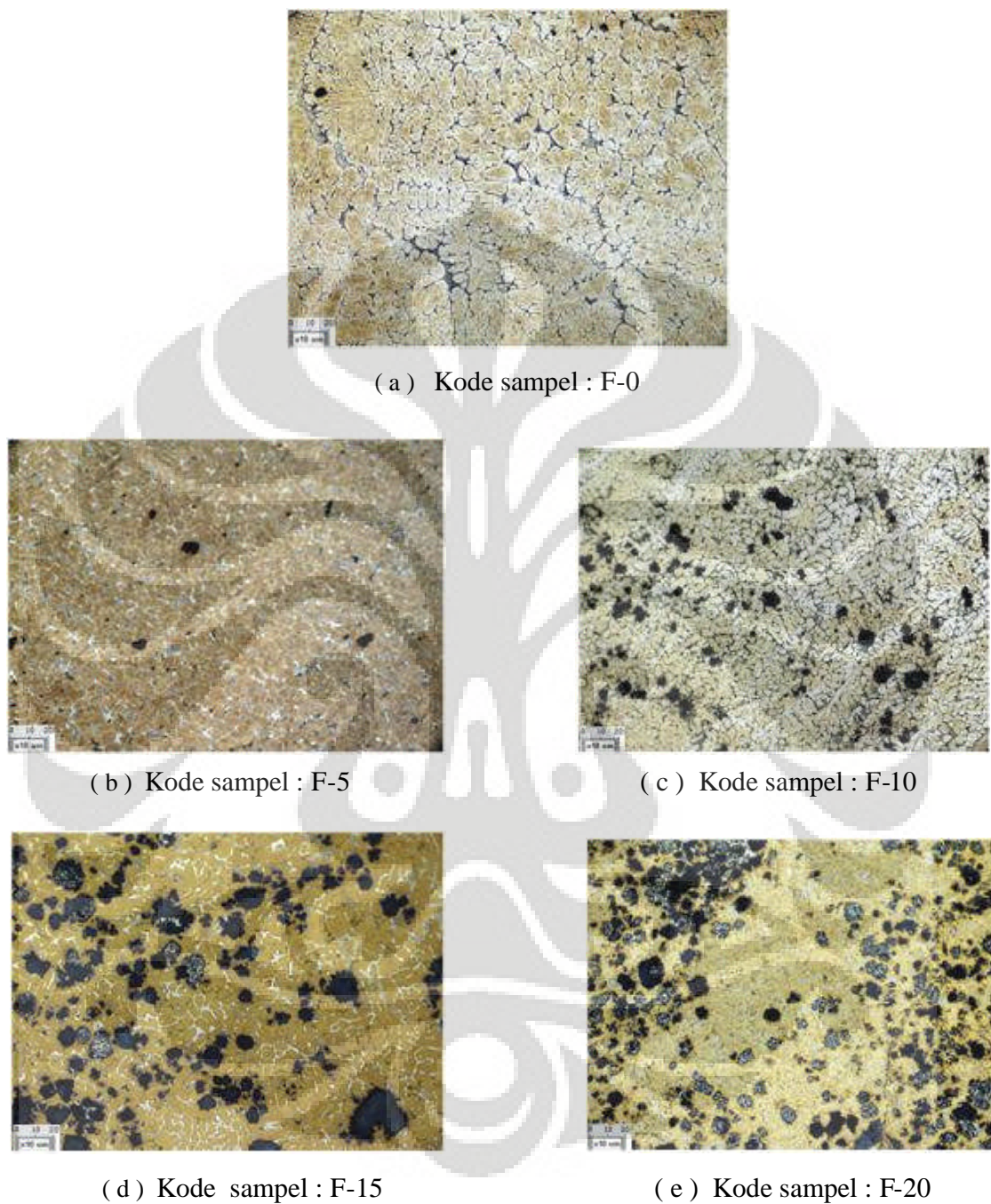
4.1.5 Hasil Uji Keausan

Pengujian keausan pada sampel hasil *casting*, *thixoforming* yang dilanjutkan *heat treatment* T6 dilakukan dengan menggunakan standar pengujian keausan Ogoshi, pengujian dilakukan pada tiga titik berbeda sebagaimana pada lampiran 2, adapun hasil uji keausan ditampilkan pada gambar 4.31 dan 4.32.

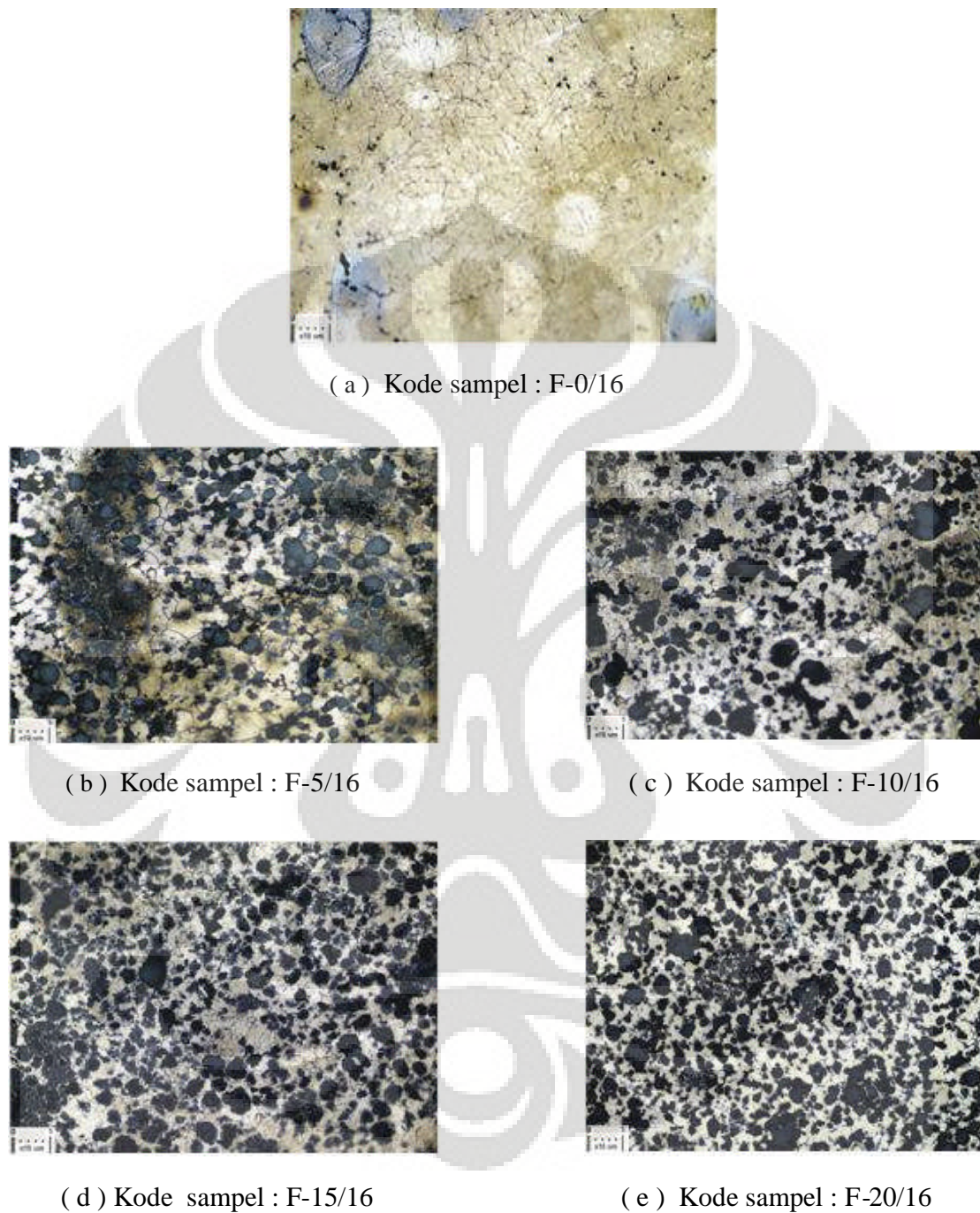
4.1.6 Distribusi Alumina didalam Al5Cu



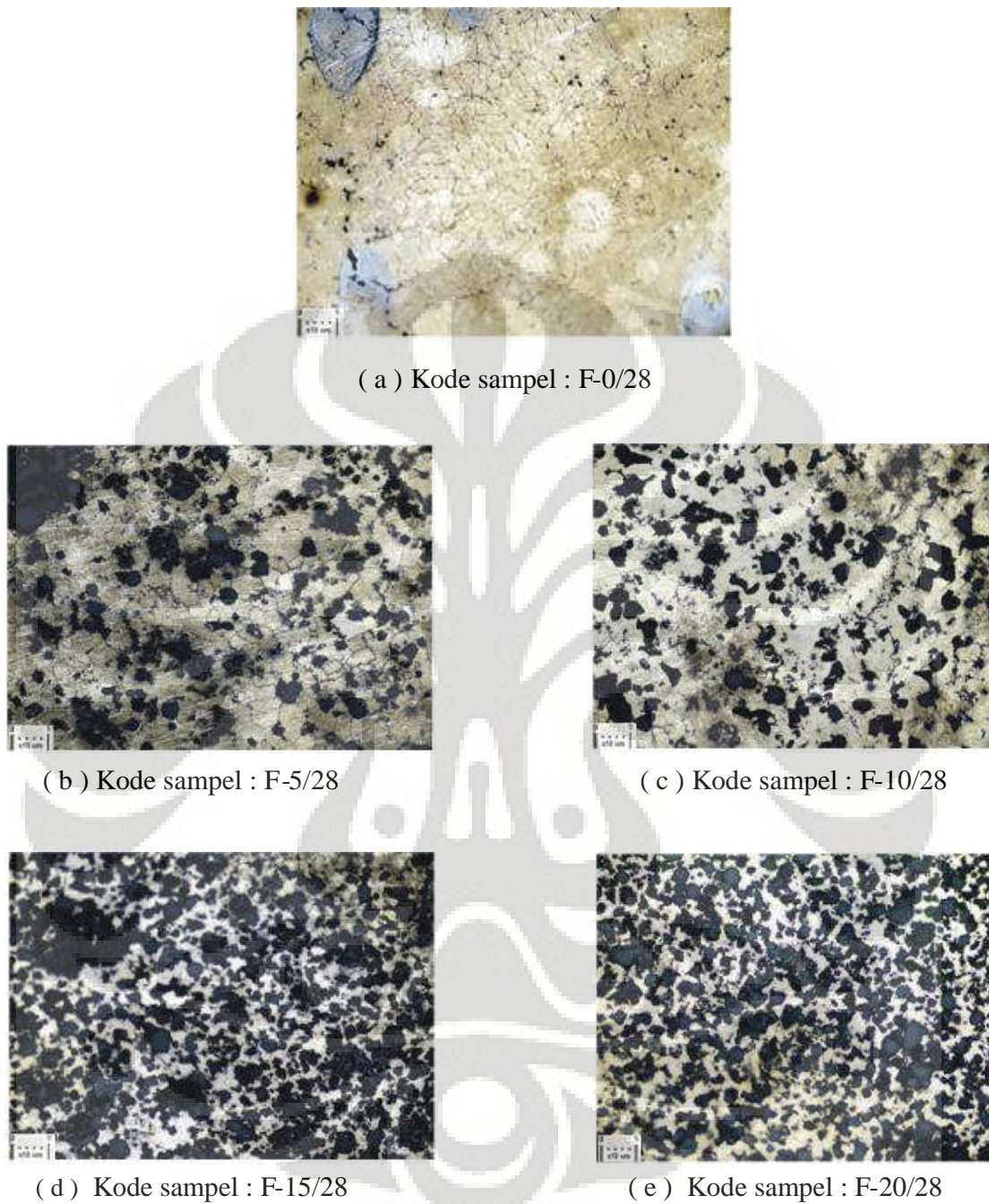
Gambar 4.3 Distribusi Alumina pada matrik Al5Cu, hasil *casting* dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al₂O₃



Gambar 4.4 Distribusi Alumina pada matrik Al₅Cu, hasil *thixoforming* tanpa *aging* dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al₂O₃



Gambar 4.5 Distribusi Alumina pada matrik Al₅Cu, hasil *thixoforming* dan *Aging* 16 jam dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al₂O₃



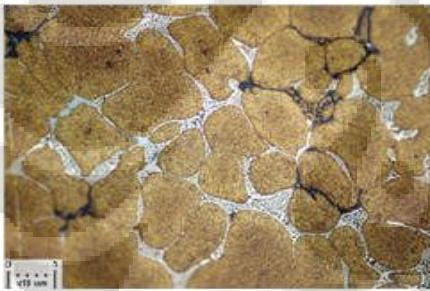
Gambar 4.6 Distribusi Alumina pada matrik Al₅Cu, hasil *Thixoforming* dan *aging* 28 jam dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al₂O₃

4.1.7 Hasil Pengamatan Metalografi

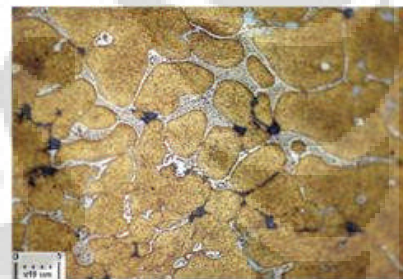
Pengujian Metalografi dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik. Pengujian dilakukan pada sampel hasil *casting*, *thixoforming* dan *thixoforming* yang diikuti oleh proses *heat treatment* T6. Hasil foto mikrostruktur dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



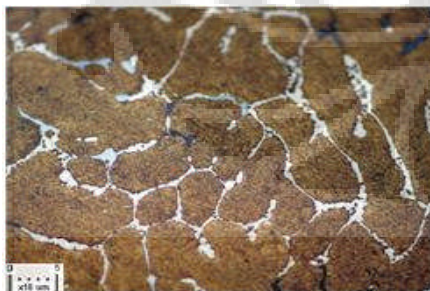
(a) Kode sampel : i-0



(b) Kode sampel : i-5



(c) Kode sampel : i-10

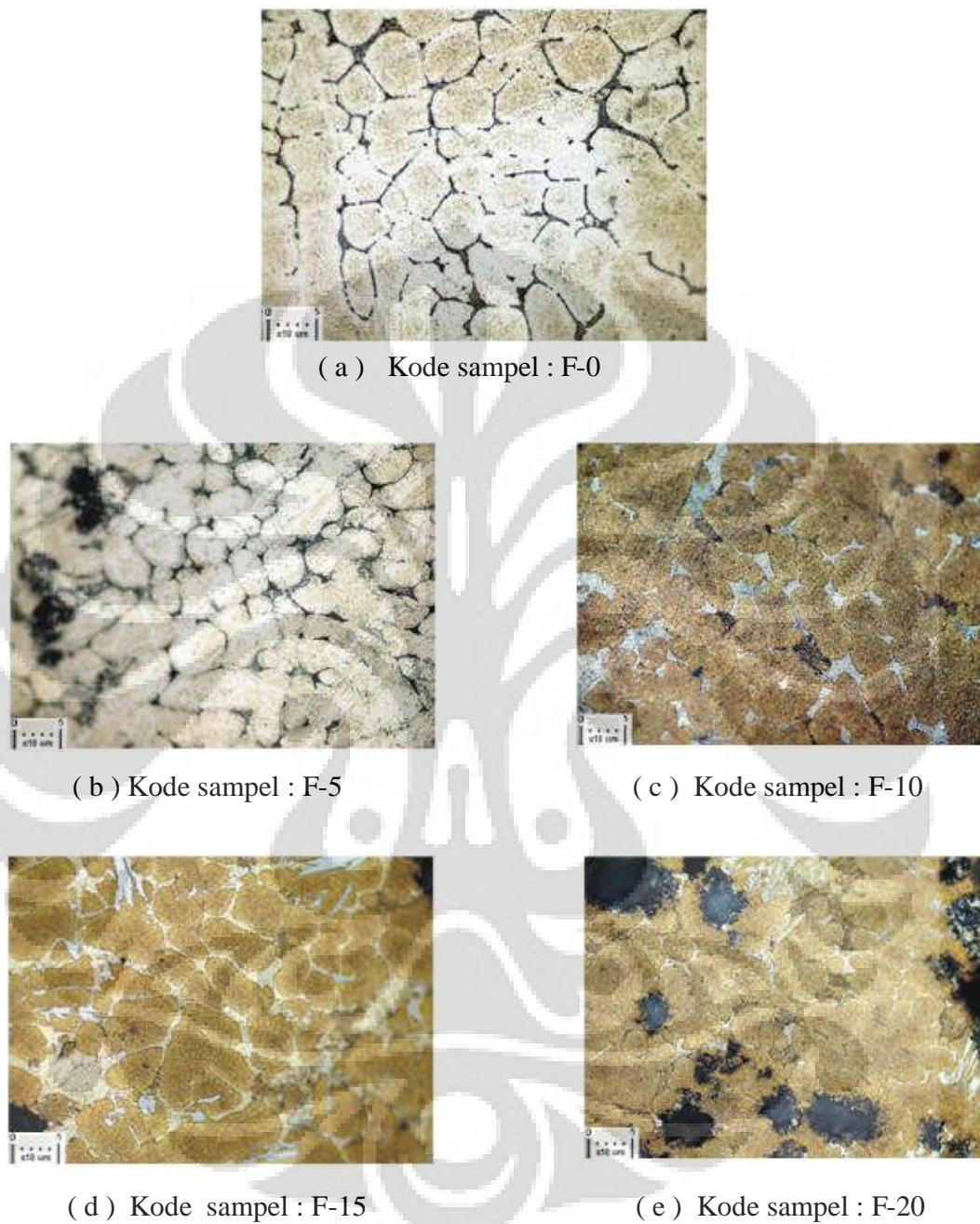


(d) Kode sampel : i-15

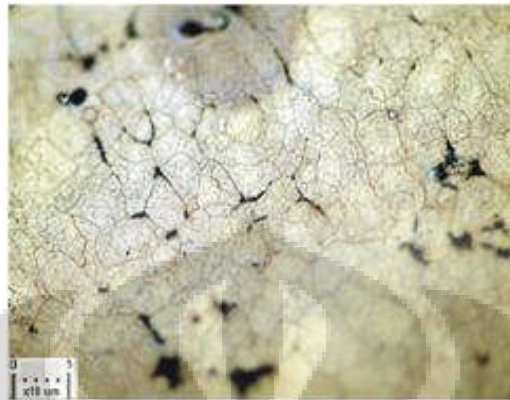


(e) Kode sampel : i-20

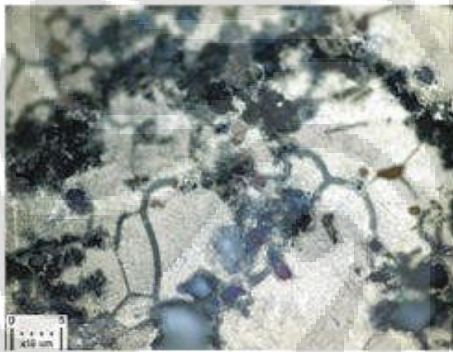
Gambar 4.7 Metalografi sampel hasil cor dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al_2O_3 . Perbesaran 500x



