



UNIVERSITAS TRISAKTI

**SIFAT TERMAL PADUAN LOGAM AMORF $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_5\text{Al}_{10}$
THERMAL PROPERTIES OF $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_5\text{Al}_{10}$ AMORPHOUS METAL ALLOYS**

TESIS

**MUZAIYIN ARIKA PUTRA
161011810004**

**FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
JAKARTA
2023**



UNIVERSITAS TRISAKTI

SIFAT TERMAL PADUAN LOGAM AMORF $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_5\text{Al}_{10}$
THERMAL PROPERTIES OF $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_5\text{Al}_{10}$ AMORPHOUS METAL
ALLOYS

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik

MUZAIYIN ARIKA PUTRA
161011810004

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
JAKARTA
2023

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Muzaiyin Arika Putra

NIM 161011810004

Tanda Tangan : 

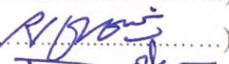
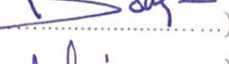
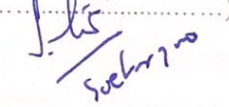
Tanggal : 11 Februari 2023

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Muzaiyin Arika Putra
NIM : 161011810004
Program Studi : Magister Teknik Mesin
Judul Skripsi/Tesis : Sifat Termal Paduan Logam Amorf
Zr55Cu30Ni5Al10

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Daisman Purnomo Bayyu Aji, ST ()
Penguji : Dr. Ir. Triyono, MS ()
Penguji : Dr. Ir. Doddy Prayitno, M.Eng ()
Penguji : Dr. Ir. Soeharsono, M.Sc ()

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : 11 Februari 2023

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat rahmat dan karunia Nya, penulis mampu menyelesaikan tugas akhir tesis yang berjudul “Sifat Termal Paduan Logam Amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_{15}Al_{10}$ ”. Penulisan tesis ini sebagai syarat untuk mendapatkan gelar Magister Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti.

Dalam penyusunan dan penulisan tesis ini, saya menyadari tanpa bantuan dari berbagai pihak, sangatlah sulit untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan banyak terima kasih kepada :

- (1) Dr. Annisa Bhikuning, ST, M.Eng, selaku Ketua Prodi Magister Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti;
- (2) Dr. Daisman Purnomo Bayyu Aji, ST, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan dalam penyusunan Tesis ini;
- (3) Pihak staf laboratorium Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi ITB Bandung yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang diperlukan;
- (4) Istri (Alifia), orangtua, dan keluarga yang selalu memberikan dukungan.
- (5) Nizar Saputra, Nanda Haryadi, Samsul Bahri, Wicaksono Achmad Waled, Saiful, Masrul, Citra Panca, Dian, Raus, Eka,
- (6) Seluruh pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya berharap semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas segala kebaikan dari semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan dan penulisan tesis ini. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Jakarta, 11 Februari 2023

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Muzaiyin Arika Putra

NIM : 161011810004

Program Studi : Magister Teknik Mesin

Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Jenis Karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Trisakti **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Sifat Termal Paduan Logam Amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_{15}Al_{10}$

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Trisakti berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan 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 Jakarta

Pada Tanggal 11 Februari 2023

Yang Menyatakan



(Muzaiyin Arika Putra)

ABSTRAK

Nama : Muzaiyin Arika Putra
Program Studi : Magister Teknik Mesin
Judul : Sifat Termal Paduan Logam Amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$

Dengan berkembangnya teknologi saat ini, semakin banyak bahan sedang dikembangkan terutama terkait dengan struktur nano. Logam amorf merupakan logam unggulan yang sedang dikembangkan diberbagai bidang seperti peralatan olahraga, elektronik sehingga sangat penting untuk dikembangkan. Dalam penelitian ini, logam amorf dengan komposisi $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ (at%) akan dilakukan studi kristalisasi. Spesimen untuk studi kristalisasi akan dibuat dengan menggunakan Induction Melter dan Arc Melter. Kemudian, pengujian dievaluasi dengan menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM)/Energy Dispersive Spectrometry (EDS), DSC untuk fase-fase kristalin yang terbentuk pada proses kristalisasi. Hasil dari penelitian ini akan diperoleh informasi untuk mengaplikasikan logam amorf ini.

Kata kunci: *Amorphous Alloy, Phase Transformation, SEM,, EDS, DSC*

ABSTRACT

Name : Muzaiyin Arika Putra
Study Program : Master Mechanical Engineering
Title : *Thermal Properties of $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ Amorphous Metal Alloys*

The development of current technology, more and more materials are being developed especially related to nanostructures. Amorphous metals are superior metals that are being developed in various fields such as sports equipment, electronics, so they are very important to develop. In this research, amorphous metal with composition $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ (at%) will be studied for crystallization. Specimens for crystallization studies will be made using Induction Melter and Arc Melter. Then, the tests were evaluated using X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM)/Energy Dispersive Spectrometry (EDS) and for the crystalline phases formed in the crystallization process. The results of this study will provide information for applying this amorphous metal.

Key words: *Amorphous Alloy, Phase Transformation, SEM, EDS, DSC*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
2. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kristal dan Amorf	5
1.2 Logam Amorf.....	6
1.3 Metode Water Quenching	7
1.4 Metode Melt Spinning	8
2.5 Metode Pressure Die Casting.....	9
2.6 Proses Peleburan Logam.....	10
2.7 Karakterisasi Material.....	10
2.7.1 Analisis X-Ray Diffraction (XRD).....	11
2.7.2 Analisis Scanning Electron Microscopy (SEM)/ EDS	13
3. METODE PENELITIAN.....	18
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	18
3.2 Diagram Alir Penelitian.....	18

3.3	Bahan dan Alat	19
3.4	Tahap Persiapan Bahan dan Alat	19
3.5	Eksperimental.....	20
4.	PEMBAHASAN.....	22
4.1	Hasil SEM/EDS	23
4.2	DSC	26
5.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	31
5.1	Kesimpulan	31
5.2	Saran	31
	DAFTAR PUSTAKA.....	32

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Stable Metastable [1].	7
Gambar 2.2	Melt Spinning [11]	9
Gambar 2.3	Proses Pressure Die Casting [12]	10
Gambar 2.4	X-Ray Diffraction [14]	13
Gambar 2.5	Skema dasar SEM [13]	14
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.	18
Gambar 3.2	Kurva Pemanasan Sampel Untuk Zr_{55} Dengan Cu_{30} Di Dalam Al_{10} Paduan Amorf.	21
Gambar 4.1	Spesimen paduan amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$.	22
Gambar 4.2	SEM Permukaan Paduan Amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ Sebelum tanpa perlakuan panas	23
Gambar 4.3	SEM Permukaan Paduan Amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ Setelah Perlakuan Panas.	23
Gambar 4.4	Pengujian EDS Paduan Amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ Sebelum tanpa perlakuan panas	24
Gambar 4.5	Pengujian EDS Paduan Amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ Sebelum tanpa perlakuan panas	25
Gambar 4.6	DSC Heating Curve Of As – Cast $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ Amorphous Alloy at 20 K/min Rate.	26
Gambar 4.7	Kurva Eksotermis Selama Kristalisasi Isotermal Pada Suhu Kristalisasi 730, 735, 740, 745, 750 K	26
Gambar 4.8	Kurva Fraksi Volume Mengkristal Selama Kristalisasi Isotermal Pada Suhu Kristalisasi 730, 735, 740, 745, 750 K,	28
Gambar 4.9	Persamaan KJMA Cocok Untuk Kristalisasi Isotermal Zr_{55} Dengan Cu_{30} di dalam Al_{10} untuk T_c dari 750 K.	30

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Eksponen Avrami Dan Energi Aktivasi Untuk Kinetika Kristalisasi Isothermal	29
--	----

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sepanjang sejarah perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi manusia, munculnya teknologi baru selalu dibarengi dengan penemuan dan peningkatan material baru. Dari tulang kuno, batu, porselen, dan bahan logam hingga plastik, paduan, bahan mikro, dan bahan nano berkinerja tinggi terbaru yang masih dalam pengembangan. Dibandingkan dengan bahan kristal konvensional di mana unit dasarnya disusun secara berkala, bahan amorf menunjukkan struktur tidak teratur jarak pendek dan jarak jauh. Tidak seperti rekan kristal mereka, bahan amorf menunjukkan homogenitas makroskopis dan isotropi karena bahan amorf tidak memiliki batas butir, cacat kristal, segregasi, dan anisotropi. . Misalnya, paduan amorf memiliki struktur tidak teratur unik yang mirip dengan kaca. Karena mereka berbagi sifat logam dan kaca, mereka memiliki sifat fisik, kimia, dan mekanik yang unik. Dalam hal kekuatan mekanik, paduan amorf memiliki kekuatan tinggi, kekerasan tinggi, ketahanan aus yang tinggi, ketahanan korosi yang tinggi, ketahanan lelah yang tinggi, modulus elastisitas yang rendah, dan batas regangan elastis yang besar, dan memiliki aplikasi potensial yang luas dalam rekayasa. Selain sifat mekaniknya, bahan amorf telah menarik banyak perhatian karena intinya yang sangat tidak jenuh di permukaannya dan situs katalitiknya yang seragam di lingkungan kimia dan strukturalnya, membuatnya praktis serta katalis model. Ini juga merupakan katalis yang kuat [1].