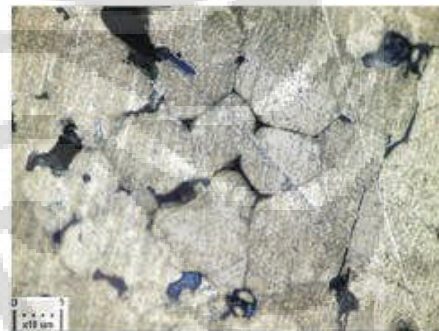
Gambar 4.8 Metalografi sampel hasil *thixoforming* dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al_2O_3 sebelum di *heat treatment*. Perbesaran 500x



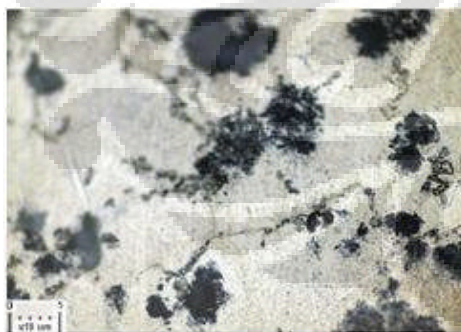
(a) Kode sampel :F-0/16



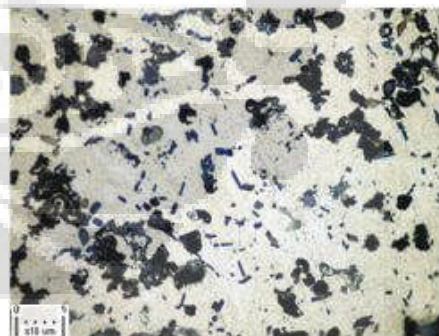
(b) Kode sampel : F-5/16



(c) Kode sampel : F-10/16

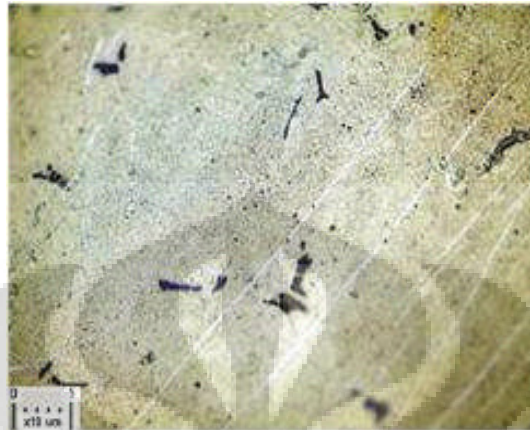


(d) Kode sampel : F-15/16

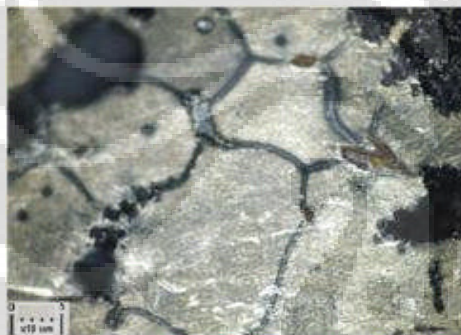


(e) Kode sampel : F-20/16

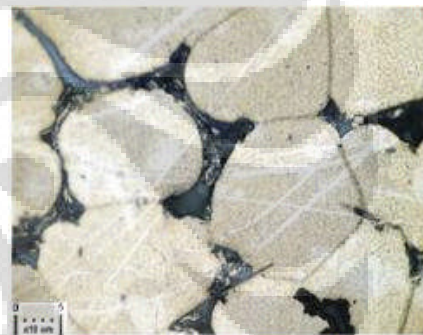
Gambar 4.9 Metalografi sampel hasil *thixoforming* dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al_2O_3 setelah proses *solution treatment* 540°C hold 4 jam kemudian di *aging* selama 16 jam. Perbesaran 500x.



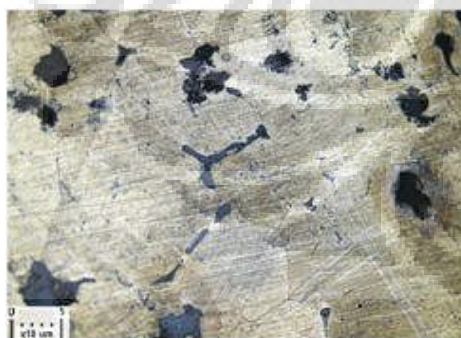
(a) Kode sampel :F-0/16



(b) Kode sampel : F-5/16



(c) Kode sampel : F-10/16



(d) Kode sampel : F-15/28



(e) Kode sampel : F-20/28

Gambar 4.10 Metalografi sampel hasil *thixoforming* dengan penguat (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15 %, (e) 20 % Al_2O_3 setelah proses *solution treatment* 540°C hold 4 jam kemudian di *aging* selama 28 jam. Perbesaran 500x

4.1.8 Pengujian SEM dan EDS

Pengujian SEM dan EDS dilakukan pada sampel serbuk alumina, sampel hasil *casting* serta sampel hasil *thixoforming*. Pemilihan sampel dilakukan secara acak, hasil dari pengujian dapat dilihat pada gambar 4.11 – gambar 4.26 dibawah ini.

4.2 PEMBAHASAN

Pada bagian ini disampaikan pembahasan terhadap hasil-hasil pengujian yang ditampilkan pada tulisan di atas.

4.2.1. Analisa Kimia

Berdasarkan hasil analisa kimia XRD yang dilakukan pada material penyusun komposit, didapatkan bahwa unsur yang terkandung didalam komposit tersebut antara lain : magnesium, paduan Al5Cu, dan alumina. Al5Cu (ingot) yang digunakan sebagai matrik komposit mengandung 4,98 % Cu dan unsur penyusun lain seperti Si, Fe, Mg, Zn dan lain-lain yang kadarnya sangat kecil (kurang dari 1 %). Oleh karena itu paduan ini memenuhi persyaratan untuk dapat dilakukan metode peningkatan pengerasan dengan cara pelarutan atau presipitasi dengan proses perlakuan panas T6. Paduan Al5Cu termasuk didalam paduan aluminium seri 2xxx, yang memiliki kemampuan untuk ditingkatkan sifat-sifat mekanisnya dengan perlakuan panas seperti paduan aluminium lainnya seperti seri 6xxx, 7xxx dan 8xxx.

Partikel penguat yang digunakan pada penelitian ini adalah serbuk alumina. Serbuk yang digunakan berwarna putih. Pengukuran ukuran butir yang dilakukan dengan XRF menunjukkan tingkat kemurnian yang tinggi, dimana unsur terdapat Al₂O₃ sebesar 99,60 %, Cr₂O₃ 0,25 % dan Fe₂O₃ 0,13 %. Kemudian untuk ukuran butir serbuk diukur dengan menggunakan teknologi SEM. Dari hasil pengukuran didapatkan bahwa ukuran serbuk alumina berada antara 8,89 hingga 68,75 µm. Magnesium digunakan sebagai bahan tambahan yang berfungsi untuk meningkatkan sifat pembasahan alumina sehingga akan terbentuk *interface* yang baik antara alumina dengan matrik. Untuk komposisi magnesium ingot yang digunakan mengandung

unsur yaitu : magnesium 99,91 % dan unsur lain dengan kadar yang lebih kecil dari 0,2% seperti Al, Mn, Si dan Cu.

4.2.2 Pengaruh Fraksi Volume Penguat Al_2O_3 dan Parameter *Aging* terhadap Kekerasan Komposit.

Hasil pengujian kekerasan dengan menggunakan metode Brinell dapat dilihat pada grafik pada gambar 4.27 dan 4.28.

Tabel IV.6 Kekerasan ingot komposit dalam bentuk *casting*

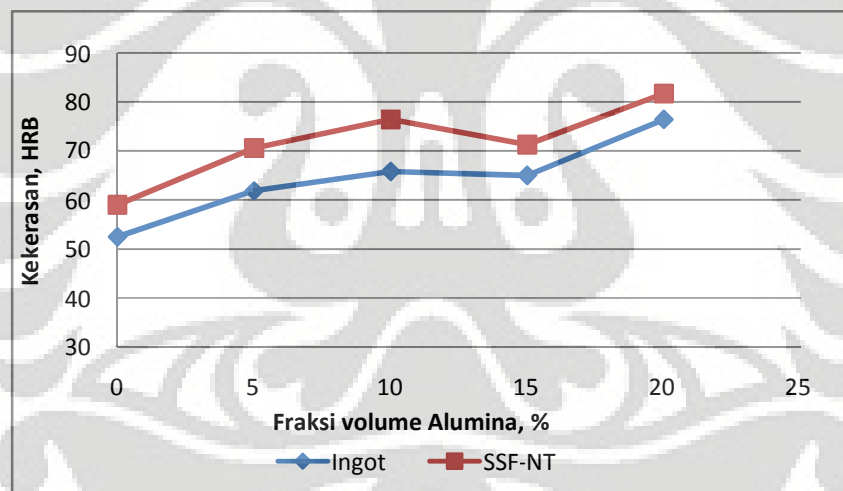
Pengulangan HRB	Fraksi Volume Alumina				
	0%	5%	10%	15%	20%
1	49	63	76	67	78
2	49	59	66	59	75
3	58	62	64	58	69
Jumlah (Σ)	156	184	206	184	222
Rata - rata	52	61	69	61	74
Standar deviasi	5.19	1.86	6.32	5.13	4.69

Tabel IV.7 Kekerasan hasil *thixoforming* tanpa perlakuan panas

Pengulangan HRB	Fraksi Volume Alumina				
	0%	5%	10%	15%	20%
1	59	70	77	73	80
2	57	72	74	73	85
3	61	70	78	68	80
Jumlah (Σ)	177	212	229	214	245
Rata - rata	59	71	76	71	82
Standar deviasi	2.3	1.5	1.9	2.56	2.7

Pada Tabel diatas diperlihatkan nilai kekerasan dari sampel dari proses *casting* komposit dan komposit hasil *thixoforming*. Pada komposit hasil *casting* didapatkan bahwa standar deviasi berkisar antara 1,86 – 6,32, dengan nilai standar deviasi terendah pada komposisi fraksi alumina sebesar 5 %. Sedangkan untuk komposit hasil *thixoforming* tanpa perlakuan panas nilai standar deviasi berkisar antara 1,5 – 2,7 dimana nilai standar deviasi terendah didapatkan pada komposisi fraksi alumina sebesar 5 %. Rendahnya rentang standar deviasi yang didapatkan menunjukkan bahwa nilai keakuratan kekerasan yang didapatkan cukup tinggi sehingga hampir mendekati nilai kekerasan sebenarnya.

Nilai kekerasan diatas diperoleh dengan persamaan uji kekerasan Brinell. Selanjutnya untuk memudahkan pengamatan hasil pengujian maka nilai rata-rata kekerasan dicantumkan dalam grafik 4.11.



Gambar 4.11 Hasil uji kekerasan ingot komposit dan hasil *thixoforming* tanpa perlakuan panas.

Dari gambar 4.11 terlihat bahwa nilai kekerasan yang dicapai pada pada komposit hasil *thixoforming* memiliki kekerasan yang lebih tinggi daripada hasil casting. Peningkatan nilai kekerasan tersebut sebanding dengan penambahan penguat alumina Al_2O_3 . Tetapi pada fraksi volume alumina 15 % terjadi sedikit penurunan nilai kekerasan sebesar 1,2 % yang kemudian mengalami kenaikan kembali pada fraksi volume 20 %. Kekerasan ingot komposit terendah adalah 52 HRB, dan kekerasan tertinggi pada ingot komposit dengan fraksi volume 20 % alumina, sebesar 74 HRB. Sehingga terjadi peningkatan kekerasan *casting* komposit sebesar 42,3 % pada penambahan fraksi volume 20 %.

Kekerasan hasil *thixoforming* tanpa perlakuan panas mengalami peningkatan yang lebih tinggi daripada proses *casting* komposit. Kekerasan tertinggi didapatkan pada komposit dengan fraksi volume 20 % dengan nilai kekerasan sebesar 81,75 HRB. Sedangkan nilai kekerasan terendah sebesar 59,06 HRB. Melalui proses *thixoforming* pada fraksi volume 20 % alumina terjadi peningkatan kekerasan sebesar 38,4 %. Prosentase peningkatan kekerasan ini lebih kecil daripada metode *casting* komposit, yaitu sebesar 42,3 % meskipun nilai kekerasan yang dicapai dari metode *thixoforming* lebih besar daripada metode *casting*.

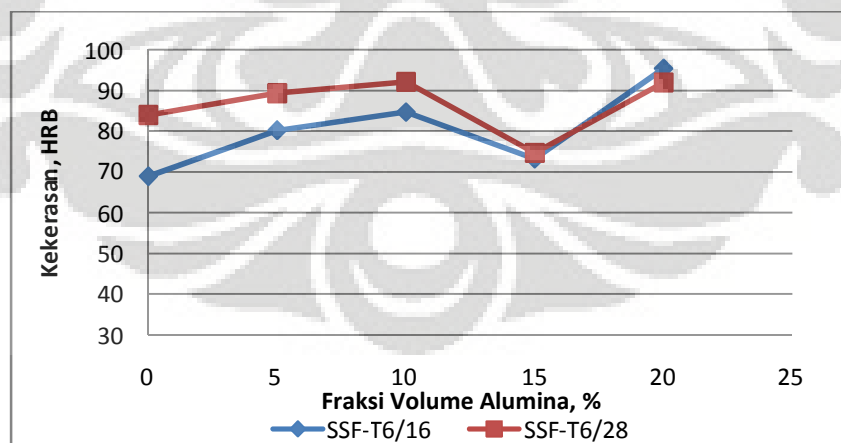
Tabel IV.8 Analisa kekerasan hasil *thixoforming* setelah T6 dan *aging* 16 jam

Pengulangan HRB	Fraksi Volume Alumina				
	0%	5%	10%	15%	20%
1	67	79	83	74	86
2	70	76	81	75	102
3	71	87	92	71	99
Jumlah (Σ)	201	242	256	220	287
Rata - rata	69	81	85	73	96
Standar deviasi	2.26	5.58	5.83	1.75	8.2

Tabel IV.9 Analisa kekerasan hasil *thixoforming* setelah T6 dan *aging* 28 jam

Pengulangan HRB	Fraksi Volume Alumina				
	0%	5%	10%	15%	20%
1	89	87	86	78	90
2	83	87	91	69	96
3	80	94	100	78	91
Jumlah (Σ)	252	268	277	225	277
Rata - rata	84	89	92	75	92
Standar deviasi	4.95	4.21	6.73	5.27	3.27

Pada tabel IV.8 dan IV.9 diperlihatkan data kekerasan dari sampel-sampel hasil *thixoforming* setelah mengalami proses perlakuan panas T6 yang disertai *aging* selama 16 dan 28 jam. Nilai standar deviasi untuk hasil *thixoforming* setelah mengalami perlakuan panas T6 dan *aging* selama 16 jam berkisar antara 1,76-8,20. Nilai standar deviasi untuk hasil *thixoforming* setelah mengalami perlakuan panas T6 dan *aging* selama 28 jam berkisar antara 3,27-5,27. Rendahnya rentang nilai standar deviasi menunjukkan tingginya keakuratan data dan nilai kekerasan yang diperoleh mendekati nilai sebenarnya. Selanjutnya untuk memudahkan pengamatan hasil pengujian maka nilai rata-rata kekerasan dicantumkan dalam grafik 4.12.



Gambar 4.12 Hasil uji kekerasan produk *thixoforming* di *solution treatment* pada temperatur 540 °C dan di *aging* pada temperatur 200 °C selama 16 dan 28 jam.