Selain itu, munculnya nanomaterial adalah salah satu perkembangan terpenting di bidang material sejak akhir abad ke-20. Nanomaterial mewakili kelas baru material fungsional di mana setidaknya satu dimensi material telah direduksi menjadi skala nano. Bahan amorf berskala nano secara bertahap menarik perhatian publik dalam beberapa tahun terakhir, dan telah menunjukkan kinerja superior yang setara atau lebih baik daripada bahan nanokristalin di berbagai bidang seperti katalisis, penyimpanan energi elektrokimia, dan teknik mesin [1], aerospace, elektronik dan industri sebagai bahan lunak yang magnetis di inti transformator dan sensor sensitivitas tinggi, katalis, dan bahan konstruksi tahan korosi.

Amorf lelehan didasarkan pada pendinginan pada suhu yang relatif tingkat tinggi untuk mencegah terjadinya proses kristalisasi. Transisi gelas berlangsung cukup mudah dalam beberapa kelompok bahan non-logam yang terkenal (silikat, polimer, oksida). Logam mencair tidak memiliki ikatan terarah, dicirikan oleh tingginya tingkat penyusunan ulang atom pada tingkat pendinginan tinggi di bawah kesetimbangan suhu transisi gelas T_g [2].

Meskipun banyak penelitian telah mengkonfirmasi potensi aplikasi yang luas dari bahan nano amorf sebagai bahan yang muncul di banyak bidang, pengembangannya masih dalam tahap awal dan banyak masalah ilmiah dan teknis yang harus diselesaikan. Misalnya, bahan amorf secara luas diyakini menunjukkan keteraturan medan dekat, tetapi bentuk susunan atomnya belum ditentukan secara tepat, bahkan dengan kemajuan terbaru dalam teknik mikroskop elektron. Selain itu, struktur internal bahan amorf tidak teratur dalam jarak jauh, sehingga sulit untuk mengontrol mode pertumbuhan dan mendapatkan struktur spesifik dengan morfologi yang teratur. Proses fabrikasi tunggal hanya dapat menghasilkan bahan nano amorf dengan struktur spesifik, yang jauh dari memuaskan penelitian tentang kontrol daya bahan amorf. Selain itu, ketidakteraturan atom bahan amorf menimbulkan banyak pusat ketidakjenuhan. Secara teori, situs aktif yang melimpah ini harus menunjukkan kinerja katalitik yang jauh lebih tinggi daripada bahan nanokristalin, tetapi belum ada penelitian yang dilakukan [1].

Logam amorf dapat dibuat dengan beberapa metode seperti melt spinning, water quenching, Cu-mold casting, pressure die casting, atau centrifugal casting [3,4,5]. Beberapa logam amorf yang telah diaplikasikan secara komersial adalah logam amorf $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Ni_{10}Cu_{12.5}Be_{22.5}$ [6,7] yang digunakan sebagai material pada golf club, baseball bat, dan raket tenis. Logam amorf sangat baik digunakan pada peralatan olahraga ini karena memiliki damping capacity yang rendah. Logam amorf berbasis Fe [8]. Pada abad ke-21 ini, logam dan paduannya adalah salah satu kelas material yang sangat penting digunakan di berbagai bidang secara luas, seperti material struktur, fungsional dan material biomedikal, yang sangat esensial dalam kehidupan manusia. Untuk material logam 10 berukuran bulk yang dapat digunakan dalam bentuk tiga dimensi, hanya paduan logam kristal yang telah digunakan oleh manusia sejak ribuan tahun yang lalu hingga pertengahan

tahun 1990-an. Sebelum tahun 1990, belum ada data tentang pembentukan paduan logam amorf dalam ukuran bulk dengan ukuran kritis di atas beberapa millimeter dengan Cu-mold casting, di mana metode ini sangat populer sebagai metode praktis untuk produksi massal [9]. logam amorf tidak stabil dibawah suhu glass transisi sehingga mudah terjadi kristal dan apabila sudah terjadi kristal akan berubah sifatnya. Pada penelitian sebelumnya sudah dilakukan penelitian tentang pembuatan paduan logam amorf berbasis Zr maka langkah selanjutnya akan mengkarakterisasi kristal dari logam tersebut. logam amorf tidak stabil dibawah suhu glass transisi sehingga mudah terjadi kristal dan apabila sudah terjadi kristal akan berubah sifatnya.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian tugas akhir ini yaitu logam amorf tidak stabil dibawah suhu glass transisi sehingga mudah terjadi kristal dan apabila sudah terjadi kristal akan berubah sifatnya.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah mengkarakterisasi kristal dari paduan logam berbasis ZR dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)/ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)*, *DSC* sehingga karakteristik paduan logam amorf yang dibuat dapat diperoleh.

1.4 Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini, manfaat yang diperoleh yaitu mendapatkan karakteristik dari sifat logam amorf dengan berbagai *holding time*.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penulisan tesis ini yaitu penelitian ini hanya akan dibahas tentang metode water quenching dengan evaluasi *SEM/EDS*, *DSC* Menggunakan komposisi $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini dibagi menjadi 5 bab. Secara garis besar uraian masing-masing bab tersebut adalah:

BAB 1 : PENDAHULUAN

Berisikan latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penulisan, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB 2 : TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan penjelasan tentang Amorf, Kristal, *SEM*, *EDS*, *DSC*

BAB 3 : METODOLOGI PENELITIAN

Berisikan tempat dan waktu penelitian, diagram alir penelitian, bahan dan alat, perancangan dan analisis.

BAB 4 : PEMBAHASAN

Berisikan hasil analisis teoritis, analisis dan perbandingan hasil kalibrasi teoritis dengan eksperimental.

BAB 5 : KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari pembuatan, dan pengujian .

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kristal dan Amorf

Kristal adalah suatu padatan yang atom, molekul, atau ion penyusunnya terkemas secara teratur dan polanya berulang melebar secara tiga dimensi. Secara umum, zat cair membentuk kristal ketika mengalami proses pemadatan. Pada kondisi ideal, hasilnya bisa berupa kristal tunggal, yang semua atom-atom dalam padatannya "terpasang" pada kisi atau struktur kristal yang sama, tapi, secara umum, kebanyakan kristal terbentuk secara simultan sehingga menghasilkan padatan polikristalin atau polimorf.[1]

Struktur atom amorf hampir sama atau menyerupai pola struktur atom pada kristal, namun terdapat perbedaan antara amorf dan kristal yaitu terdapat table di bawah ini [1] :

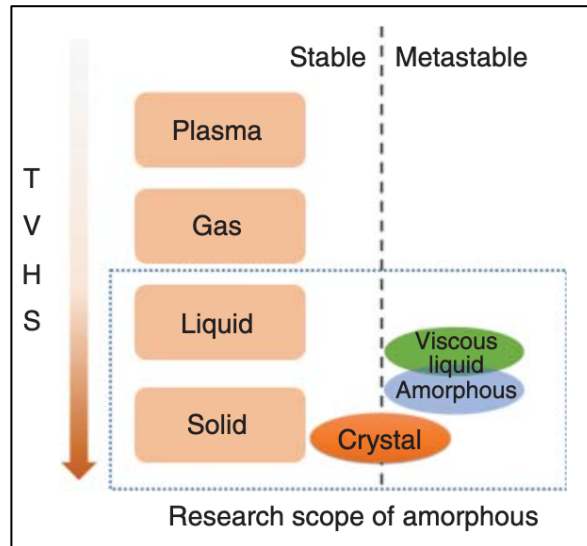
Tabel 2.1 Perbedaan antara Amorf dan Kristal

Keadaan kristal	Keadaan amorf
<i>Long-range atomic order</i> Translational symmetry (Orde atom jarak jauh Simetri translasi)	<i>Short-range atomic (topological and compositional) order, No translational symmetry.</i> (Urutan atomtopologi dan komposisi jarak pendek, Tidak ada simetri translasi)
<i>High values of elasticity moduli</i> Nilai modulus elastisitas yang tinggi	<i>Low values of elasticity moduli</i> Nilai moduli elastisitas rendah
<i>Structural anisotropy exists</i> Anisotropi struktural ada	<i>Absence of structural anisotropy</i> Tidak adanya anisotropi struktural
<i>Dislocation mode of plastic deformation</i> Modus dislokasi deformasi plastis	<i>Non-dislocation mode of plastic deformation</i> Mode deformasi plastis non-dislokasi
<i>Strain hardening</i> Pengerasan regangan	<i>No strain hardening</i> Tidak ada pengerasan regangan
<i>High thermodynamic stability</i> Stabilitas termodinamika tinggi	<i>Low thermodynamic stability</i> Stabilitas termodinamika rendah

2.2 Logam Amorf

Bahan amorf adalah kelas zat yang unit dasarnya tidak menunjukkan urutan spasial jarak jauh (*Long Range Order*) dan mempertahankan beberapa sifat terurut hanya pada skala poliatomik. Tidak seperti bahan kristal konvensional dengan unit elementer yang tersusun teratur, bahan amorf dicirikan oleh orde atom jarak pendek (<1 nm) dan jarak jauh (>1 nm) [1]. Dibandingkan dengan bahan kristal anisotropik, bahan amorf menunjukkan homogenitas makroskopik dan isotropi. Berdasarkan struktur internal ini, bahan amorf tidak memiliki cacat kristal seperti dislokasi, batas butir, Yang memberikan sifat mekanik yang sangat baik pada bahan amorf seperti kekuatan tinggi, kekerasan tinggi, ketahanan aus yang tinggi, dan ketahanan lelah yang tinggi. Pada saat yang sama, permukaan amorf menunjukkan situs atom yang sangat tidak jenuh atau ikatan yang menjuntai, membuatnya diinginkan sebagai model atau katalis praktis. Oleh karena itu, struktur permukaan yang tidak teratur dapat memberikan situs yang lebih aktif daripada bahan nano kristal konvensional, yang selanjutnya meningkatkan kinerja katalitik. Selain itu, susunan atom khusus dari struktur amorf dapat secara efektif mengatur keadaan elektronik material, mengoptimalkan transfer elektron atau ion dalam katalisis. Oleh karena itu, studi intensif bahan amorf memiliki implikasi penting untuk penyelidikan teoretis dan praktis bahan padat.[1]

Fisika modern mengklasifikasikan materi konvensional, dalam urutan agregasi, menjadi wujud padat, cair, gas, dan plasma (Gambar.1.2). dianggap sebagai bentuk dasar materi yang membentuk lingkungan kita. Selain tiga keadaan yang biasa kita kenali yaitu padat, cair, dan gas, keadaan plasma terdiri dari molekul gas setelah ionisasi (ionisasi termal, fotoionisasi, ionisasi tumbukan), yang perilakunya terutama bersifat ionik. dikendalikan oleh interaksi *Coulomb* antara ion, elektronik. Empat keadaan dasar stabil dalam kondisi tertentu, dan transformasi keadaan fisik dari satu keadaan ke keadaan lain disebabkan oleh perubahan keadaan termodinamika seperti suhu, volume, entalpi, dan entropi.



Gambar 2.1 *Stable Metastable* [1].

Untuk mensintesis atau membuat paduan logam amorf yang berukuran besar (bulk) telah dikembangkan beberapa teknik di berbagai laboratorium penelitian. Teknik pembuatan ini dilakukan di berbagai laboratorium penelitian. Beberapa teknik yang banyak dipergunakan dalam pembuatan paduan logam amorf antara lain *water quenching*, *melt spinning*, *pressure die casting*, dan *Cu-mold casting*.

1.2 Metode *Water Quenching*

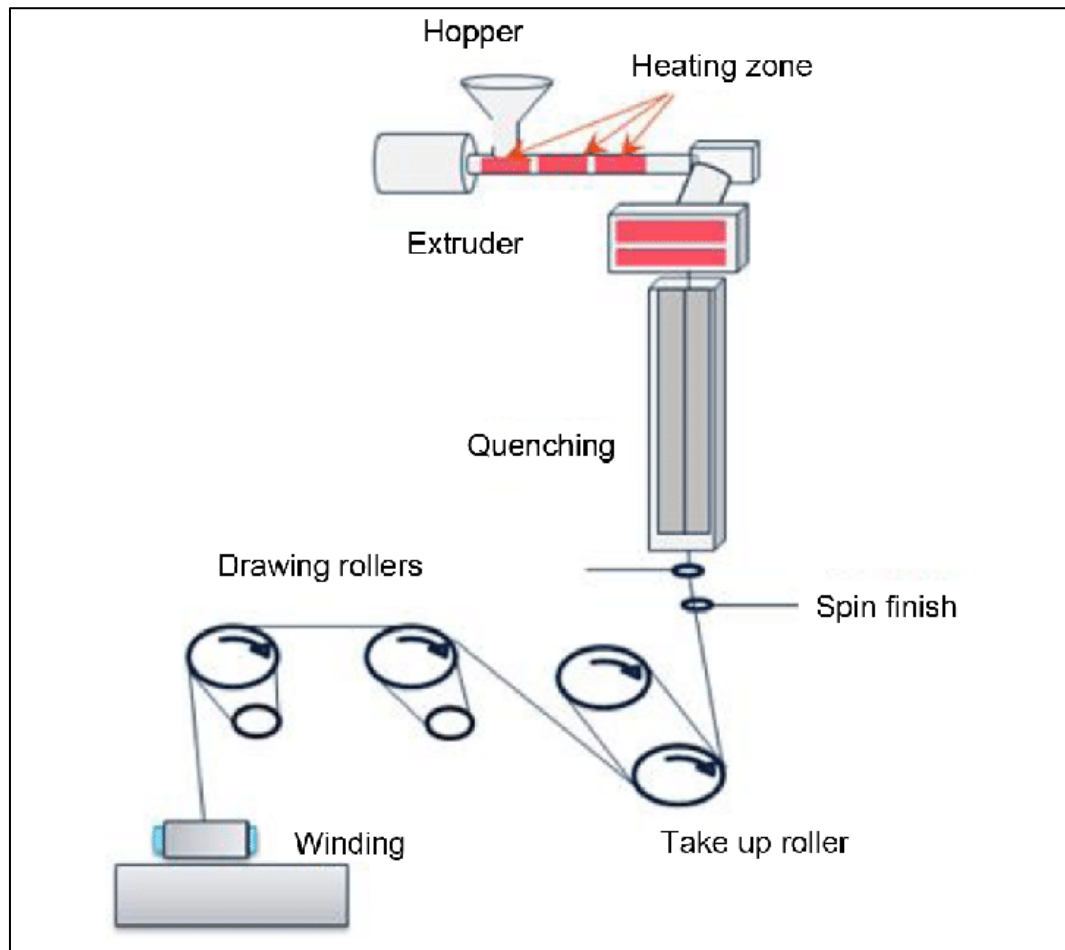
Metode *quenching* adalah proses pendinginan cepat pada benda kerja, dimana benda kerja dimasukkan ke dalam media air, oli atau air untuk mendapatkan sifat material yang diinginkan. Dengan adanya proses *quenching* dapat mengurangi jumlah butiran kristal dari suatu logam sehingga dapat meningkatkan nilai kekerasannya.

Logam amorf dapat terbentuk dari proses pendinginan yang sangat cepat, karena pendinginan yang sangat cepat dapat mencegah terbentuknya semua struktur dalam kristal. Pada proses pengerasan baja, spesimen baja dipanaskan sampai temperatur di daerah fasa austenit, ditahan pada temperatur tersebut selama waktu tertentu, kemudian spesimen dipindahkan secara cepat ke dalam media *quenching* (biasanya air) dan ditahan pada temperatur di bawah M_f (suhu akhir martensit). Media *quenching* dengan cepat menyerap panas dari sampel baja panas, mengubah fasa austenit menjadi martensit tanpa difusi (tanpa difusi).