Pada proses perlakuan panas terhadap hasil *thixoforming*, menunjukkan peningkatan kekerasan yang cukup berarti pada kedua waktu *aging* berbeda yaitu 16 dan 28. Pada gambar 4.12 terlihat bahwa peningkatan kekerasan pada temperatur *aging* 28 jam lebih tinggi daripada waktu *aging* 16 jam. Pada temperatur *aging* 16 jam, kekerasan tertinggi yang dicapai sebesar 95,76 HRB sedangkan untuk kekerasan terendahnya sebesar 68,98 HRB. Untuk temperatur *aging* 28 jam, kekerasan tertingginya sebesar 92,01 HRB sedangkan untuk kekerasan terendahnya sebesar 84,08 HRB.

Prosentase peningkatan kekerasan hasil *thixoforming* setelah proses perlakuan panas T6 pada waktu tahan 16 jam sebesar 38,8 %, lebih tinggi dari prosentase kenaikan kekerasan pada waktu tahan 28 jam, yaitu sebesar 9,43 %. Kekerasan hasil *thixoforming* yang di *aging* selama 28 jam pada temperatur 200 °C secara umum lebih tinggi dibanding *aging* 16 jam, kecuali pada fraksi volume 20 %. fraksi volume 20 % alumina, kekerasan *aging* 16 jam adalah 95,76 HRB dan kekerasan *aging* 28 jam adalah 92,01 HRB.

4.2.3 Pengaruh Fraksi Volume Penguat Al₂O₃ dan Parameter *Aging* terhadap Ketahanan Aus Komposit.

Hasil pengujian aus yang dilakukan dengan mesin Ogoshi di laboratorium DT (*Destructive Testing*) Universitas Indonesia menunjukkan hasil sebagaimana berikut. Laju keausan ingot komposit lebih tinggi dibanding hasil *thixoforming* tanpa perlakuan panas. Nilai keausan tertinggi pada *ingot* komposit *casting* adalah 0,012 mm³/mm (0 % Vf) dan nilai keausan terendah adalah 0,0031 mm³/mm (15 % Vf). Penambahan fraksi volume alumina terbukti dapat menurunkan laju keausan.

Tabel IV.10 Analisa perhitungan pengujian aus komposit hasil *casting*

Laju Aus mm ³ /mm	Fraksi Volume Alumina				
	0%	5%	10%	15%	20%
1	1.28E-02	4.93E-03	3.62E-03	3.63E-03	4.17E-03
2	1.15E-02	5.67E-03	3.62E-03	2.78E-03	4.22E-03
3	1.21E-02	5.05E-03	3.71E-03	2.99E-03	4.50E-03
Jumlah (Σ)	3.64E-02	1.56E-02	1.10E-02	9.40E-03	1.29E-02
Rata - rata	1.21E-02	5.21E-03	3.65E-03	3.13E-03	4.30E-03
Standar deviasi	6.29E-04	3.99E-04	5.04E-05	4.46E-04	1.80E-04

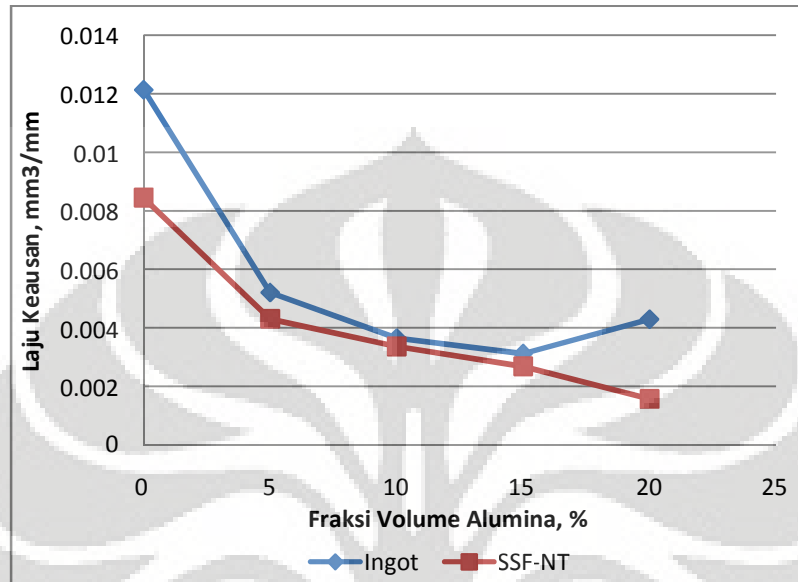
Tabel IV.11 Analisa perhitungan pengujian aus komposisi hasil *thixoforming* tanpa perlakuan panas

Laju Aus mm ³ /mm	Fraksi Volume Alumina				
	0%	5%	10%	15%	20%
1	9.46E-03	4.54E-03	3.42E-03	2.85E-03	1.56E-03
2	6.99E-03	4.48E-03	3.27E-03	2.32E-03	1.89E-03
3	9.02E-03	3.92E-03	3.39E-03	2.92E-03	1.32E-03
Jumlah (Σ)	2.55E-02	1.29E-02	1.01E-02	8.09E-03	4.77E-03
Rata - rata	8.49E-03	4.31E-03	3.36E-03	2.70E-03	1.59E-03
Standar deviasi	1.32E-03	3.44E-04	7.97E-05	3.27E-04	2.87E-04

Pada table 4.10 dan table 4.11 diperlihatkan data laju keausan dari sampel komposit hasil *casting* dan juga hasil *thixoforming* tanpa proses perlakuan panas. Nilai standar deviasi ingot komposit hasil *casting* berkisar antara 1.80E-04 - 6.29E-04 sedangkan untuk hasil *thixoforming* antara 7.97E-05 - 1.32E-0. Pada komposit hasil *casting* nilai deviasi terendahnya terdapat pada komposisi fraksi volume 20 % alumina yaitu 1.80E-04 sedangkan nilai deviasi terendah untuk komposit hasil *thixdoforming* terjadi pada fraksi volume 10% yang nilainya sebesar 7.97E-05.

Setelah proses pembentukan *thixoforming*, laju keausan komposit yang tidak dilakukan proses perlakuan panas T6 mengalami penurunan pada tiap fraksi volume, hal ini terlihat pada gambar 4.15. Laju keausan terbesar terjadi pada kadar 0 % fraksi

alumina yaitu $0,0084 \text{ mm}^3/\text{mm}$ sedangkan untuk laju keausan terendah terjadi pada fraksi volume 20 % alumina sebesar $0,0015 \text{ mm}^3/\text{mm}$



Gambar 4.13 Grafik hasil uji laju keausan pada ingot komposit dan hasil *thixoforming*

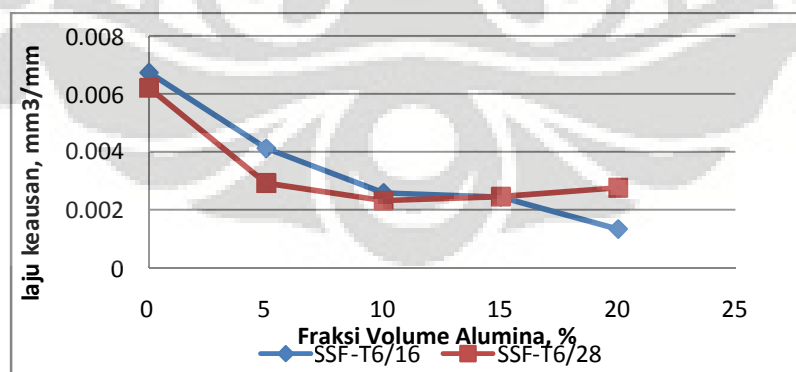
Tabel IV.12 Analisa perhitungan laju keausan komposit hasil *thixoforming* dan T6 Aging 16 jam

Laju Aus mm ³ /mm	Fraksi Volume Alumina				
	0%	5%	10%	15%	20%
1	6.56E-03	4.04E-03	2.46E-03	2.66E-03	1.07E-03
2	6.08E-03	4.01E-03	2.48E-03	1.99E-03	1.59E-03
3	7.61E-03	4.32E-03	2.83E-03	2.71E-03	1.40E-03
Jumlah (Σ)	2.03E-02	1.24E-02	7.77E-03	7.36E-03	4.06E-03
Rata - rata	6.75E-03	4.12E-03	2.59E-03	2.45E-03	1.35E-03
Standar deviasi	7.82E-04	1.69E-04	2.08E-04	4.02E-04	2.67E-04

Tabel IV.13 Analisa perhitungan laju keausan komposit hasil *thixoforming* dan T6 *Aging* 28 jam

Laju Aus mm ³ /mm	Fraksi Volume Alumina				
	0%	5%	10%	15%	20%
1	4.14E-03	3.59E-03	2.40E-03	2.58E-03	2.66E-03
2	6.43E-03	2.89E-03	2.11E-03	2.32E-03	2.91E-03
3	8.58E-03	2.38E-03	2.46E-03	2.46E-03	2.72E-03
Jumlah (Σ)	1.91E-02	8.86E-03	6.97E-03	7.37E-03	8.29E-03
Rata - rata	6.38E-03	2.95E-03	2.32E-03	2.46E-03	2.76E-03
Standar deviasi	2.22E-03	6.04E-04	1.83E-04	1.28E-04	1.35E-04

Pada tabel IV.12 dan IV.13 diperlihatkan mengenai data laju keausan dari sampel-sampel komposit hasil *thixoforming* dengan T6 dan *aging* selama 16 dan 28 jam. Nilai standar deviasi hasil *thixoforming* dengan T6 dan *aging* selama 16 jam berkisar antara 1.69E-04 - 7.82E-04. Sedangkan untuk nilai standar deviasi untuk hasil *thixoforming* dengan perlakuan panas T6 dan waktu *aging* selama 28 jam berkisar antara 1.28E-04 - 2.22E-03. Rendahnya rentang nilai standar deviasi membuktikan bahwa data yang dihasilkan memiliki keakuratan dan nilai kekerasan yang diperoleh mendekati nilai sebenarnya. Nilai kekerasan yang tercantum pada tabel IV.12 dan IV.13 diperoleh melalui persamaan uji keausan. Selanjutnya untuk memudahkan proses pengamatan pada hasil pengujian maka nilai rata-rata laju keausan dicantumkan dalam grafik 4.16.



Gambar 4.14 Grafik hasil uji laju keausan pada hasil *thixoforming* setelah di laku panas T6 dengan waktu *aging* 16 dan 28 jam.

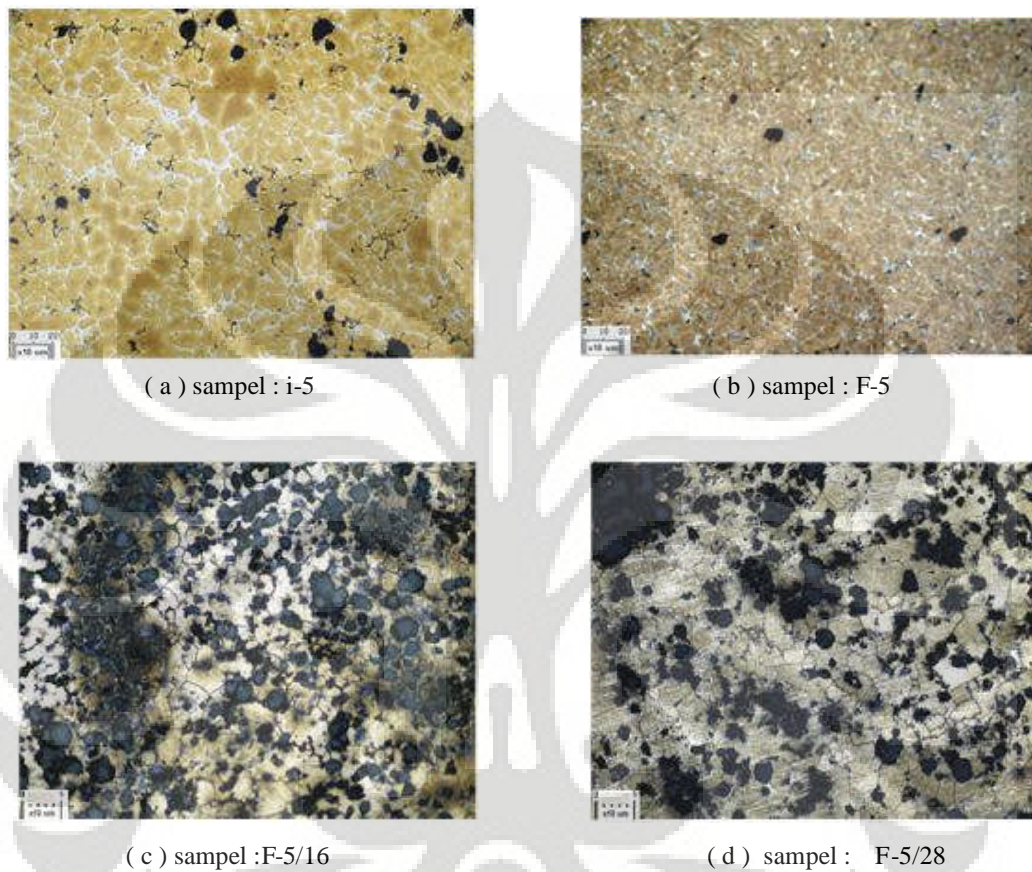
Pada gambar 4.16 diatas menunjukkan hasil pengujian laju keausan pada hasil *thixoforming* yang telah diberlakukan proses perlakuan panas T6 dengan waktu tahan 16 jam dan 28 jam. Pada umumnya laju keausan pada waktu aging 16 dan 28 jam tidak jauh berbeda tetapi pada beberapa titik terdapat perbedaan yang berarti. Misalnya pada fraksi volume 20 % pada waktu *aging* 28 jam menunjukkan nilai kekerasan yang lebih tinggi daripada waktu *aging* 16 jam. Tetapi pada fraksi volume 0 – 10 % nilai kekerasan pada waktu aging 16 jam lebih tinggi daripada waktu aging 28 jam, hal ini dapat kita lihat pada gambar 4.16.

Pada *aging* 28 jam, laju keausan tertinggi adalah $0,0062 \text{ mm}^3/\text{mm}$ (0 % Vf) dan terendah adalah $0,0023 \text{ mm}^3/\text{mm}$ (10% Vf). Sedangkan untuk laju keausan dengan waktu *aging* 16 jam yang tertinggi adalah $0,0067 \text{ mm}^3/\text{mm}$ (0 % Vf) dan terendah adalah $0,0013 \text{ mm}^3/\text{mm}$ (20% Vf). Pada fraksi volume 20 % alumina, laju keausan pada waktu *aging* 16 jam lebih rendah 51,4 % dibanding dengan waktu *aging* 28 jam. Penurunan laju keausan ini disebabkan karena pada waktu *aging* 28 jam *precipitate* yang terlarut didalam matriks lebih banyak dan tersebar merata dibandingkan dengan waktu *aging* 16 jam sehingga kekerasan yang dihasilkan juga lebih tinggi.

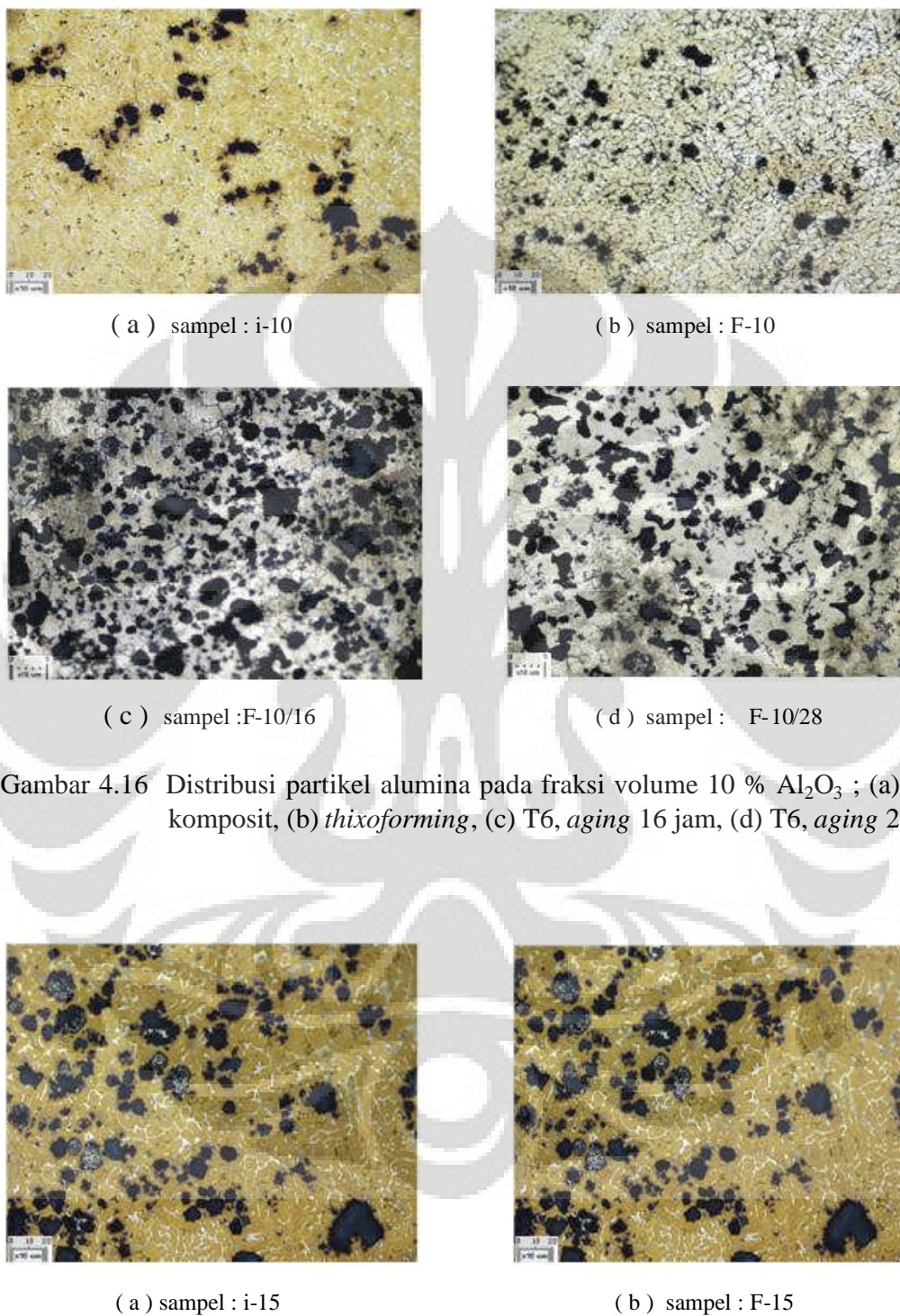
4.2.4 Hubungan Metalografi Distribusi Partikel Alumina Dengan Sifat Mekanis

Pengujian metalografi yang dilakukan untuk mengamati distribusi partikel alumina dilakukan pada perbesaran 100 x. Perbesaran 100 x dianggap dapat mewakili daerah yang cukup luas untuk dapat diamati sebaran partikel alumina pada permukaan sampel. Sebelumnya pada gambar 4.17 sampai gambar 4.25 telah diperlihatkan distribusi partikel penguat alumina pada ingot komposit hasil *casting*, hasil *thixoforming* tanpa laku panas dan *thixoforming* dengan perlakuan panas T6 yang di *aging* selama 16 dan 28 jam.

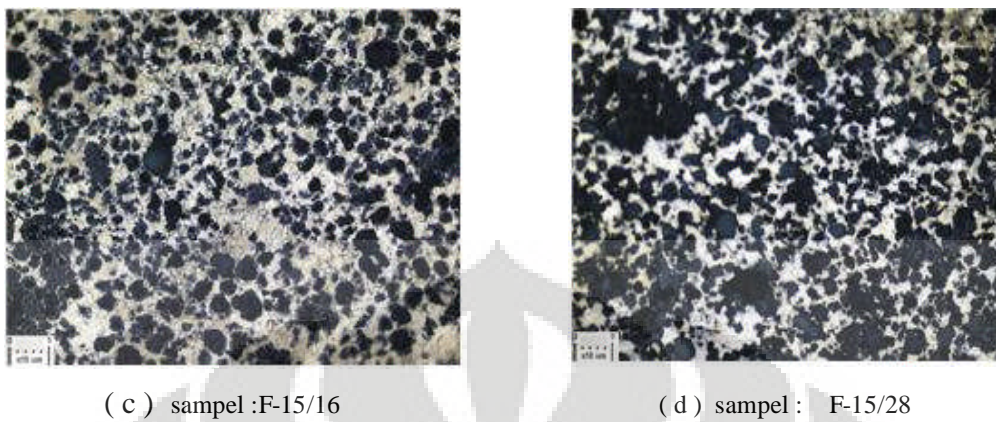
Berikut ini adalah hasil foto mikrostruktur dari fraksi volume yang sama pada setiap proses yang dilakukan pada penelitian ini.



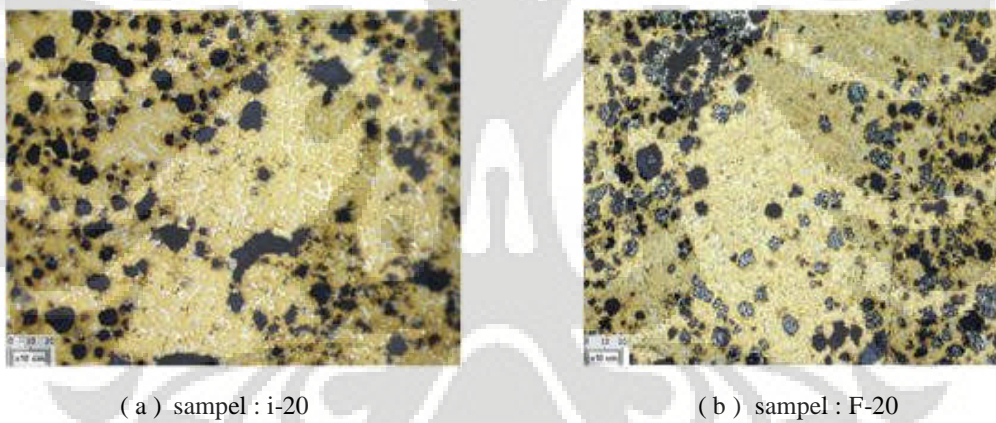
Gambar 4.15 Distribusi partikel alumina pada fraksi volume 5 % Al_2O_3 ; (a) *ingot* komposit, (b) *thixoforming*, (c) T6, *aging* 16 jam, (d) T6, *aging* 28 jam.

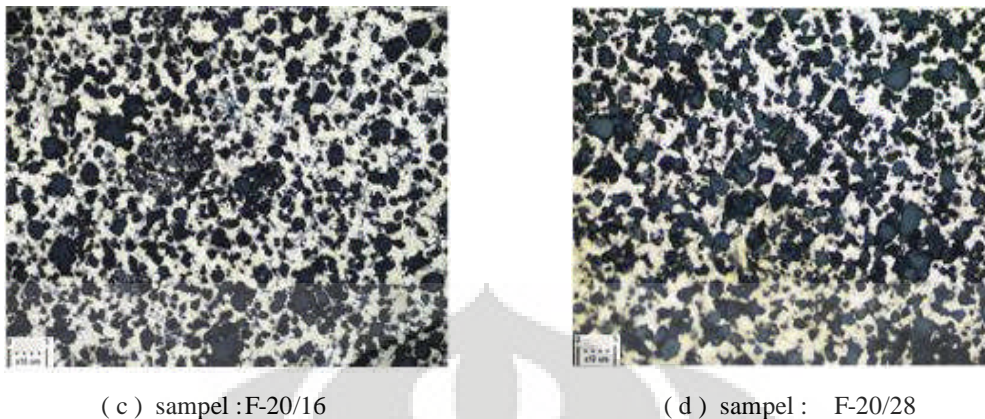


Gambar 4.16 Distribusi partikel alumina pada fraksi volume 10 % Al_2O_3 ; (a) *ingot* komposit, (b) *thixoforming*, (c) T6, *aging* 16 jam, (d) T6, *aging* 28 jam



Gambar 4.17 Distribusi partikel alumina pada fraksi volume 15 % Al₂O₃ ; (a) *ingot* komposit, (b) *thixoforming*, (c) T6, *aging* 16 jam, (d) T6, *aging* 28 jam



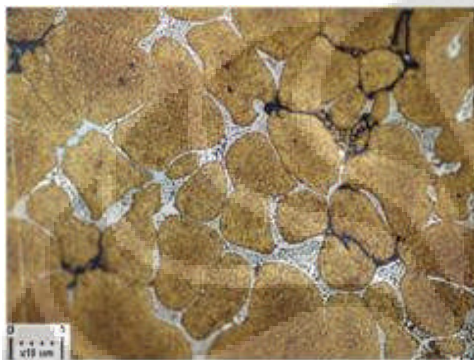


Gambar 4.18 Distribusi partikel alumina pada fraksi volume 20 % Al_2O_3 ; (a) ingot komposit (b) *thixoforming*, (c) T6, *aging* 16 jam, (d) T6, *aging* 28 jam

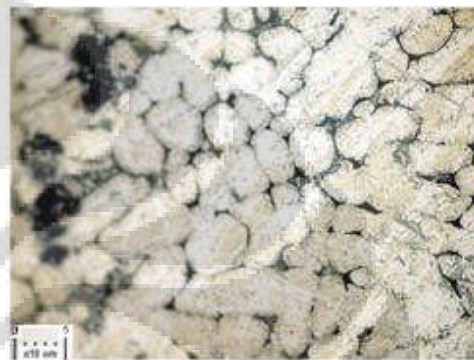
Dari gambar diatas terlihat bahwa distribusi partikel pada komposit mulai fraksi volume 20%, sebaran alumina tersebar merata pada matriks komposit. Pada komposit hasil *thixoforming* pada perlakuan panas T6 dengan waktu *aging* 16 dan 28 jam terlihat bahwa persebaran partikel penguat alumina lebih banyak daripada komposit hasil *casting*. Demikian juga dengan persebaran komposit pada *thixoforming* sebelum *aging*, sebaran alumina lebih sedikit dibandingkan dengan proses *thixoforming* setelah proses *aging*. Persebaran alumina yang merata pada matriks komposit dapat meningkatkan kekerasan dan keausan sesuai dengan mekanisme pembentukan fasa terlarut yang dapat menghambat pergerakan dislokasi.

Struktur mikro ingot komposit yang hendak dikenai proses lanjut berupa pemanasan ulang untuk mencapai fasa *semisolid* harus memiliki struktur *globular*. Berdasarkan hasil foto mikro ingot komposit dengan perbesaran 500x pada gambar 4.7, terlihat bahwa struktur mikro ingot komposit sebagian besar telah berbentuk *globular*, walaupun masih terdapat yang berbentuk dendritik. Banyaknya bintik hitam pada mikrostruktur terjadi karena pada saat proses pencampuran magnesium, ingot AlCu dan serbuk aluminium terdapat gas yang terjebak didalam leburan akibat kesalahn dalam proses pengadukan (*stirring*).

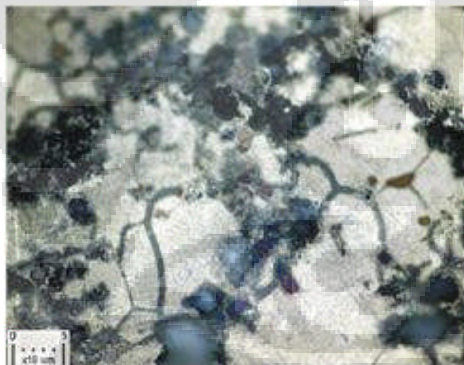
Perubahan struktur mikro terjadi akibat proses dan perlakuan panas yang diberikan pada sampel. Perubahan struktur ini juga mempengaruhi sifat mekanis material. Berikut ini akan dijelaskan tentang perubahan struktur mikro hasil laku panas T6 pada setiap tahapan proses mulai dari ingot komposit, *thixoforming* dan *aging* pada temperatur 16 dan 28 jam.



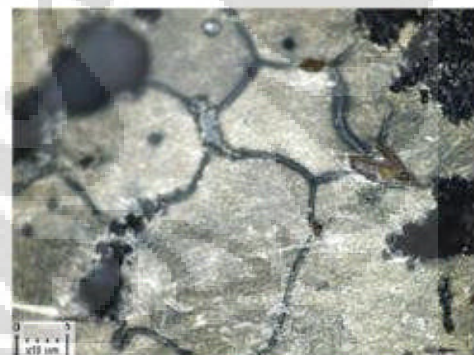
(a) sampel : i-5



(b) sampel : F-5

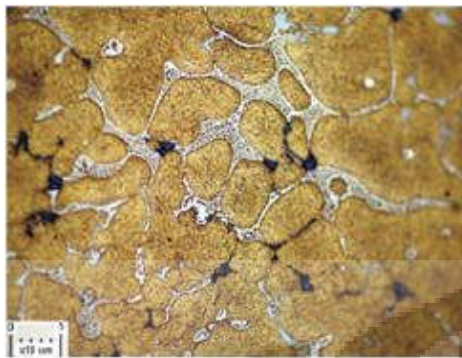


(c) sampel : F-5/16

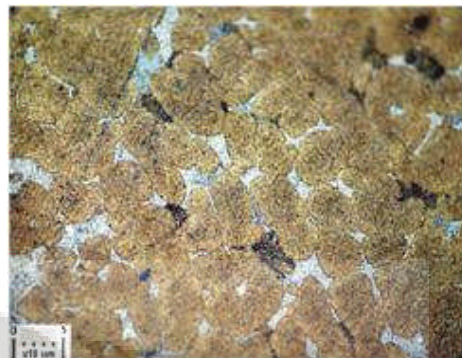


(d) sampel : F-5/28

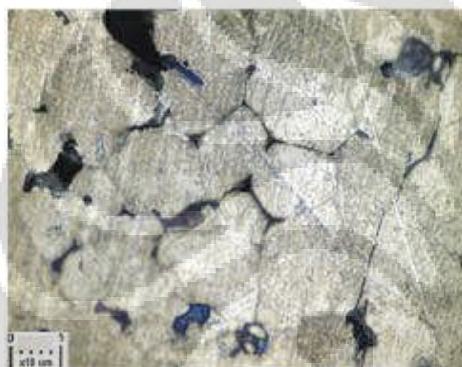
Gambar 4.19 Perubahan struktur mikro hasil laku panas T6 pada fraksi volume 5 % Al_2O_3 Al_2O_3 ; (a) ingot komposit, (b) *thixoforming*, (c) T6, *aging* 16 jam, (d) T6, *aging* 28 jam



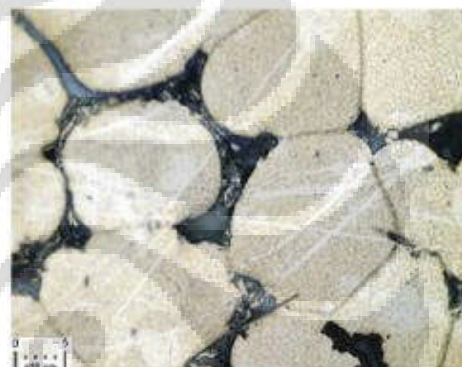
(a) sampel : i-10



(b) sampel : F-10



(c) sampel : F-10/16



(d) sampel : F-10/28

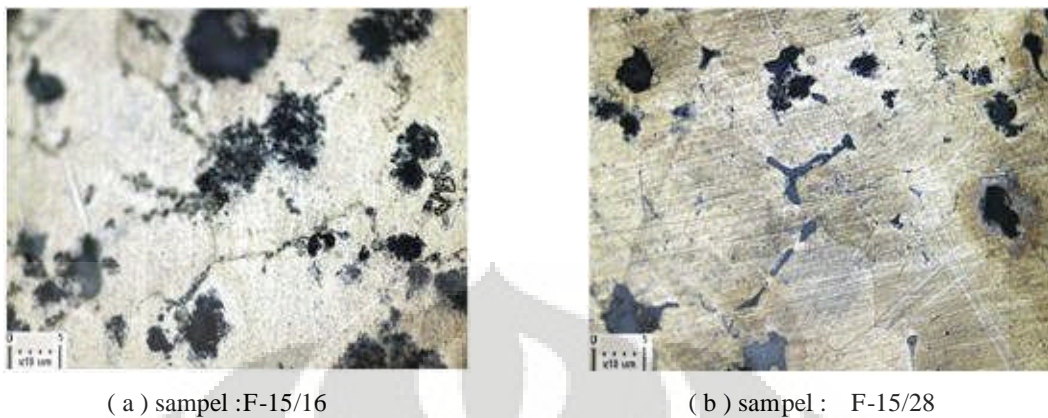
Gambar 4.20 Perubahan struktur mikro hasil laku panas T6 pada fraksi volume 10 % Al_2O_3 ; (a) ingot komposit, (b) *thixoforming*, (c) T6, *aging* 16 jam, (d) T6, *aging* 28 jam



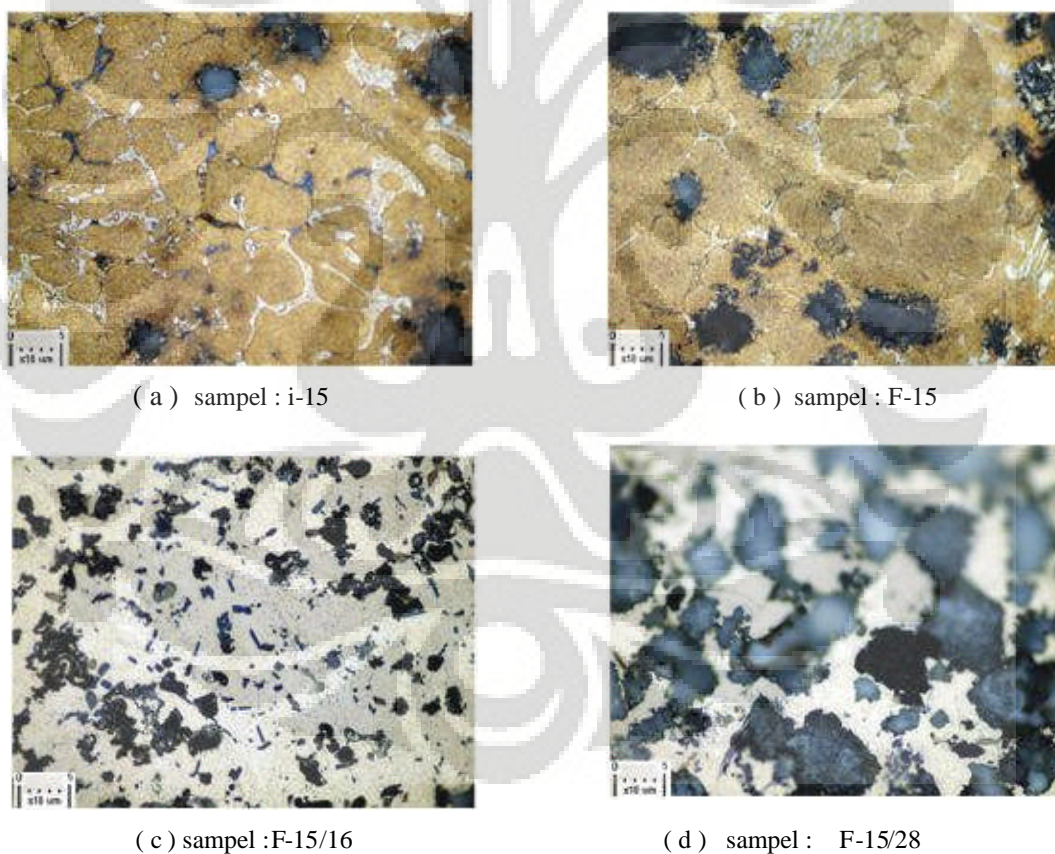
(a) sampel : i-15



(b) sampel : F-15



Gambar 4.21 Perubahan struktur mikro hasil laku panas T6 pada fraksi volume 15 % Al_2O_3 ; (a) ingot komposit, (b) *thixoforming*, (c) T6, *aging* 16 jam, (d) T6, *aging* 28 jam