Laju pendinginan yang dicapai dengan metode pendinginan air tergantung pada efisiensi perpindahan panas media pendinginan, ukuran spesimen dan karakteristik perpindahan panas spesimen. Tingkat pendinginan yang dicapai dengan metode ini adalah sekitar 10-100 K/s (di urutan 1 megakelvin per detik). Dimungkinkan untuk menghasilkan logam amorf dengan pendinginan air karena komposisi paduan logam amorf ukuran besar hanya memerlukan laju pendinginan kritis yang rendah untuk membentuk kaca.

1.3 Metode *Melt Spinning*

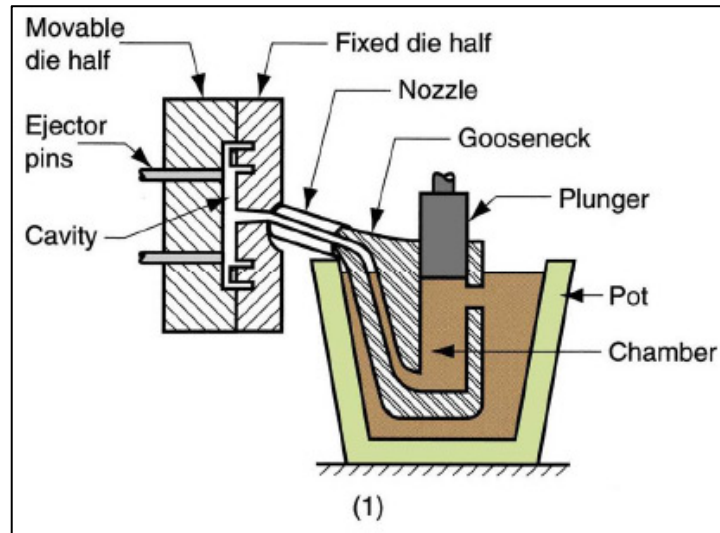
Metode *Melt Spinner* berguna untuk membuat fase metastabil sambil mendinginkan paduan cair. Fase amorf dapat dibentuk dengan memutar lelehan menjadi strip tipis pada satu gulungan dan kemudian memanaskannya pada suhu yang sesuai. Kinetika transformasi dan energi aktivasi yang berbeda dari transformasi fase metastabil memungkinkan jenis kristalisasi dikontrol. Metode peleburan digunakan untuk mendapatkan paduan amorf dalam bentuk lembaran tipis. Proses solidifikasi berlangsung pada roda putar yang menghasilkan paduan berupa lembaran tipis atau strip yang mudah lepas dari permukaan cetakan karena adanya perbedaan penyusutan panas [10].



Gambar 2.2 *Melt Spinning* [11]

2.5 Metode *Pressure Die Casting*

Metode cetak injeksi atau *injection moulding* adalah proses pengecoran logam yang dilakukan dengan cara memaksa dan menginjeksikan logam cair ke dalam cetakan. Ada dua metode untuk proses ini: metode ruang panas dan metode ruang dingin.



Gambar 2.3 Proses *Pressure Die Casting* [12]

2.6 Proses Peleburan Logam

Aspek terpenting dari industri pengecoran adalah tungku atau tungku peleburan logam. Dalam proses peleburan logam, semua bobot, elemen paduan dan bahan lainnya ditempatkan di tungku atau tungku, dan tungku atau tungku yang digunakan harus sesuai dengan bahan baku yang akan dilebur. Saat memilih kompor, Anda harus memperhatikan hal-hal berikut:

- a. Paduan atau material yang akan di cor.
- b. Temperatur lebur.
- c. Kapasitas tanur.
- d. Biaya operasi dan pemeliharaan.
- e. Polusi lingkungan.

2.7 Karakterisasi Material

Menentukan sifat struktural material, apakah padat atau terdispersi, kristal atau kaca, adalah salah satu bidang utama ilmu material. Karakterisasi material dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan 3 (dua) metode yaitu *scanning electron microscopy (SEM)/energy dispersive spectroscopy (EDS)* dan *DSC differential scanning calorimetry*.

2.7.1 Analisis X-Ray Diffraction (XRD)

XRD adalah alat yang digunakan untuk mengkarakterisasi struktur kristal, ukuran kristal dari bahan padat. Bahan apa pun yang mengandung kristal spesifik akan menunjukkan puncak spesifik saat dianalisis dengan *XRD*. Oleh karena itu, kelemahan dari alat ini adalah ketidakmampuannya dalam mengkarakterisasi material amorf. Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristal suatu bahan dengan menentukan parameter struktur kisi dan menentukan ukuran partikel. Bahan yang dianalisis ditumbuk halus dan dihomogenkan untuk menentukan komposisi total rata-rata [13].

Ketika sinar-X mengenai logam, adalah mungkin untuk menjelaskan peristiwa di mana sinar-X terjadi ketika sebuah elektron (yang datang) dari katoda menembus kulit atom dan mendekati kulit inti. Saat mendekati inti, elektron ditarik lebih dekat ke inti bermuatan positif, menyebabkan elektron berputar dalam lintasannya dan melambat atau melambat. Perlambatan ini menyebabkan energi elektron berkurang. Energi yang terbuang ini dilepaskan dalam bentuk sinar-X. Proses ini disebut proses *copy* rem. Ketika sebuah bahan terkena sinar-X, intensitas cahaya yang ditransmisikan lebih rendah dari intensitas cahaya datang. Hal ini disebabkan oleh penyerapan oleh materi serta hamburan oleh atom-atom materi. Beberapa sinar-X yang tersebar membatalkan satu sama lain karena berada di luar fase, dan beberapa meningkatkan satu sama lain karena berada dalam fase. Sinar-X yang saling memperkuat ini dikenal sebagai sinar difraksi. Difraksi sinar-X merupakan salah satu teknik karakterisasi material yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristal dari suatu material dengan menentukan parameter struktur kisinya untuk menentukan ukuran partikelnya. Difraktometer sinar-X digunakan untuk mengidentifikasi sampel kristal menggunakan radiasi elektromagnetik sinar-X. Hasil yang diperoleh disajikan sebagai intensitas relatif dan sudut hamburan. Hamburan sinar-X terjadi dari atom-atom yang membentuk bidang kisi sampel yang diamati. Eksperimen pertama pada Difraksi sinar-X dilakukan dalam pengaturan eksperimental pada tahun 1921 oleh Friedrich, Knipping, dan von Laue. Sinar-X yang tersebar membentuk pinggiran interferensi pada film fotografi untuk membentuk potret dan gambar. Eksperimen ini membuktikan bahwa sinar-X adalah kristal bergelombang, atau setidaknya bergelombang, yang atom-atomnya tersusun

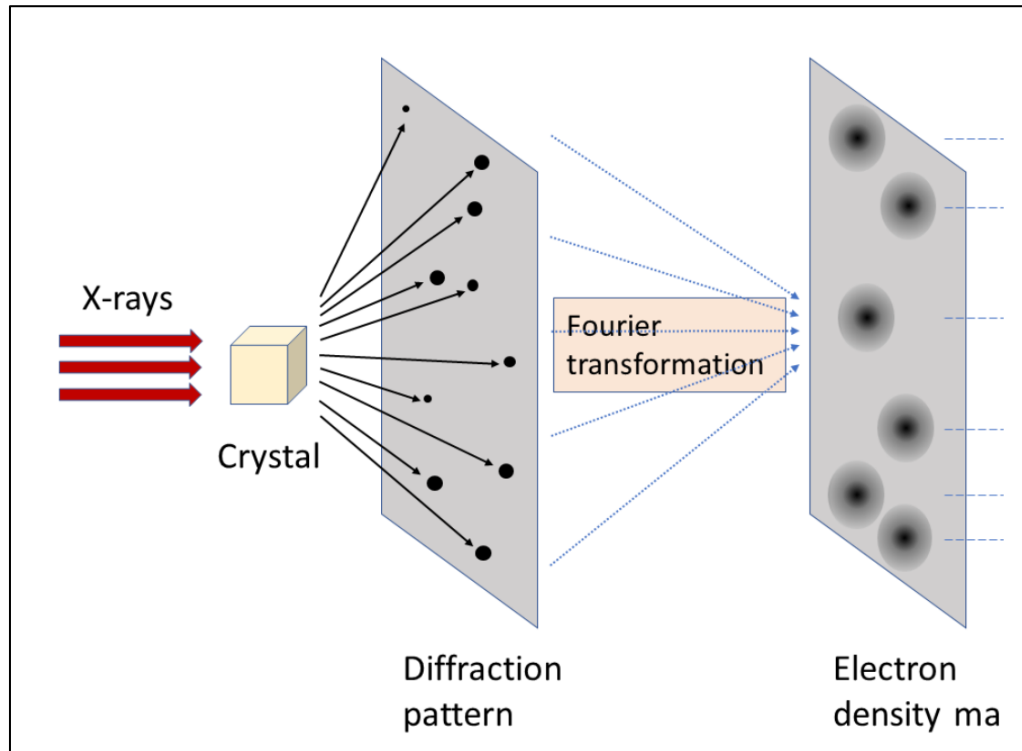
dalam urutan yang benar. Sejak saat itu, difraksi sinar-X telah terbukti menjadi alat penelitian yang sangat berharga untuk mengukur panjang gelombang sinar-X dan menentukan struktur kristal. Secara umum, *XRD* terdiri dari tiga bagian utama:

1. Kutub Anoda atau elektroda positif.
2. Kutub Katoda atau elektroda negative.
3. *Glass metal envelope (vacuum tube).*
4. *Filamen dan electron cloud.*
5. *Tungsten target.*
6. *Copper stem.*
7. *Cooling mechanism.*
8. *Diaphramg.*
9. *Porte filter.*

filter pelabuhan. Prinsip kerja dari *XRD* adalah untuk menghubungkan katoda ke kutub (-), menerapkan arus tegangan tinggi dan memanaskan anoda dengan filamen bulat atau kawat tungsten untuk melepaskan elektron selama produksi. sinar-X. Anoda juga dihubungkan dengan kutub (+) yang menghantarkan listrik. tinggi. Ini karena ada perbedaan potensial antara katoda dan anoda, dan elektron yang dipancarkan dari anoda bertabrakan dengan logam untuk menghasilkan sinar-X dengan daya tembus tinggi.

Sinar-X yang disinari pada sampel menyebarkan sinar-X dan ditangkap oleh detektor, yang memperoleh informasi grafik antara sudut hamburan (2θ) dan intensitas (I) seperti yang ditunjukkan pada gambar. 2.15.

Difraksi sinar-X adalah metode non-destruktif untuk menganalisis struktur bahan kristal atau semi kristal, tetapi juga dapat digunakan untuk mempelajari bahan amorf. Metode ini menggunakan sinar X-ray dengan panjang gelombang $\pm 1 \text{ \AA}$. Ketika sinar tersebar pada bahan dengan struktur molekul atom sebesar ini, interferensi terjadi, menciptakan pola dengan intensitas yang berbeda-beda.



Gambar 2. 4 X-Ray Diffraction [14]

Sinar datang (1,2,3) dengan panjang gelombang λ mengenai rangkaian atom yang membentuk pola teratur pada bidang hkl dengan jarak antar bidang dhkl akan menghasilkan sinar pantul (1',2',3'...) dengan intensitas yang diukur sebagai fungsi sudut pantul terhadap sudut datang (2θ). Interferensi konstruktif hanya dapat terjadi jika Hukum Bragg (1) dipenuhi.

Dengan transformasi Fourier, informasi intensitas fungsi 2θ dapat diubah kembali menjadi gambaran 3 dimensi kerapatan elektron dalam kristal yang merupakan informasi tentang grup ruang (*space group*), ukuran kristal (*lattice parameters*), posisi atom, serta strain.

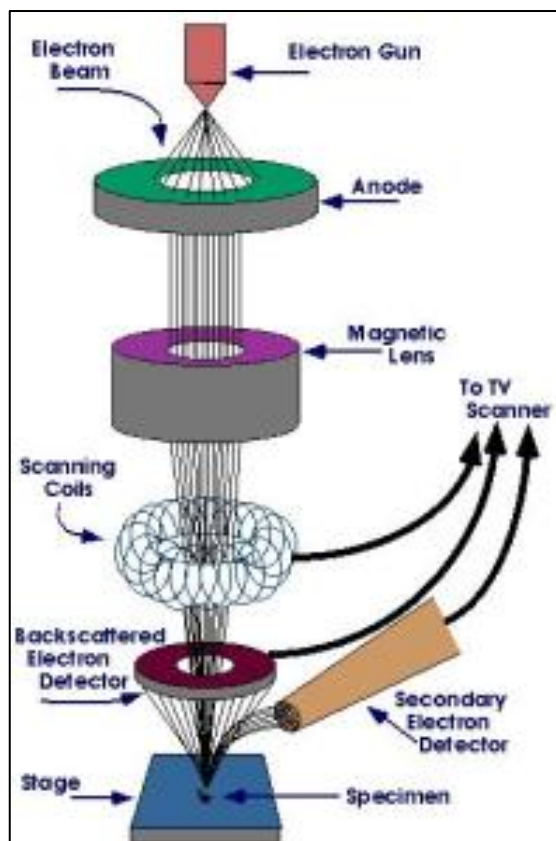
2.7.2 Analisis Scanning Electron Microscopy (SEM)/ EDS

2.7.2.1 Analisis Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) dapat digunakan untuk menentukan morfologi permukaan material. Karakterisasi material menggunakan SEM digunakan untuk melihat struktur topografi permukaan, ukuran butir, cacat struktur, dan komposisi pencemaran suatu material. Hasil yang diperoleh dari karakterisasi ini dapat dilihat langsung pada hasil SEM berupa Scanning Electron Micrograph

yang menampilkan bentuk tiga dimensi berupa gambar atau foto. Mikroskop ini digunakan untuk mempelajari struktur permukaan benda, yang umumnya diperbesar antara 1000-40000 kali. Hasil SEM berupa citra topografi mempresentasikan bentuk permukaan material dengan berbagai lekukan dan tonjolan [13].

Prinsip kerja peralatan ini adalah sumber elektron pada filamen tungsten memancarkan seberkas elektron. Ketika elektron ini berinteraksi dengan bahan (sampel), mereka menghasilkan elektron sekunder dan sinar-X karakteristik. Dengan menyesuaikan generator pemindai dan koil pemindai, permukaan material yang diinginkan dapat dipindai. Elektron sekunder yang dihasilkan dari interaksi antara elektron dengan permukaan sampel ditangkap oleh detektor elektron sekunder (SE), kemudian diproses dan diperkuat oleh amplifier, lalu divisualisasikan pada monitor sinar katoda (CRT). Skema dasar SEM ditunjukkan pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Skema dasar SEM [13]

Prinsip operasi SEM adalah menggambarkan permukaan suatu objek atau material menggunakan berkas elektron pantul berenergi tinggi. Permukaan suatu bahan yang disinari atau dipaparkan elektron yang memantulkan berkas elektron ke segala arah disebut berkas elektron sekunder. Namun, ia memiliki intensitas tertinggi dari semua berkas elektron yang dipantulkan. Detektor yang termasuk dalam SEM mendeteksi pancaran elektron dengan intensitas tertinggi yang dipantulkan oleh analit atau material. Anda juga dapat menemukan berkas elektron dengan intensitas tertinggi.

Saat mengamati suatu material, posisi permukaan objek dipindai ke seluruh permukaan material yang diamati dengan berkas elektron intensitas tertinggi. Informasi dapat diperoleh dengan menggunakan program pengolah gambar yang dibangun ke dalam komputer dengan menggunakan berkas objek yang dipantulkan.

2.7.2.2 Energy Dispersive Spectroscopy (EDS).

Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) digunakan untuk mengenali jenis atom dipermukaan material. Sebagian alat *SEM* sudah dilengkapi dengan fasilitas ini, namun tidak semua nya alat *SEM* mempunyai fitur ini. Prinsip kerja *EDS* diperoleh dari sinar X karakteristik, yaitu dengan menembakkan sinar X pada sampel di posisi yang ingin kita ketahui komposisinya. Maka pada posisi yang ditembakkan dengan sinar X tadi akan muncul puncak-puncak yang mewakili suatu unsur yang terkandung dalam sampel. Setelah itu dengan *EDS* kita bisa membuat pemetaan elemen di permukaan sampel uji, untuk menganalisa secara kuantitatif dari persentase masing-masing elemen. Aplikasi dari *SEM* dan *EDS* menganalisis [13].

1. Komposisi, menganalisa komposisi dari permukaan benda uji.
2. Morfologi, menganalisa ukuran dan bentuk dari benda uji.
3. Topografi, menganalisa tekstur dan permukaan benda uji.