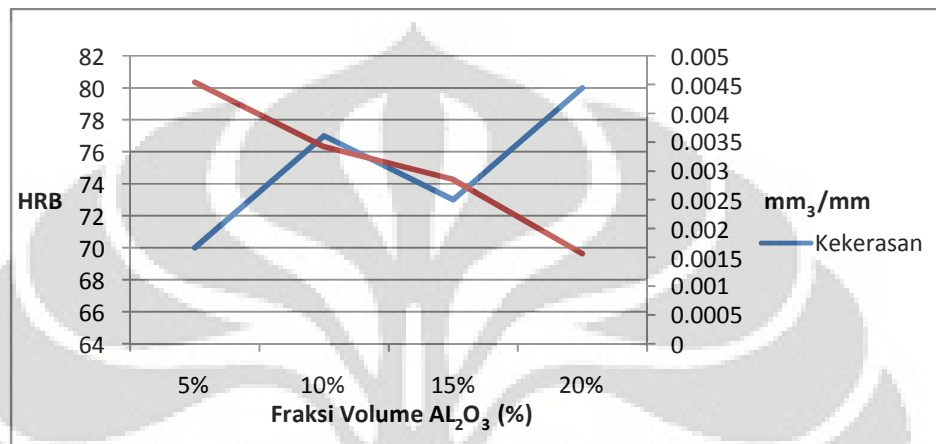
Gambar 4.22 Perubahan struktur mikro hasil laku panas T6 pada fraksi volume 20 % Al_2O_3 ; (a) ingot komposit, (b) *thixoforming*, (c) T6, *aging* 16 jam, (d) T6, *aging* 28 jam

Pada gambar mikrostruktur diatas terlihat bahwa struktur hasil proses *thixoforming* lebih kecil daripada ingot komposit. Pengecilan ukuran butir ini disebabkan oleh besarnya gaya tekan alat yang diberikan pada saat proses *thixoforming*. Perlakuan panas *solution treatment* pada temperatur 540 °C selama 4 jam kemudian dilakukan proses *quenching* dan *aging* pada temperatur 200 ° selama 16 dan 28 jam terlihat telah merubah struktur mikro komposit. Pembesaran butir dan meleburnya beberapa batas butir menunjukkan bahwa terjadi *over heating* pada saat *solution treatment*. Tetapi komposit pada fraksi volume 5 % dan 10 % alumina terlihat masih dapat mempertahankan bentuknya dalam bentuk *globular*.

Pada hasil uji EDS pada *ingot* 5 % Al_2O_3 pada daerah 3 terlihat bahwa *precipitate* alumina CuAl_2 memiliki komposisi unsur yang lebih banyak daripada daerah 1 dan daerah 2. Dimana *precipitate* CuAl_2 terletak pada batas butir, yang seharusnya terletak pada butir, bukan pada batas butir. Hal ini terjadi karena pengikat (*wetting agent*) magnesium (4 %) tidak mengikat secara sempurna penguat alumina pada matriks sehingga *precipitate* tidak terletak pada butir melainkan pada batas butir. Kemudian pada hasil *thixoforming* 5 % Al_2O_3 juga terlihat bahwa *precipitate* alumina terbanyak terdapat pada daerah 2 dibandingkan pada daerah 1 dan 3. Sedangkan untuk ingot komposit dengan 10 % alumina, kandungan *precipitate* CuAl_2 terbanyak terdapat pada daerah 2, selain unsur Cu dan Al, terdapat juga logam magnesium maupun O_2 dengan komposisi yang tidak terlalu banyak. Lalu untuk paduan *thixoforming* dengan dengan penguat 10 % pada tiga daerah yang dipilih tidak terdapat persebaran partikel *precipitate* yang baik, hanya terdapat unsur aluminium saja yang memiliki komposisi terbesar. Untuk *ingot* komposit 15 % Al_2O_3 juga tidak terdapat persebaran *precipitate* penguat yang baik, pada daerah 1 hanya terdapat unsur Al dan O_2 dengan komposisi yang banyak. Untuk komposit hasil *thixoforming* dengan 15 % Al_2O_3 pada daerah 2 memiliki persebaran *precipitate* yang lebih banyak daripada daerah lainnya, besarnya kandungan unsur yang dimiliki dapat dilihat pada lampiran. Kemudian pada *ingot* komposit 20 % Al_2O_3 tidak terdapat persebaran

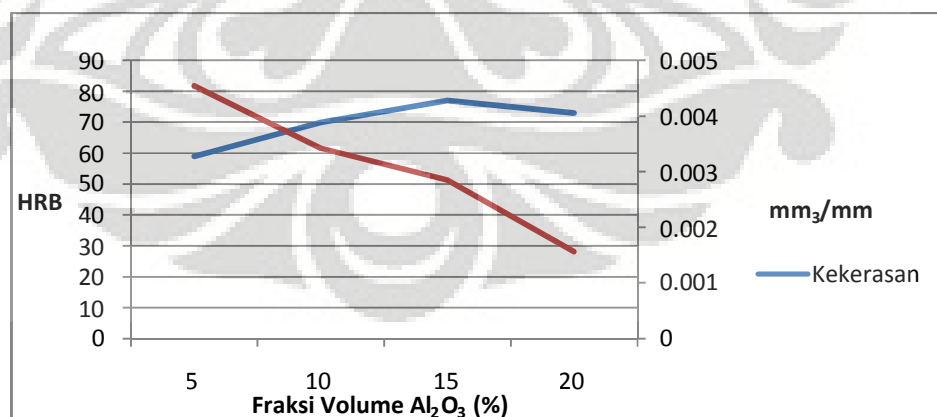
precipitate yang baik, hal itu juga terjadi pada komposit hasil *thixoforming* dengan penguat 20 % Al_2O_3 .

Dari hasil yang didapatkan antara nilai kekerasan dan keausan pada hasil *casting* tanpa perlakuan panas dapat dihasilkan analisa sbb :



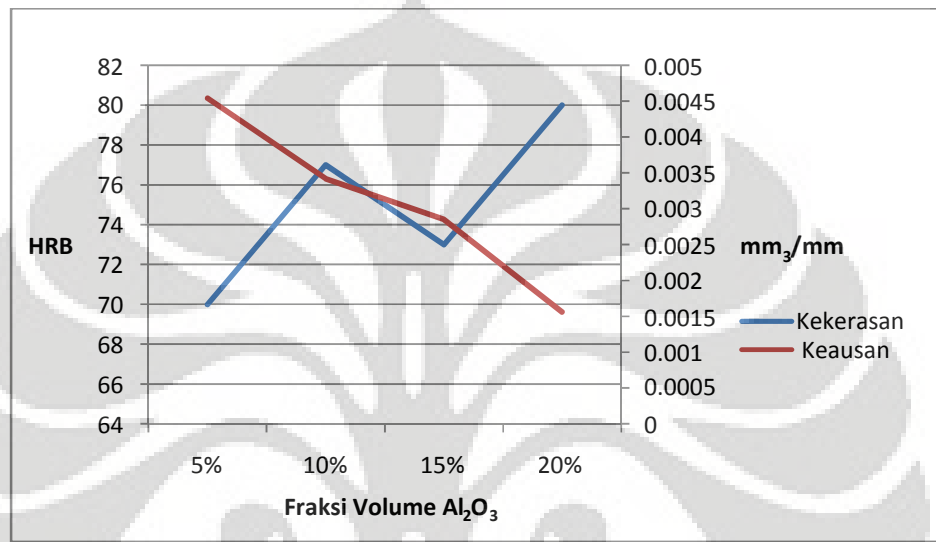
Gambar 4.23 Grafik perbandingan kekerasan dan keausan hasil *casting*

Pada grafik diatas kita dapat disimpulkan bahwa seiring dengan penambahan fraksi volume alumina maka nilai kekerasan akan mengalami kenaikan sedangkan nilai keausan akan mengalami penurunan. Kemudian nilai optimum kekerasan dan keausan dari grafik tersebut berada diantara 7,5 sampai 10 % fraksi volume. Selain grafik tersebut, terdapat juga grafik perbandingan nilai kekerasan dan keausan pada *thixoforming* tanpa perlakuan panas. Berikut ini adalah hasil analisisnya :



Gambar 4.24 Grafik perbandingan kekerasan dan keausan komposit *thixoforming* tanpa perlakuan panas

Pada grafik diatas dapat disimpulkan bahwa nilai kekerasan mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya partikel penguat alumina dan juga nilai keausan akan mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya fraksi volume alumina. Nilai optimum kekerasan dan keausan terdapat pada rentang antara 7,5 sampai 10 % fraksi volume alumina. Sedangkan untuk paduan komposit *thixoforming* dengan perlakuan panas T6 dengan temperatur *aging* 16 jam dapat dilihat sbb :



Gambar 4.25 Grafik perbandingan kekerasan dan keausan hasil *thixoforming* dengan *solution treatment* 540 °C dan *aging* pada suhu 200 °C selama 6 jam

Pada komposit *thixoforming* dengan perlakuan panas T6 pada temperatur *aging* 16 jam, dapat dilihat bahwa nilai kekerasan dan keausan optimum dicapai pada fraksi volume antara 7,5 % sampai dengan 10 %.

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan karakterisasi komposit matrik logam Al₅Cu dengan material penguat Al₂O₃, maka rangkuman penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Dengan menambahkan fraksi volume penguat alumina bisa meningkatkan kekerasan material komposit. Kekerasan *ingot* akibat penambahan hingga 20 % Vf alumina telah menaikkan kekerasan sebesar 45 % dari 52 HRB menjadi 76 HRB. Kekerasan tertinggi dicapai pada penambahan 20 % Vf alumina dan telah melalui proses *thixoforming* dan aging selama 16 jam, yaitu 95,4 HRB.
2. Nilai kelajuan keausan dapat diturunkan dengan menambahkan fraksi volume alumina pada matrik komposit. Keausan tertinggi pada *ingot casting* adalah sebesar 0,012 mm³/mm (0 % Vf) dan nilai keausan terendah adalah 0,0031 mm³/mm (15 % Vf). Pada produk hasil *thixoforming* tanpa proses laku panas laju keausan terbesar pada 0 % Vf alumina yaitu sebesar 0,0084 mm³/mm dan laju keausan terendah adalah 0,0015 mm³/mm pada 20 % Vf alumina.
3. Pada waktu aging 16 jam laju keausan tertinggi adalah 0,0067 mm³/mm (0 % Vf) dan keausan terendah sebesar 0,0013 mm³/mm (20% Vf). Sedangkan pada waktu *aging* 28 jam laju keausan tertinggi adalah 0,0062 mm³/mm (0 % Vf) dan terendah adalah 0,0023 mm³/mm (10 % Vf)
4. Pada komposit hasil *casting*, fraksi volume alumina untuk mendapatkan kekerasan dan keausan optimum adalah antara 7,5 sampai 10 % alumina. Sedangkan untuk hasil *thixoforming* tanpa perlakuan panas nilai kekerasan dan keausan optimum berada pada kisaran antara 7,5 sampai 9 % alumina. Dan yang terakhir untuk komposit *thixoforming* dengan *solution treatment* 540 °C dan temperatur *aging* 200 °C selama 16 jam, nilai kekerasan dan keausan optimum berada pada kisaran alumina antara 7,5 sampai 10 %.

5. Pada komposit *thixoforming* dengan fraksi volume 5 % Al_2O_3 pada daerah 2 memiliki *precipitate* $CuAl_2$ paling banyak diantara daerah lainnya yang tersebar pada matriks Al_5Cu .



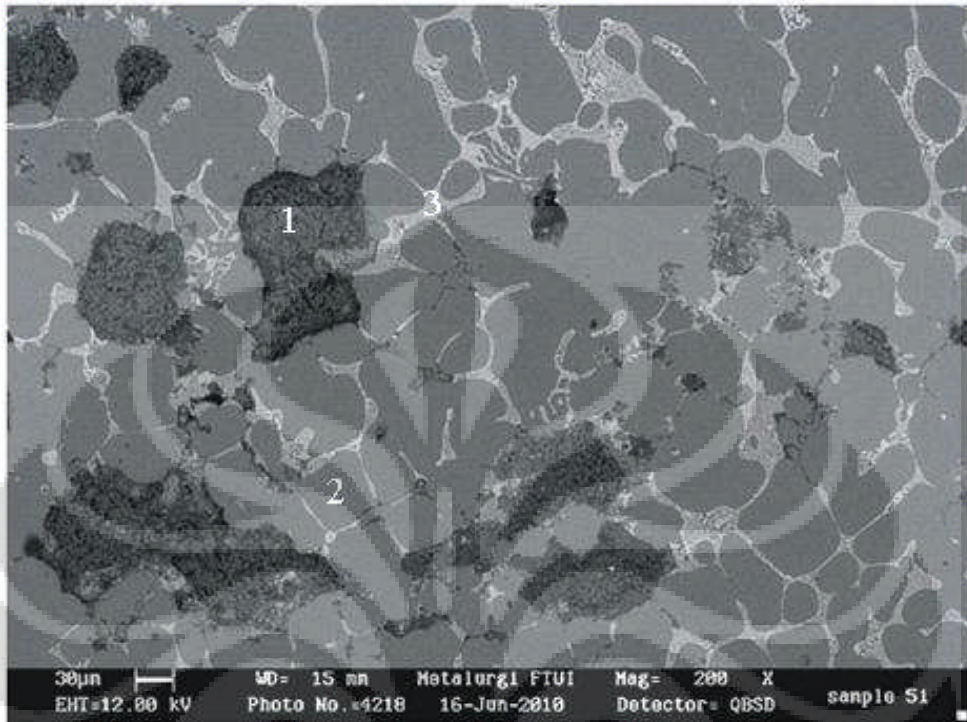
DAFTAR REFERENSI

- [1] L. Olaya, *Characterization Of Squeeze-Cast Al₁₂/Al And Al₂/Al Composites*, A thesis of Mechanical Engineering University Of Puerto Rico Mayagüez Campus, 2009
- [2] Daoud, M.T. Abou El-Khair, A.N. Abdel-Azim, *Effect of Al₂O₃ Particles on the Microstructure and Sliding Wear of 7075 Al Alloy Manufactured by Squeeze Casting Method*, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 13(2) —135 April 2004
- [3] A.Sanghaleh, M. Halali, *Effect of Magnesium Addition on the Wetting Alumina by Aluminium*, Sharif University of Technology, Iran
- [4] S.Madhusudan, M.M.M.Sarcar, N.M.M.R.Bhargava, *Fabrication and Characterization of Aluminium-Copper Composites*, Journal of Alloys and Compounds 471-166-118, 2009
- [5] T.B. Romijarso, *Pembuatan Komposit Matriks Logam Al₅Cu/Al₂O₃ Dan Al₅Cu/SiC melalui Proses Pengadukan dan Tempa Cetakan Terbuka*, Tesis Universitas Indonesia, 2008.
- [6] C.P.Hong, H.F.Shen, I.S.Cho, *Prevention of Macrosegregation in Squeeze Casting of an Al_{4,5}Cu Alloy*, Metallurgical and Materials Transaction A, Volume 29A, 1998
- [7] D. Liu, h. V. Atkinson, p. Kapranos, h. Jones, *Effect of heat treatment on properties of thixoformed high performance 2014 and 201 aluminium alloys*, Journal of Materials Science 39 (2004) 99– 105
- [8] J. Wannasin, S. Thanabumrunikul, *Development of a semi-solid metal processing technique for aluminium casting applications*, Songklanakarin Journal. Of Science n Technology, 30 (2), 215-220, Mar. - Apr. 2008
- [9] J. Wannasin, S. Thanabumrunikul, *Development Of A Semi-Solid Metal Processing Technique for Aluminium Casting Applications*, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112 Thailand. 2008
- [10] L. Ivanchev, D. Wilkins, S. Govender, W. Du Preez, R. Bean, *Rheo-Processing Of Semi-Solid Metal Alloys A New Technology For Manufacturing Automotive And Aerospace Components*, February 2006.
- [11] G. Hirt, R. Kop, *Thixoforming, Semi-solid Metal Processing*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009

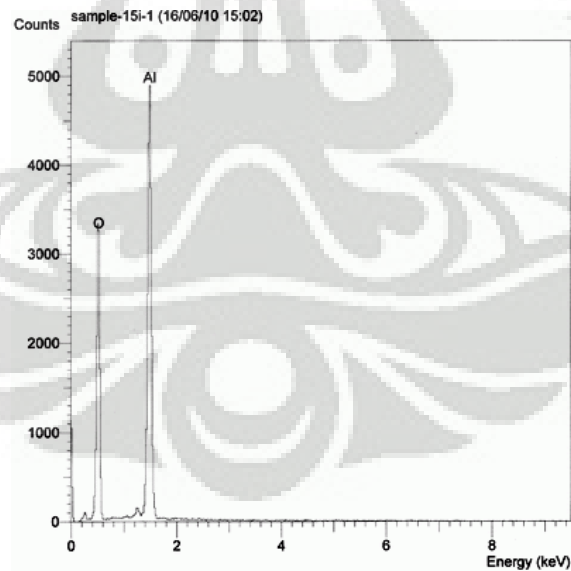
- [12] K. U. Kainer, *Basics of Metal Matrix Composites, Metal Matrix Composites. Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006
- [13] L. Froyen, *Aluminium Matrix Composites Materials*, TALAT Lecture University of Leuven, Belgium, 1994, EAA - European Aluminium Association
- [14] M K Surappa, *Aluminium matrix composites: Challenges and Opportunities*, S^{adhanā} a Vol. 28, Parts 1 & 2, February/April 2003, pp. 319–334, India
- [15] L. O. Luengas, *Characterization of Squeeze-Cast AlB12/Al and AlB2/Al Composites*, a Thesis University of Puerto Rico
- [16] S. Kumar , J.A.Theerthan, *Metal Matrix Composite: Production And Characterisation Of Aluminium-Fly Ash Composite Using Stir Casting Method*, A Thesis, Department of Metallurgical & Materials Engineering, National Institute of Technology Rourkela, 2008
- [17] J.A. Al-Jarrah, S. Ray, and P.K. Ghosh, *Solidification Processing of Al-Al₂O₃ Composite Using Turbine Stirrer*, Metallurgical And Materials Transactions A, 1712— Volume 29A, June 1998
- [18] R. Cobden, Alcan, Banbury, *Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys*, TALAT Lecture 1501, EAA - European Aluminium Association, 1994
- [19] G. E. T. Ten, D. S.M. Kenzie, *Handbook of Aluminum Volume 7 Physical Metallurgy and Processes*, Marcel Dekker, Inc. New York • Basel , USA, 2003.
- [20] S. Madhusudana, M.M.M. Sarcar^b, N.R.M.R. Bhargava^c, *Fabrication and Characterization of Aluminium–Copper Composites*, Journal of Alloys and Compounds 471 (2009) 116–118
- [21] ASM Handbook Volume 21, *Composites* , ASM International Handbook Committee, 2001
- [22] G. Hirt, R.Kopp, *Thixoforming-Semi-solid Metal Processing*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009
- [23] Z. Fan, *Semisolid Metal Processing*, International Materials Reviews 2002 Vol. 47 No. 21

Lampiran 1

Hasil Uji SEM/EDS



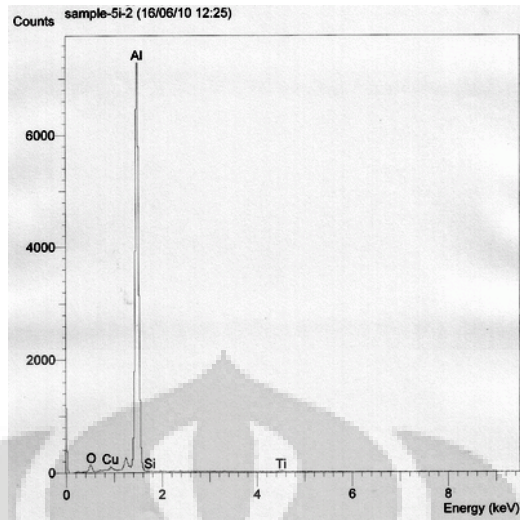
Gambar 1. Hasil SEM ingot dengan fraksi volume 5 % Al_2O_3



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	27.84	39.41
Al K	ED	72.16	60.59
Total		100.00	100.00

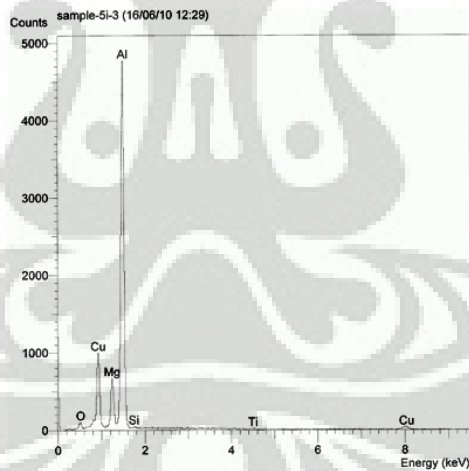
(a)



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
 Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	3.51	6.07
Al K	ED	86.66	88.87
Si K	ED	0.92	0.94
Ti K	ED	1.82	1.05
Cu K	ED	7.06	3.07
Total		100.00	100.00

(b)

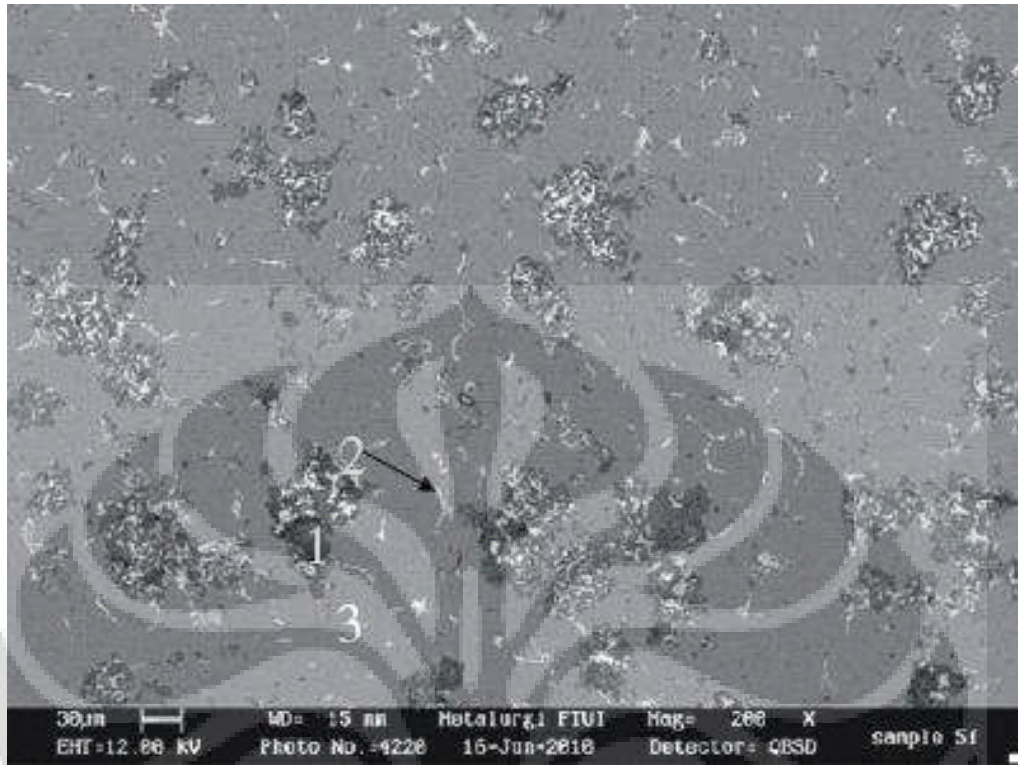


Quantitative method : ZAF (2 iterations).
 Analyzed all elements and normalized results.

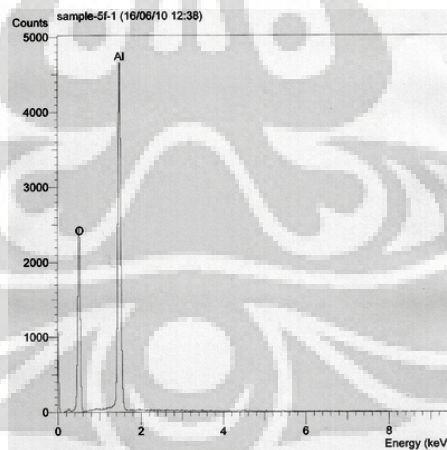
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	1.25	2.63
Mg K	ED	5.62	7.79
Al K	ED	55.31	69.05
Si K	ED	0.48	0.58
Ti K	ED	0.88	0.62
Cu K	ED	36.46	19.33
Total		100.00	100.00

(c)

Gambar 1. Hasil EDS ingot dengan fraksi volume 5 % Al_2O_3 pada daerah : (a) 1, (b) 2, (c) 3



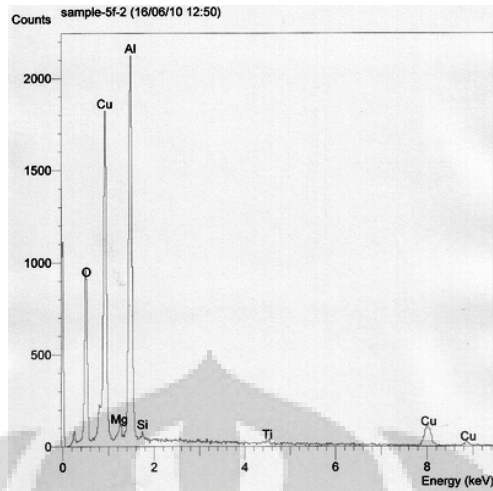
Gambar 2. Hasil EDS komposit *thixoforming* dengan fraksi volume 5 % Al_2O_3



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	46.04	58.99
Al K	ED	53.96	41.01
Total		100.00	100.00

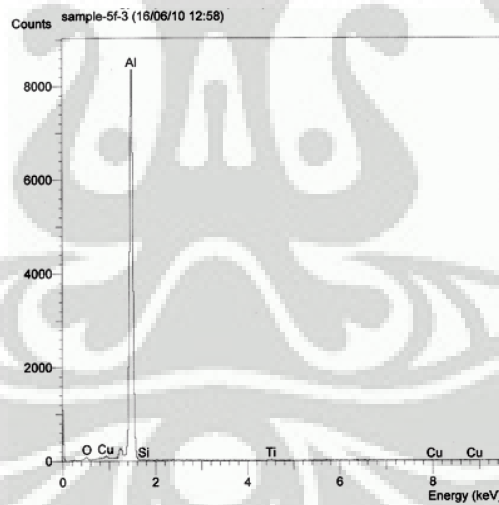
(a)



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	8.98	23.04
Mg K	ED	0.39	0.67
Al K	ED	19.84	30.21
Si K	ED	0.25	0.37
Ti K	ED	0.25	0.51
Cu K	ED	0.60	45.21
Total		100.00	100.00

(b)

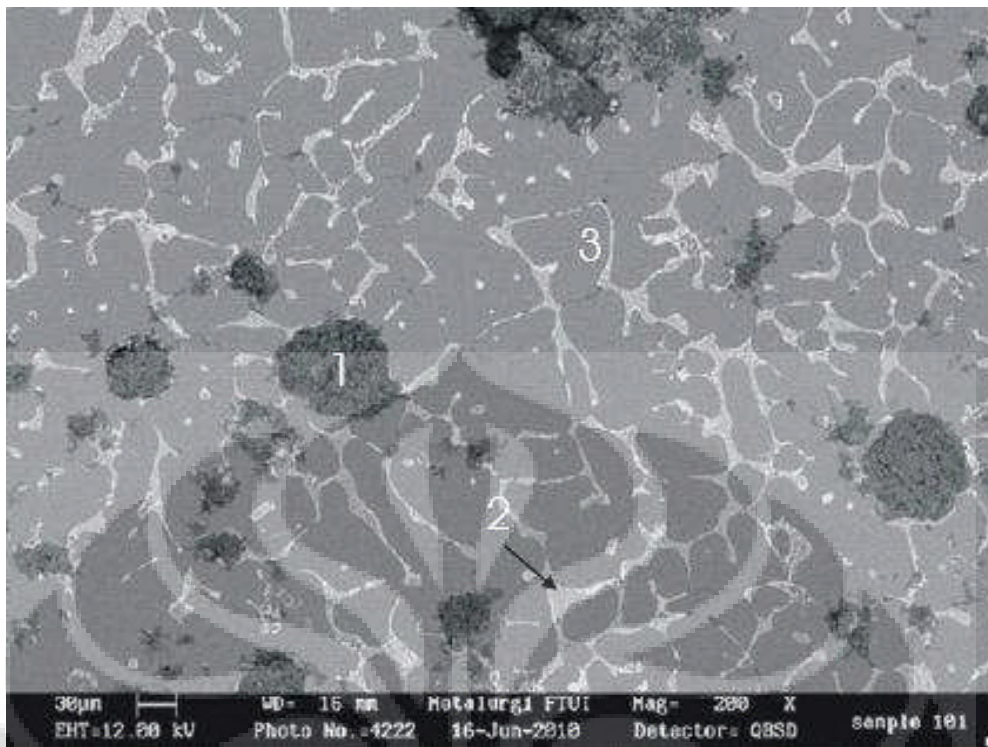


Quantitative method : ZAF (2 iterations).
Analyzed all elements and normalized results.

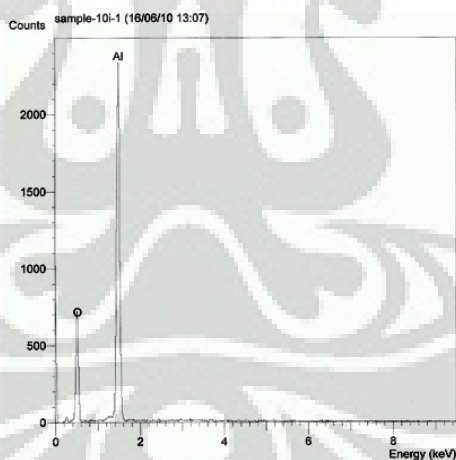
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	1.75	3.02
Mg K	ED	91.51	93.78
Ti K	ED	1.88	1.09
Cu K	ED	4.86	2.11
Total		100.00	100.00

(c)

Gambar 2. Hasil EDS komposit *thixoforming* dengan fraksi volume 5 % Al_2O_3 pada daerah : (a) 1, (b) 2, (c) 3



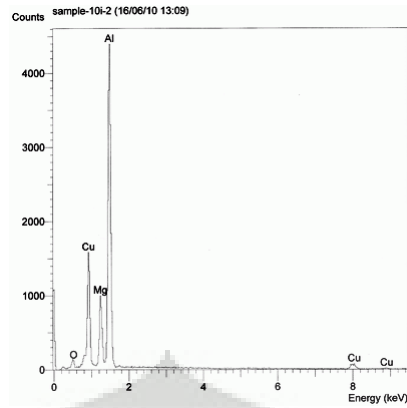
Gambar 3. Hasil SEM ingot komposit dengan fraksi volume 10 % Al₂O₃



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
 Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	35.42	48.06
Al K	ED	64.58	51.94
Total		100.00	100.00

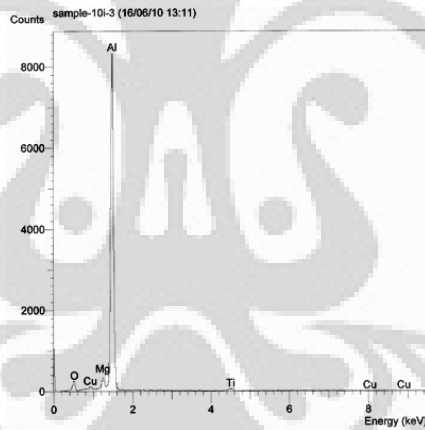
(a)



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	1.32	3.04
Mg K	ED	7.81	11.86
Al K	ED	41.07	56.17
Cu K	ED	49.80	28.93
Total		100.00	100.00

(b)

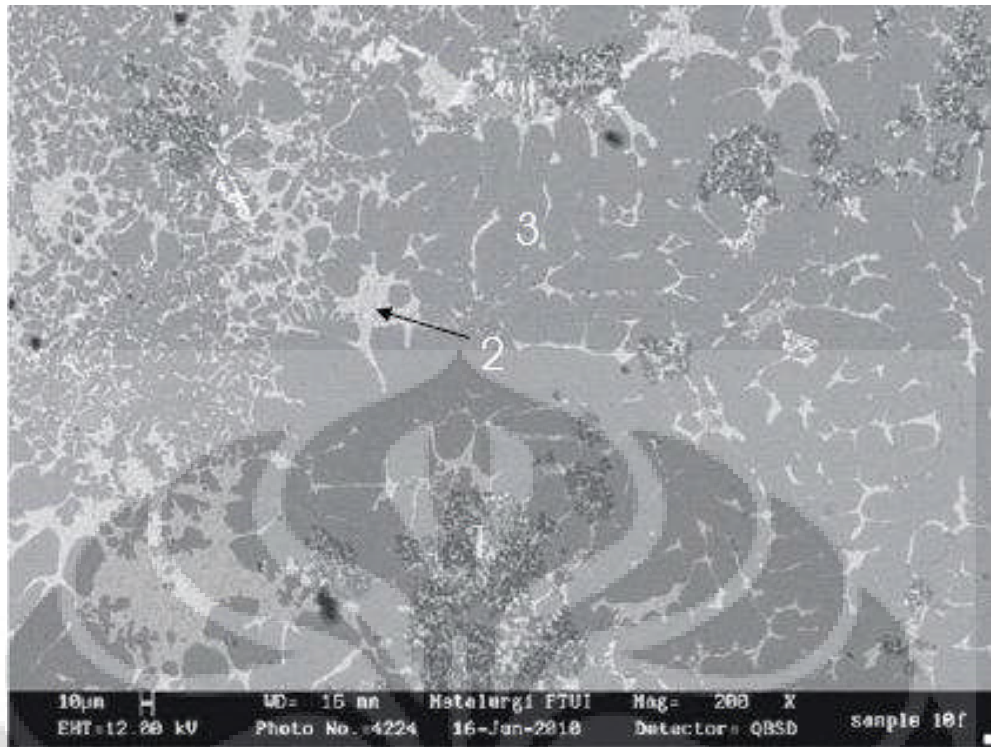


Quantitative method : ZAF (2 iterations).
Analyzed all elements and normalized results.