Adapun kelemahan dari aplikasi SEM, yaitu:

1. Kondisi pengujian harus vakum.
2. Resolusi lebih rendah dari TEM.
3. Hanya menganalisa bagian permukaan benda uji.

4. Benda uji harus bahan yang konduktif, karena jika tidak, maka benda uji harus perlu dilapis logam seperti emas.

2.7.2.3 *Differential Scanning Calorimetry (DSC)*

Differential Scanning Calorimetry (DSC) adalah alat yang menganalisis sifat termal suatu bahan menggunakan kalorimetri dengan mengukur perbedaan suhu antara sampel dan krusibel kosong sebagai bahan standar atau referensi [13]. Batas suhu dari -100 hingga 5000C. Sifat material yang dapat dianalisa dengan alat ini antara lain :

1. Glass transition temperature
2. *Re-crytlization temperature*
3. *Melting temperature*
4. *Enthalpy*
5. *Oxygen Induction Time (OIT)*

Differential Scanning Calorimetry (DSC) adalah pengujian yang mengukur sifat termal dan kuantitatif terkait dengan panas yang dilepaskan atau diserap pada transisi dalam sampel karena perlakuan panas, serta sifat kimia dan fisik. Berikut detailnya.

1. Proses eksothermik, sampel melepaskan energi.
2. Proses endothermic, sampel mengabsorpsi energy.
3. Perubahan kapasitas panas.

Differential Scanning Calorimetry (DSC) menganalisis:

1. Panas transisi - pelelehan, kristalisasi.
2. Transisi gelas – bahan amorf.
3. Titik leleh – padatan kristalin.
4. Desolvasi – absorpsi dan pelepasan pelarut.
5. Penentuan kemurnian – kuantifikasi rasio fase amorf atau kristalin, kontaminasi.
6. Kompatibilitas – interaksi antarkomponen.
7. Kondisi proses – faktor lingkungan.
8. Kinetika dekomposisi – stabilitas kimia dan termal.

BAB 3

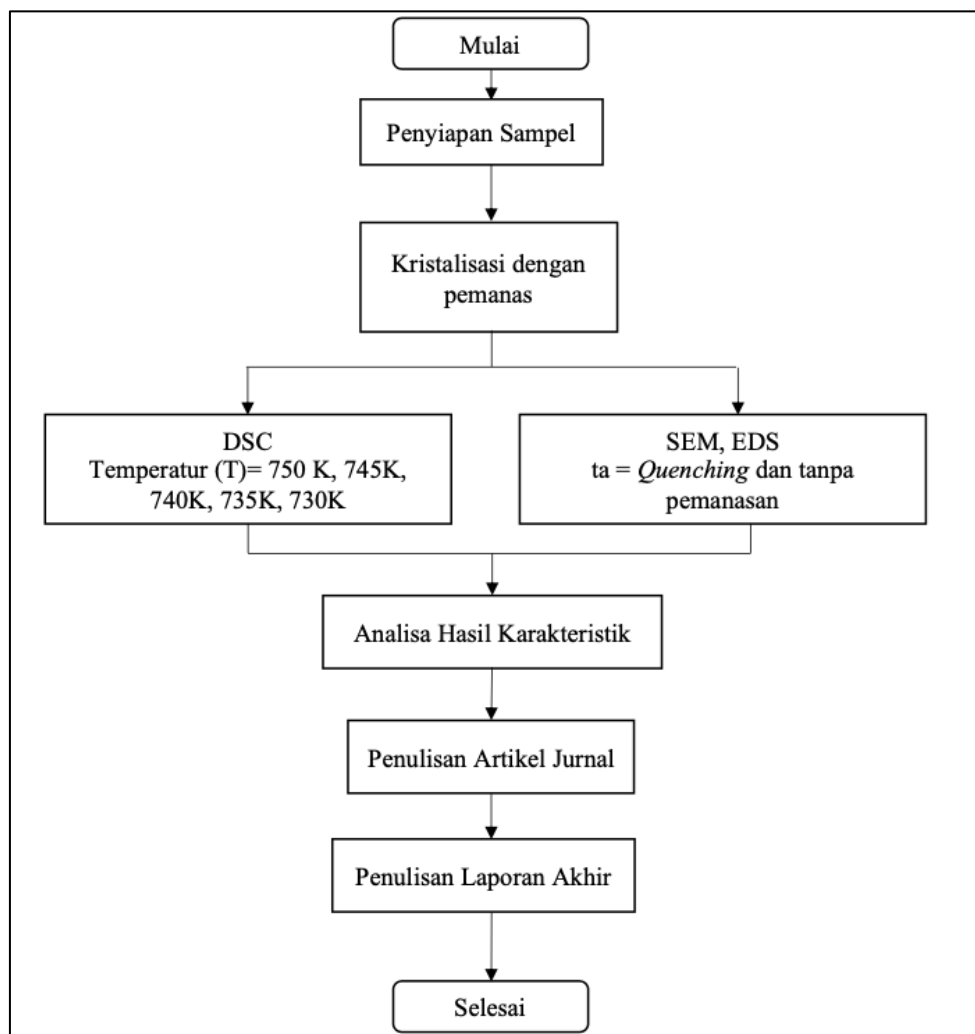
METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus 2022 sampai dengan bulan Januari 2023 di Laboratorium Metalurgi FTI Trisakti, Batan Lipi dan Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi (PPNN) ITB. Pokok kajian meliputi pembuatan Sample, Perlakuan Panas, sampai dengan Karakteristik,

3.2 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini merupakan diagram alir penelitian.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.3 Bahan dan Alat

Penelitian ini dimulai dengan mempersiapkan beberapa unsur kimia untuk membuat paduan logam amorf komposisi $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ dengan kadar kemurnian 99,99%. Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain sebagaimana dalam table 3.1

Tabel 3.1 Material Paduan Amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$

NO	Material	Jumlah	Keterangan
1	Alumunium (99,99%)	5,48 gram	Granula / Serpihan
2	Cu (99,99%)	39 gram	Granula / Serpihan
3	Ni (99,99%)	5,993 gram	Granula / Serpihan
4	Zr (99,99%)	101,91 gram	Granula / Serpihan
5	Ti ukuran 20 mm x 25 mm	2 pcs	Bongkahan
6	Propanol	1 liter	
7	Tabung Quartz dia. 5 dan 10 mm	2 pcs	
8	Gas Argon	2 tabung	@70 kg

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain terdiri dari 2 kelompok, yaitu peralatan pembuatan sampel dan pengujian sampel yang sudah dibuat.

1. Peralatan pembuatan sampel antara lain terdiri dari tungku pemanas, arc melter dan induction melter.
2. Peralatan pengujian karakterisasi mikroskopik dari sampel, dimana menggunakan tiga jenis analisis yaitu *X-Ray Diffraction (XRD)* untuk analisis struktur, *Differential Scanning Calorimetry (DSC)* untuk menganalisa sifat termal material dan *Scanning Electron Microscope (SEM/EDS)* untuk mengamati morfologi permukaan.

3.3 Tahap Persiapan Bahan dan Alat

Pada penyiapan unsur kimia, dibuat kemurnian 99,99% Zr, Cu, Ni, dan Al sesuai dengan beratnya masing-masing, dan sebagai hasil peleburan diperoleh 152,4 g $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ (at.%) sampel paduan logam amorf. Logam mengembang dan berkontraksi. Ini karena perubahan suhu, tetapi keduanya bersifat sementara, jadi bukan kondisi yang akan bertahan selamanya. Perubahan suhu dari tinggi ke rendah menyebabkan kontraksi, dan perubahan suhu dari rendah ke tinggi menyebabkan pemuaian.

Setelah pencampuran dan peleburan unsur-unsur ini dalam tungku peleburan busur vakum (10^{-6} Torr), mereka terpapar ke atmosfer gas argon 10^{-3} Torr untuk menyiapkan ingot. Torr adalah satuan tekanan non-SI yang setara dengan 760 hingga 1 atmosfer standar. Perangkat ini dirancang untuk memperkirakan tekanan fluida yang dinyatakan dalam milimeter air raksa. Jadi 1 Torr tekanan kira-kira sama dengan 1 mmHg. Dalam proses peleburan busur, Ti getter diposisikan sedemikian rupa untuk mencegah oksidasi dan entrainment dari lelehan.

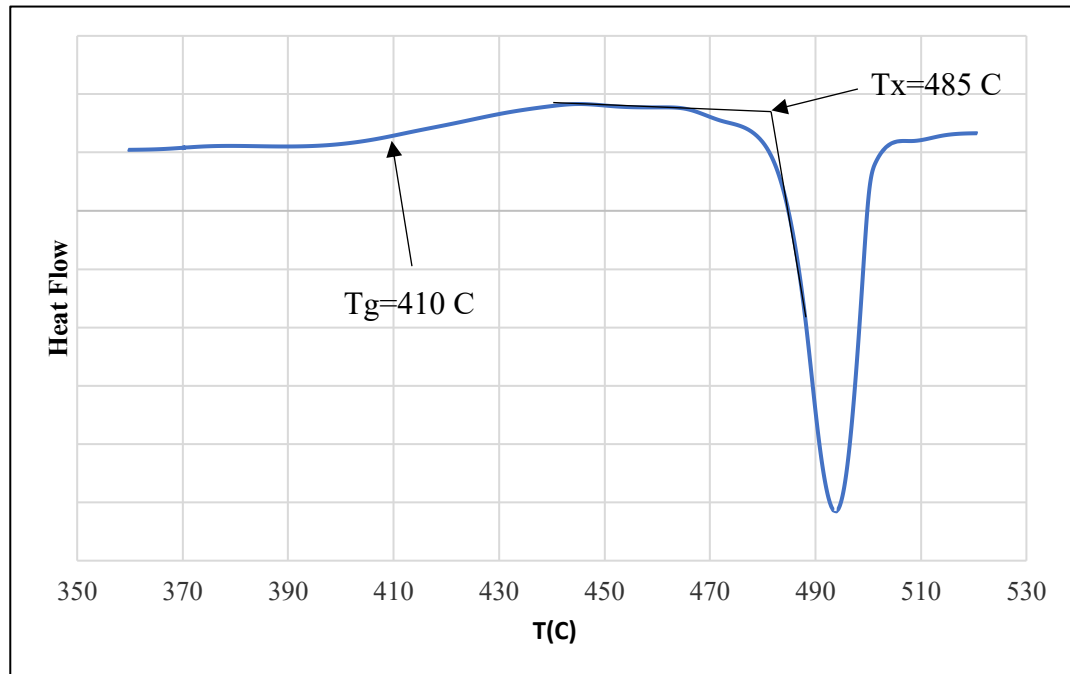
Ingot ini kemudian dipotong-potong menggunakan diamond disc cutter dan dimasukkan ke dalam tabung kuarsa dengan diameter dalam 3,5 dan 7 mm. Panjang efektif tabung kuarsa ini adalah 100 mm. Di dalam tabung kuarsa ini, ingot dilebur lagi dalam tungku induksi dan kemudian didinginkan dalam air yang diaduk. Melalui proses quenching, laju pendinginan dapat mencapai 104 K/menit, sehingga struktur paduan logam menjadi amorf.

3.4 Eksperimental

Untuk percobaan kristalisasi isothermal, sampel $Zr_{55}Cu_{30}$ dari paduan amorf Al_{10} dengan berat 10–15 mg dipotong menggunakan cakram intan berpendingin air. DSC Perkin Elmer digunakan untuk percobaan kristalisasi kinetik. Untuk percobaan kristalisasi isothermal, pertama-tama panaskan sampel dari 323 K ke suhu spesifik T_h (795 K) dengan kecepatan 20 K/menit untuk mendapatkan pemindaian DSC. Pentingnya memilih T_h adalah bahwa sampel berada pada temperatur ini. Gambar di bawah menunjukkan kurva pemanasan sampel cor untuk Zr_{55} dengan Cu_{30} dalam paduan amorf Al_{10} .

Pada laju pemanasan 20 K/menit, T_g yang ditentukan adalah 690 K dan suhu permulaan kristalisasi T_x adalah 758 K. Dari profil pemindaian ini, lima suhu T_c dipilih untuk percobaan kristalisasi DSC. Lima suhu dipilih: 730, 735, 740, 745 dan 750 K. Untuk setiap T_c , sampel paduan amorf tuang dipanaskan pada 323 K hingga T_c pada laju 100 K/menit dan kemudian ditahan pada T_c . Dalam waktu tertentu, t_k . Fluks panas dicatat sebagai fungsi waktu.

Sampel baru digunakan untuk setiap T_c .



Gambar 3.2 Kurva Pemanasan Sampel Untuk Zr_{55} Dengan Cu_{30} Di Dalam Al_{10} Paduan Amorf.

BAB 4

PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan pembuatan paduan logam amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ yang dihasilkan dengan metode peleburan busur dengan diameter ingot 3, 5, dan 7 mm. Ingot kemudian ditempatkan dalam tabung kuarsa, dilebur lagi dalam tungku peleburan busur, dan kemudian didinginkan dalam air yang diaduk untuk membuat paduan menjadi amorf. pada buah ara. 4.1 menunjukkan sampel paduan $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ amorf yang dilelehkan dan di *quench*.



Gambar 4.1 Spesimen paduan amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$.

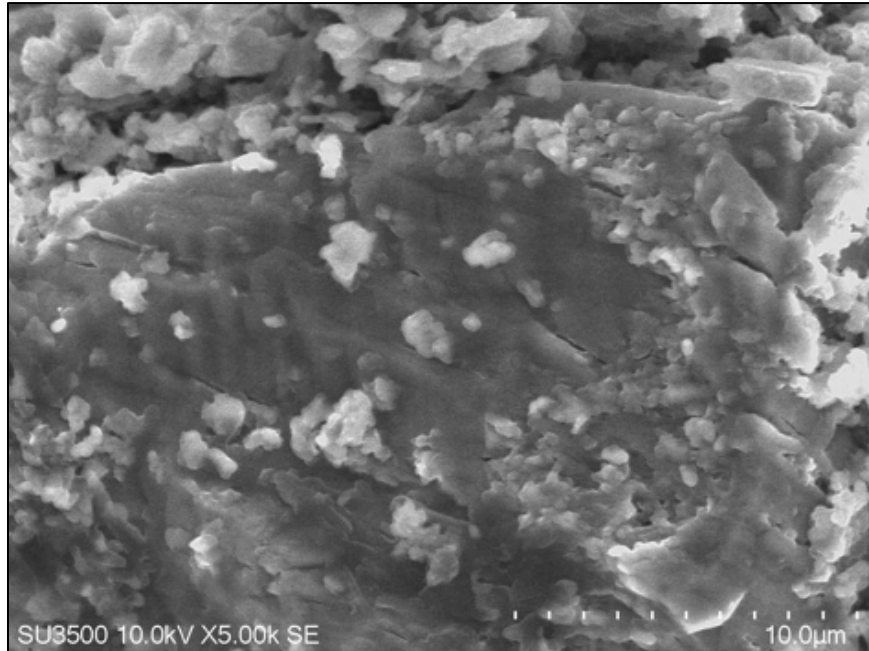
Kemudian dilakukan pengujian menggunakan tiga jenis analisis yaitu :

1. *Scanning Electron Microscope (SEM/EDS)* untuk mengamati morfologi permukaan dan menganalisis komposisi unsur kimia.
2. *Differential Scanning Calorimetry (DSC)* untuk menganalisis sifat termal material

4.1 Hasil SEM/EDS



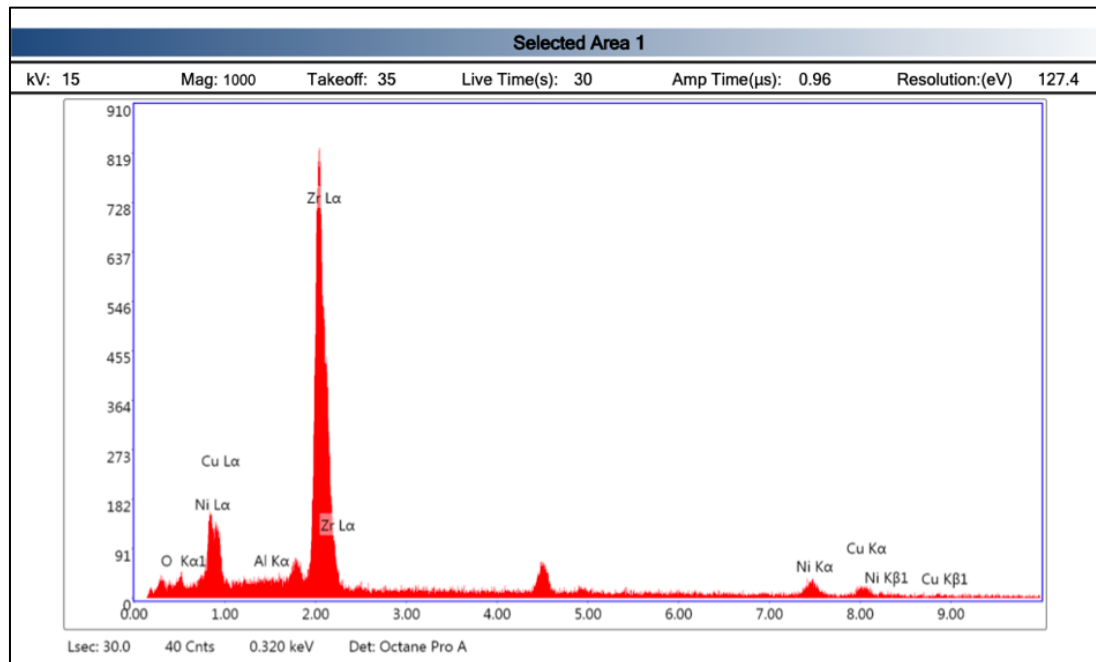
Gambar 4.2 SEM Permukaan Paduan Amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ Sebelum tanpa perlakuan panas