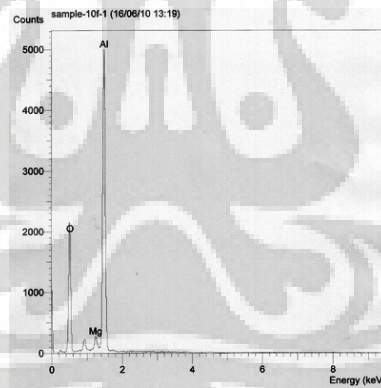
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	6.22	10.45
Mg K	ED	0.50	0.55
Al K	ED	85.42	85.03
Ti K	ED	4.68	2.62
Cu K	ED	3.18	1.34
Total		100.00	100.00

(c)

Gambar 3. Hasil EDS ingot komposit dengan fraksi volume 10 % Al_2O_3 pada daerah : (a) 1, (b) 2, (c) 3



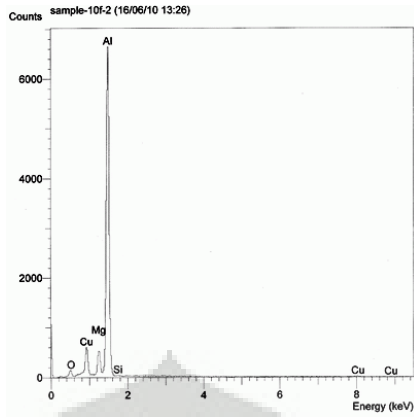
Gambar 4. Hasil SEM komposit *thixoforming* dengan fraksi volume 10 % Al_2O_3



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	38.06	51.93
Mg K	ED	1.20	1.07
Al K	ED	56.14	45.42
Cu K	ED	4.60	1.58
Total		100.00	100.00

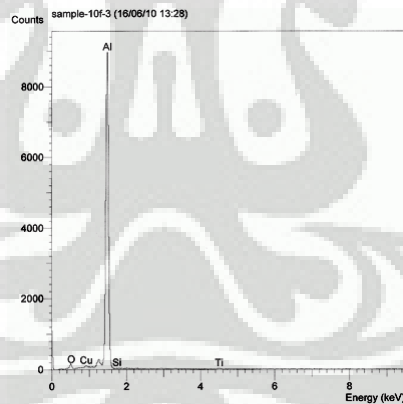
(a)



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
 Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	2.72	4.95
Mg K	ED	3.33	3.98
Al K	ED	76.90	82.83
Si K	ED	0.76	0.79
Cu K	ED	16.29	7.45
Total		100.00	100.00

(b)

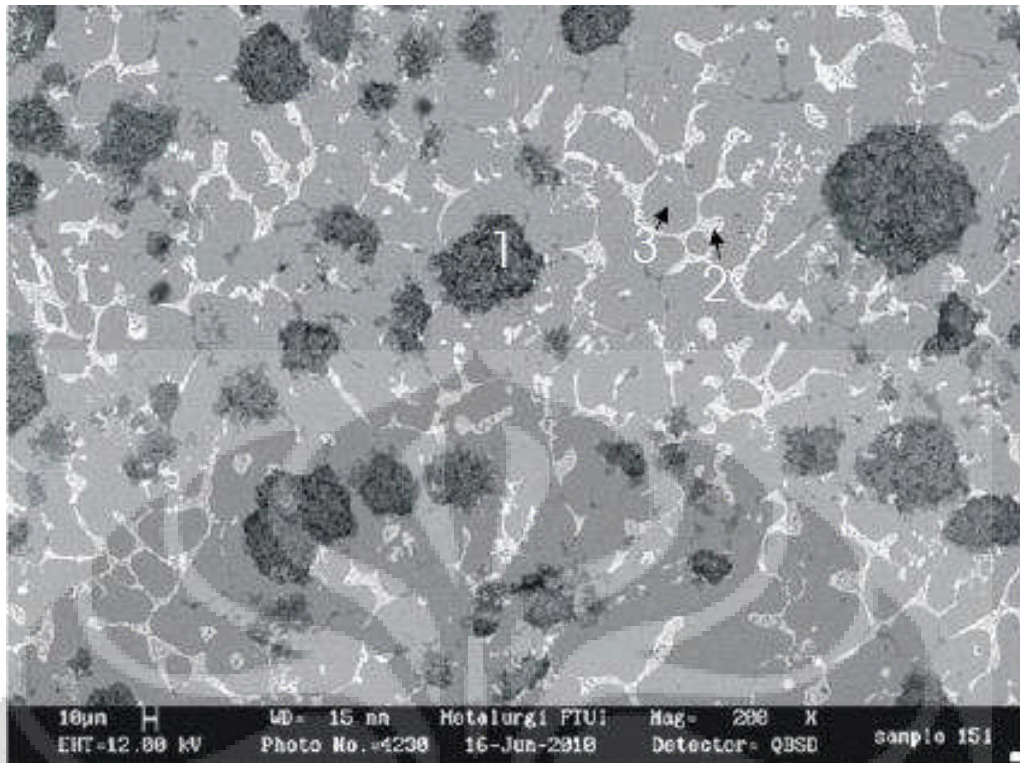


Quantitative method : ZAF (2 iterations).
 Analyzed all elements and normalized results.

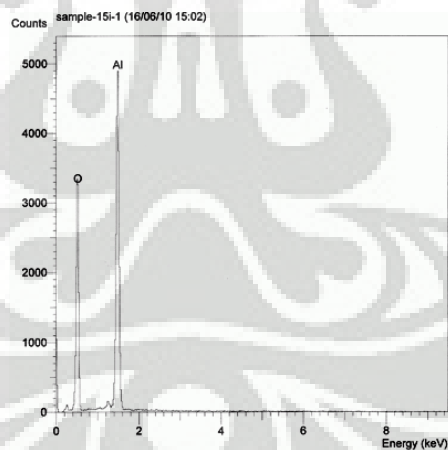
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	3.34	5.71
Al K	ED	88.92	90.13
Si K	ED	1.03	1.00
Ti K	ED	1.92	1.10
Cu K	ED	4.78	2.06
Total		100.00	100.00

(c)

Gambar 4 Hasil EDS komposit *thixoforming* dengan fraksi volume 10 % Al_2O_3 pada daerah : (a) 1, (b) 2, (c) 3



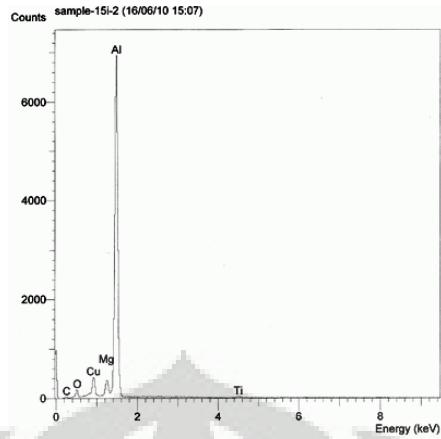
Gambar 5. Hasil SEM ingot komposit dengan fraksi volume 15 % Al₂O₃



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	51.19	63.88
Al K	ED	48.81	36.12
Total		100.00	100.00

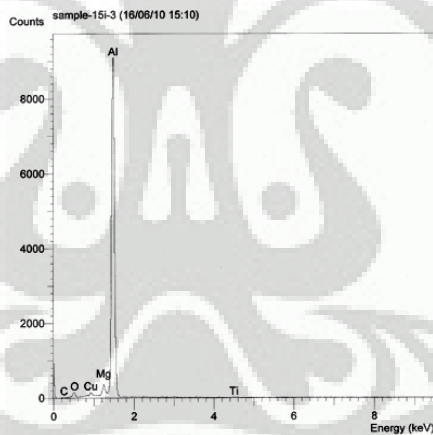
(a)



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
 Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	1.33	2.94
O K	ED	2.69	4.49
Mg K	ED	0.27	0.29
Al K	ED	91.39	90.33
Ti K	ED	0.98	0.54
Cu K	ED	3.35	1.41
Total		100.00	100.00

(b)

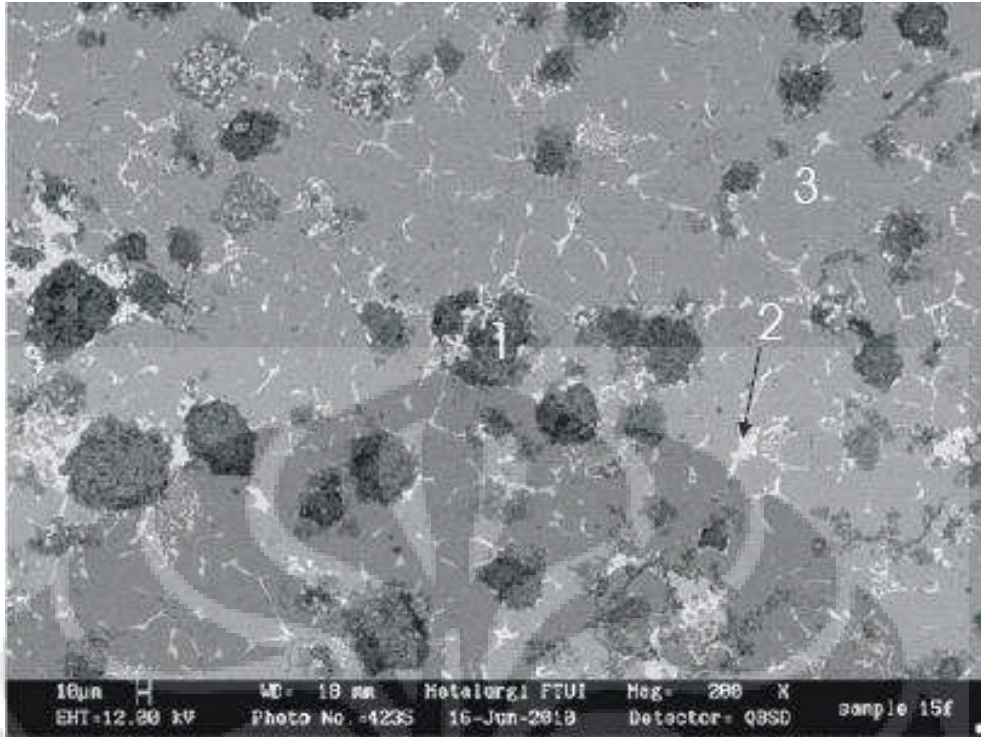


Quantitative method : ZAF (2 iterations).
 Analyzed all elements and normalized results.

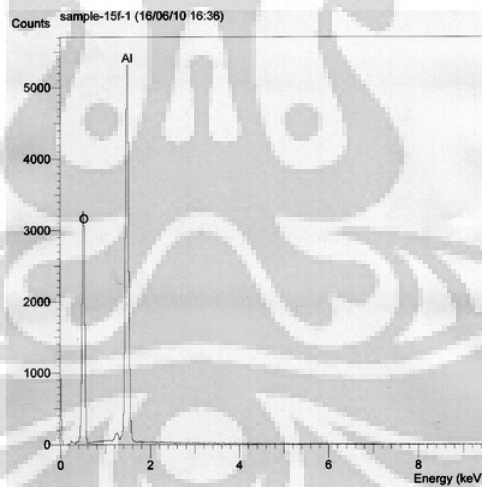
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	1.83	4.02
O K	ED	3.65	6.02
Mg K	ED	1.65	1.80
Al K	ED	87.66	85.79
Ti K	ED	1.53	0.85
Cu K	ED	3.67	1.53
Total		100.00	100.00

(c)

Gambar 5. Hasil EDS ingot komposit dengan fraksi volume 15 % Al₂O₃ pada daerah : (a) 1, (b) 2, (c) 3



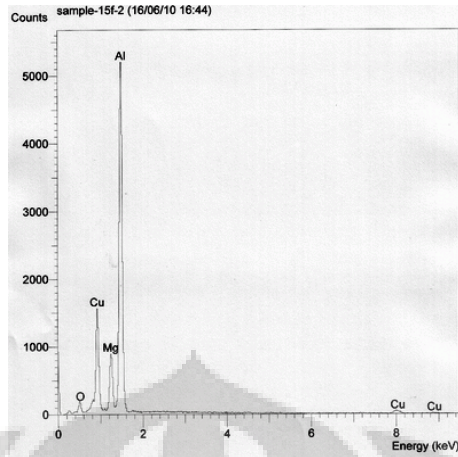
Gambar 6. Hasil SEM komposit *thixoforming* dengan fraksi volume 15 % Al_2O_3



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	48.39	61.26
Al K	ED	51.61	38.74
Total		100.00	100.00

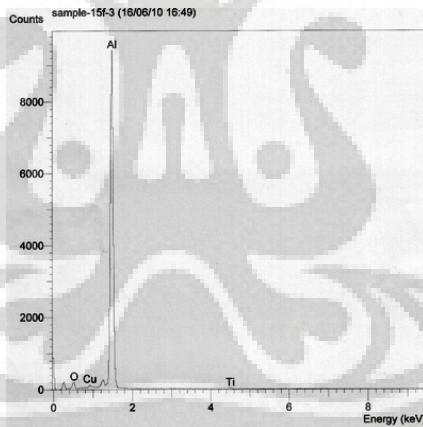
(a)



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	2.20	4.61
Mg K	ED	7.07	9.74
Al K	ED	52.98	65.76
Cu K	ED	37.75	19.89
Total		100.00	100.00

(b)

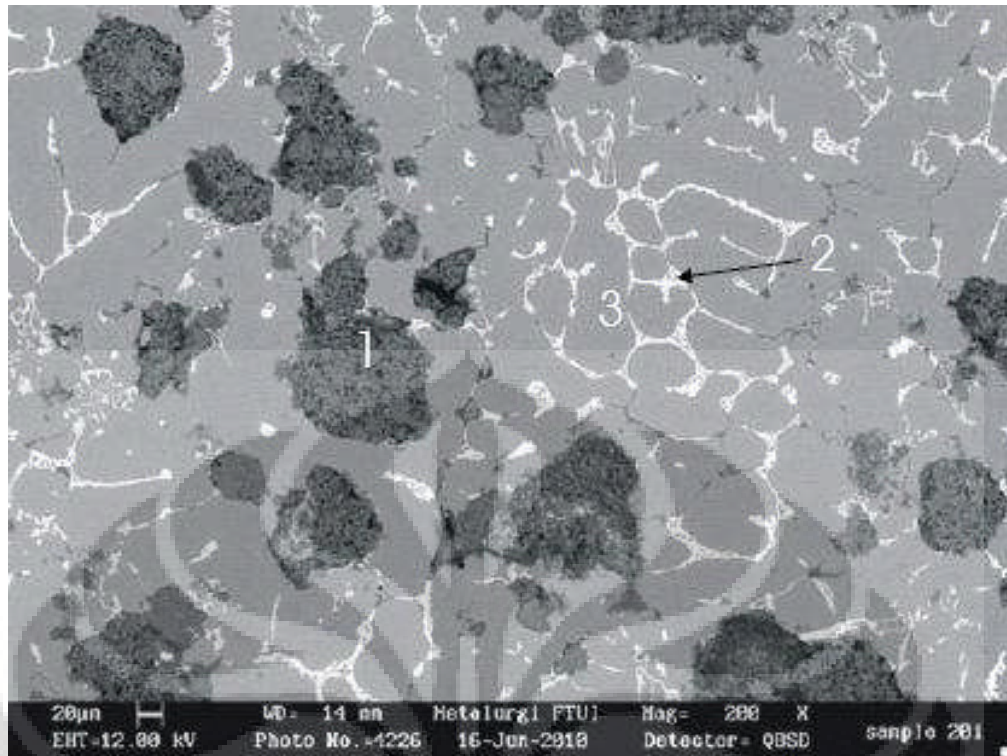


Quantitative method : ZAF (2 iterations).
Analyzed all elements and normalized results.

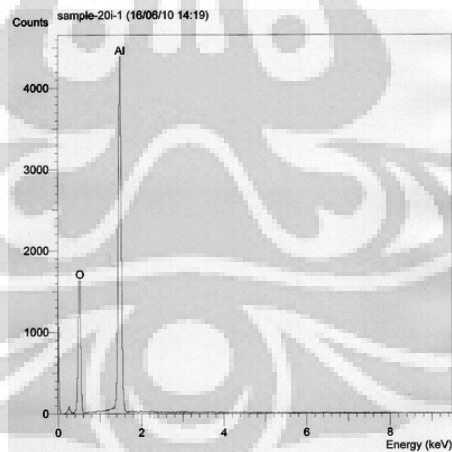
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	4.88	8.17
Al K	ED	90.04	89.42
Ti K	ED	1.90	1.06
Cu K	ED	3.18	1.34
Total		100.00	100.00

(c)

Gambar 6. Hasil EDS komposit *thixoforming* dengan fraksi volume 15 % Al_2O_3 pada daerah : (a) 1, (b) 2, (c) 3



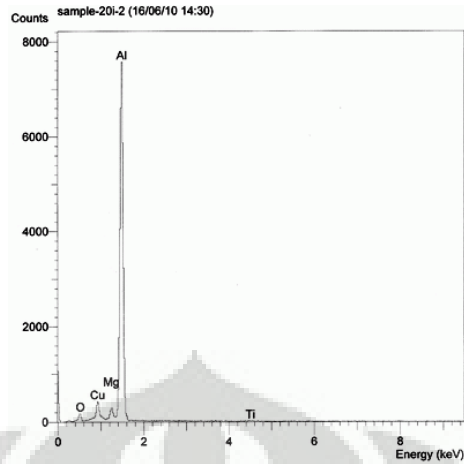
Gambar 7. Hasil SEM ingot komposit dengan fraksi volume 20 % Al₂O₃



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
 Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	40.32	53.26
Al K	ED	59.68	46.74
Total		100.00	100.00

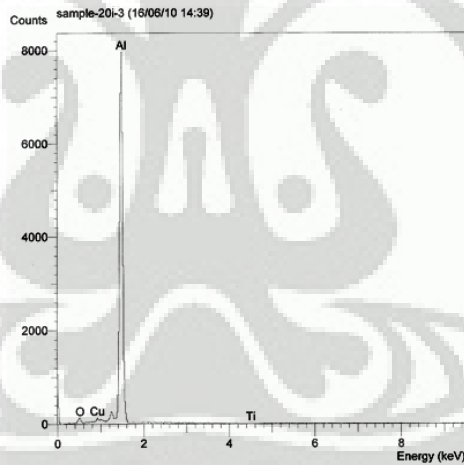
(a)



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	3.80	6.63
Mg K	ED	0.40	0.46
Al K	ED	85.10	88.08
Ti K	ED	0.93	0.54
Cu K	ED	9.77	4.29
Total		100.00	100.00

(b)

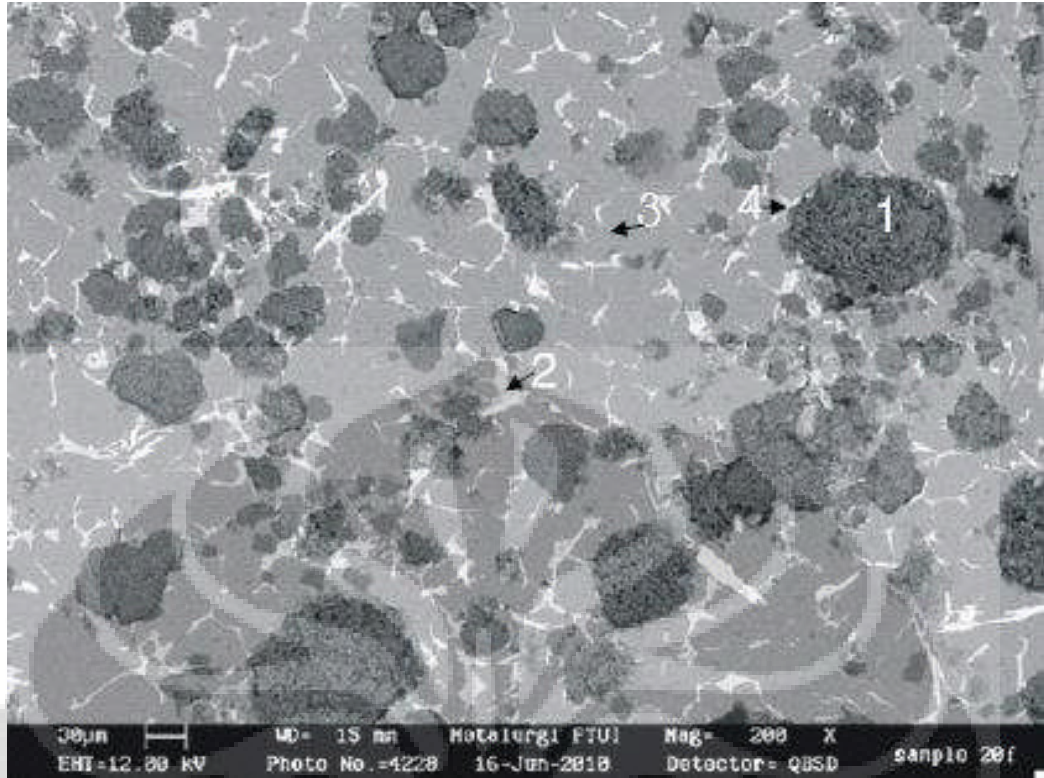


Quantitative method : ZAF (2 iterations).
Analyzed all elements and normalized results.

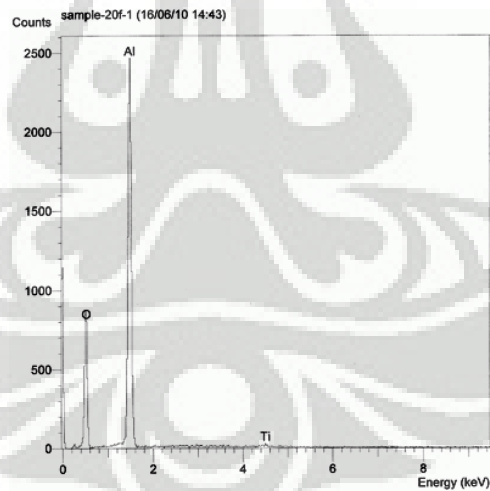
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	3.07	5.25
Al K	ED	90.28	91.66
Ti K	ED	1.60	0.92
Cu K	ED	5.05	2.18
Total	ED	100.00	100.00

(c)

Gambar 7. Hasil EDS ingot komposit dengan fraksi volume 20 % Al_2O_3 pada daerah : (a) 1, (b) 2, (c) 3



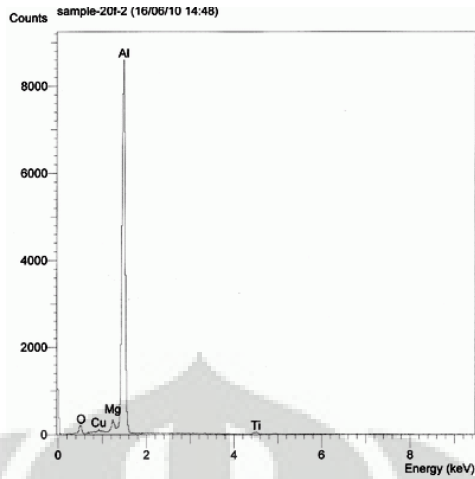
Gambar 8. Hasil SEM komposit *thixoforming* dengan fraksi volume 20 % Al_2O_3



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	38.16	51.35
Al K	ED	59.88	47.78
Ti K	ED	1.98	0.88
Total		100.00	100.00

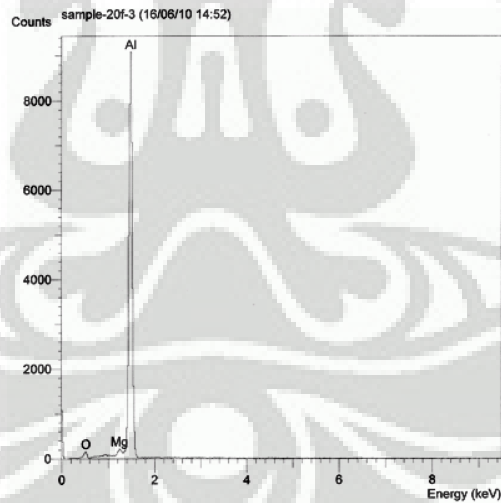
(a)



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
 Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	4.82	8.13
Mg K	ED	0.11	0.12
Al K	ED	88.33	88.40
Ti K	ED	3.45	1.95
Cu K	ED	3.29	1.40
Total		100.00	100.00

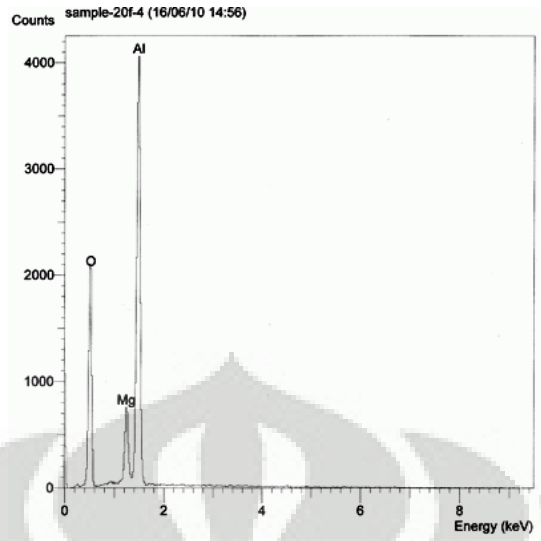
(b)



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
 Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	3.95	6.49
Mg K	ED	0.75	0.81
Al K	ED	95.29	92.70
Total		100.00	100.00

(c)



Quantitative method : ZAF (2 iterations).
 Analyzed all elements and normalized results.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	41.41	54.05
Mg K	ED	7.12	6.12
Al K	ED	51.47	39.83
Total		100.00	100.00

(d)

Gambar 8. Hasil EDS komposit *thixoforming* dengan fraksi volume 20 pada daerah : (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4

Lampiran 2

Data Uji Kekerasan

Tabel Kekerasan ingot komposit as cast

Pengulangan HRB	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	48.76	62.72	75.70	67.39	78.10
2	48.54	59.09	65.81	59.46	74.86
3	57.64	61.60	63.94	57.78	68.85
Jumlah(Σ)	154.94	183.41	205.45	184.64	221.81
Rata -rata	51.65	61.14	68.48	61.55	73.94
Standart deviasi	5.19	1.86	6.32	5.13	4.69

Tabel Kekerasan hasil thixoforming tanpa perlakuan panas

Pengulangan HRB	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	59.46	69.50	76.78	73.01	80.49
2	56.59	72.30	74.44	72.60	84.86
3	61.14	69.97	78.21	68.39	79.91
Jumlah(Σ)	177.19	211.78	229.42	214.00	245.26
Rata -rata	59.06	70.59	76.47	71.33	81.75
Standart deviasi	2.30	1.50	1.90	2.56	2.70

Tabel Kekerasan hasil thixoforming setelah T6 dan Aging 16 jam

Pengulangan HRB	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	66.51	78.66	82.51	73.62	86.39
2	69.50	75.91	80.61	74.75	101.58
3	70.93	86.65	91.52	71.32	99.32
Jumlah(Σ)	206.94	241.22	254.64	219.69	287.29
Rata -rata	68.98	80.41	84.88	73.23	95.76
Standart deviasi	2.26	5.58	5.83	1.75	8.20

Tabel Kekerasan hasil thixoforming setelah T6 dan Aging 28 jam

Pengulangan HRB	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	89.44	87.04	86.39	77.65	89.72
2	83.12	86.91	90.96	68.76	95.75
3	79.68	94.26	99.64	78.10	90.54
Jumlah(Σ)	252.24	268.21	276.99	224.51	276.02
Rata -rata	84.08	89.40	92.33	74.84	92.01
Standart deviasi	4.95	4.21	6.73	5.27	3.27



Lampiran 3

Data Uji Keausan

Tabel 3.A Data Pengujian Aus Komposit As Cast

Pengulangan Lebar celah	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	5.355	3.895	3.516	3.519	3.684
2	5.174	4.082	3.516	3.217	3.699
3	5.253	3.927	3.544	3.299	3.78
Jumlah(Σ)	15.782	11.904	10.576	10.035	11.163
Rata -rata	5.260667	3.968	3.525333	3.345	3.721
Standart deviasi	0.090743	0.100015	0.016166	0.156167	0.051643

Pengulangan Volume Abrasiv	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	2.560	0.985	0.725	0.727	0.834
2	2.309	1.134	0.725	0.555	0.844
3	2.417	1.010	0.742	0.599	0.900
Jumlah(Σ)	7.286	3.129	2.191	1.880	2.578
Rata -rata	2.429	1.043	0.730	0.627	0.859
Standart deviasi	0.126	0.080	0.010	0.089	0.036

Pengulangan Laju Aus	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	1.28E-02	4.93E-03	3.62E-03	3.63E-03	4.17E-03
2	1.15E-02	5.67E-03	3.62E-03	2.78E-03	4.22E-03
3	1.21E-02	5.05E-03	3.71E-03	2.99E-03	4.50E-03
Jumlah(Σ)	3.64E-02	1.56E-02	1.10E-02	9.40E-03	1.29E-02
Rata -rata	1.21E-02	5.21E-03	3.65E-03	3.13E-03	4.30E-03
Standart deviasi	6.29E-04	3.99E-04	5.04E-05	4.46E-04	1.80E-04

Tabel 3.B Data Pengujian Aus Komposisi Hasil Thixoforming Tanpa Perlakuan Panas

Pengulangan Lebar celah	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	4.842	3.791	3.449	3.246	2.654
2	4.377	3.774	3.398	3.031	2.83
3	4.766	3.609	3.44	3.271	2.51
Jumlah(Σ)	13.985	11.174	10.287	9.548	7.994
Rata -rata	4.661667	3.724667	3.429	3.182667	2.664667
Standart deviasi	0.24944	0.10053	0.027221	0.131941	0.160266

Pengulangan Volume Abrasiv	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	1.893	0.908	0.684	0.570	0.312
2	1.398	0.896	0.654	0.464	0.378
3	1.805	0.784	0.679	0.583	0.264
Jumlah(Σ)	5.096	2.588	2.017	1.618	0.953
Rata -rata	1.699	0.863	0.672	0.539	0.318
Standart deviasi	0.264	0.069	0.016	0.065	0.057

Pengulangan Laju Aus	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	9.46E-03	4.54E-03	3.42E-03	2.85E-03	1.56E-03
2	6.99E-03	4.48E-03	3.27E-03	2.32E-03	1.89E-03
3	9.02E-03	3.92E-03	3.39E-03	2.92E-03	1.32E-03
Jumlah(Σ)	2.55E-02	1.29E-02	1.01E-02	8.09E-03	4.77E-03
Rata -rata	8.49E-03	4.31E-03	3.36E-03	2.70E-03	1.59E-03
Standart deviasi	1.32E-03	3.44E-04	7.97E-05	3.27E-04	2.87E-04

Tabel 3.C Data Pengujian Aus Komposit Hasil Thixoforming dan T6 Aging 16 jam

Pengulangan Lebar celah	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	4.285	3.647	3.089	3.173	2.338
2	4.179	3.637	3.1	2.88	2.673
3	4.503	3.728	3.238	3.191	2.563
Jumlah(Σ)	12.967	11.012	9.427	9.244	7.574
Rata -rata	4.322333	3.670667	3.142333	3.081333	2.524667
Standart deviasi	0.165195	0.049903	0.083032	0.174592	0.170758

Pengulangan Volume Abrasiv	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	1.312	0.809	0.491	0.533	0.213
2	1.217	0.802	0.497	0.398	0.318
3	1.522	0.864	0.566	0.542	0.281
Jumlah(Σ)	4.051	2.475	1.554	1.473	0.812
Rata -rata	1.350	0.825	0.518	0.491	0.271
Standart deviasi	0.156	0.034	0.042	0.080	0.053

Pengulangan Laju Aus	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	6.56E-03	4.04E-03	2.46E-03	2.66E-03	1.07E-03
2	6.08E-03	4.01E-03	2.48E-03	1.99E-03	1.59E-03
3	7.61E-03	4.32E-03	2.83E-03	2.71E-03	1.40E-03
Jumlah(Σ)	2.03E-02	1.24E-02	7.77E-03	7.36E-03	4.06E-03
Rata -rata	6.75E-03	4.12E-03	2.59E-03	2.45E-03	1.35E-03
Standart deviasi	7.82E-04	1.69E-04	2.08E-04	4.02E-04	2.67E-04

Tabel 3.D Data Pengujian Aus Komposit Hasil Thixoforming dan T6 Aging 28 jam

Pengulangan Lebar celah	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	3.676	3.504	3.063	3.139	3.170
2	4.257	3.259	2.938	3.032	3.270
3	4.686	3.058	3.089	3.092	3.195
Jumlah(Σ)	12.619	9.821	9.090	9.263	9.635
Rata -rata	4.206	3.274	3.030	3.088	3.212
Standart deviasi	0.507	0.223	0.081	0.054	0.052

Pengulangan Volume Abrasiv	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	0.828	0.717	0.479	0.516	0.531
2	1.286	0.577	0.423	0.465	0.583
3	1.716	0.477	0.491	0.493	0.544
Jumlah(Σ)	3.830	1.771	1.393	1.473	1.658
Rata -rata	1.277	0.590	0.464	0.491	0.553
Standart deviasi	0.444	0.121	0.037	0.026	0.027

Pengulangan Laju Aus	Fraksi Volume Alumina				
	0	5	10	15	20
1	4.14E-03	3.59E-03	2.40E-03	2.58E-03	2.66E-03
2	6.43E-03	2.89E-03	2.11E-03	2.32E-03	2.91E-03
3	8.58E-03	2.38E-03	2.46E-03	2.46E-03	2.72E-03
Jumlah(Σ)	1.91E-02	8.86E-03	6.97E-03	7.37E-03	8.29E-03
Rata -rata	6.38E-03	2.95E-03	2.32E-03	2.46E-03	2.76E-03
Standart deviasi	2.22E-03	6.04E-04	1.83E-04	1.28E-04	1.35E-04