Gambar 4.3 SEM Permukaan Paduan Amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ Setelah Perlakuan Panas

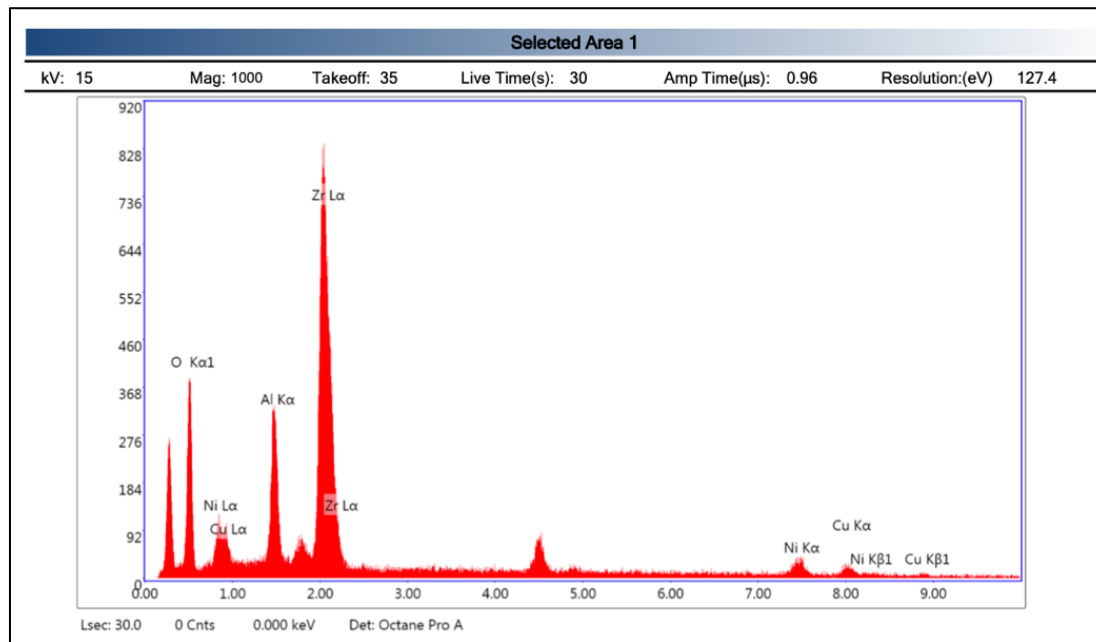
Struktur dari Sampel 1 dengan observasi SEM seperti terlihat pada Gambar SEM Permukaan Paduan Amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ Sebelum tanpa perlakuan panas di

mana terlihat butir-butir kristalin. Struktur amorf Sampel 2 dapat dilihat pada hasil observasi SEM seperti terlihat pada SEM Permukaan Paduan Amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_{15}Al_{10}$ setelah perlakuan panas terdapat struktur yang tidak beratur.



eZAF Smart Quant Results			
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.
O K	8,91	34,44	24,91
AlK	0,68	1,56	7,92
ZrL	82,60	56,01	472,44
NiK	4,79	5,04	9,51
CuK	3,02	2,94	4,55

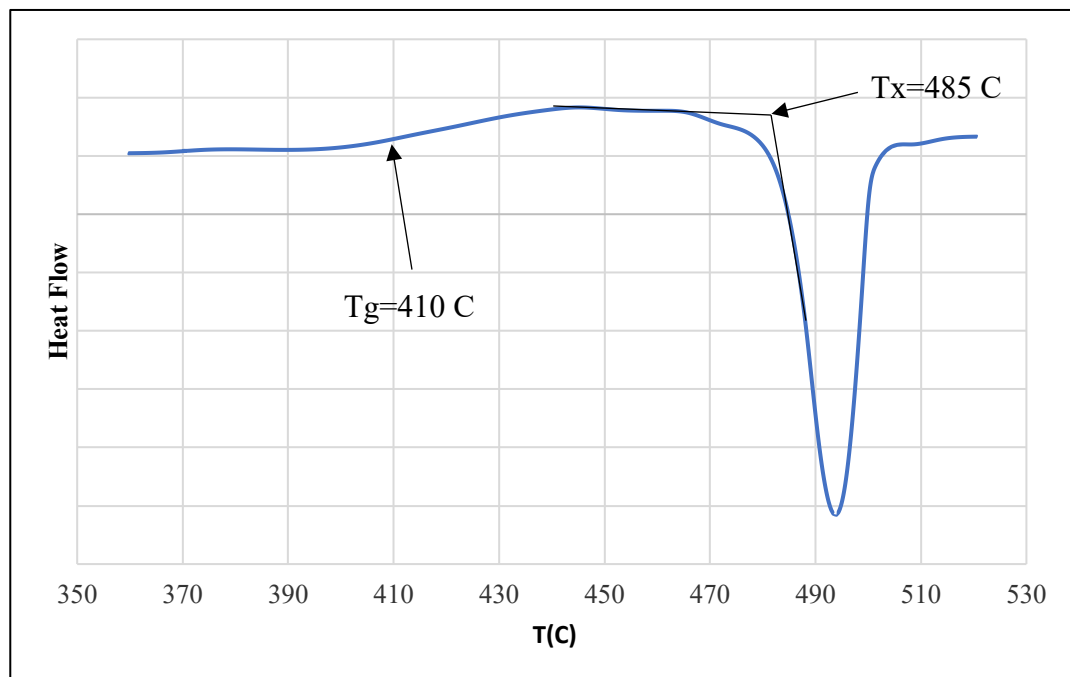
Gambar 4.4 Pengujian EDS Paduan Amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_{15}Al_{10}$ Sebelum tanpa perlakuan panas



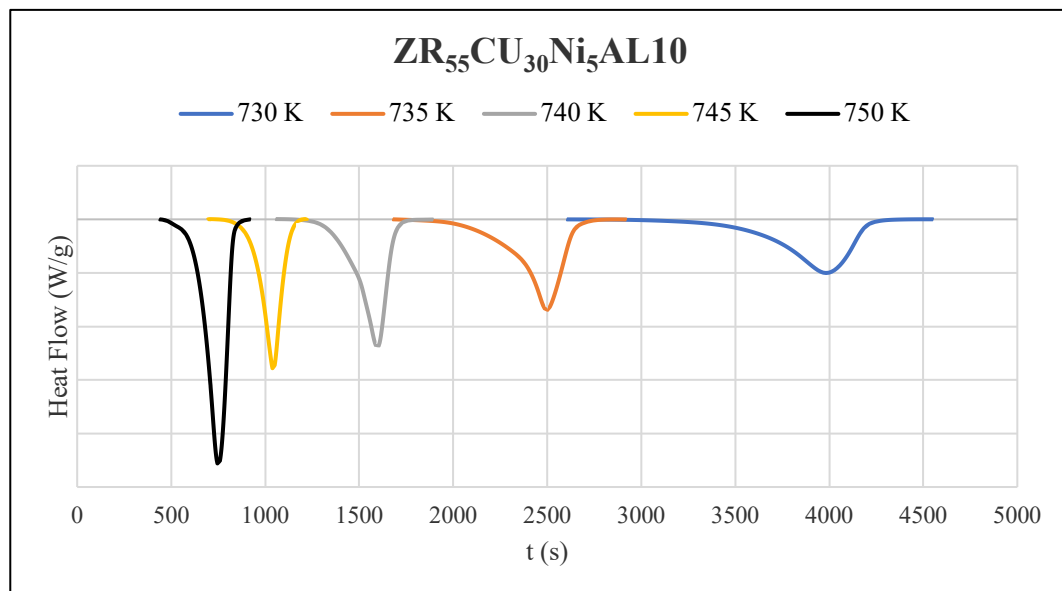
eZAF Smart Quant Results			
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.
O K	22,99	55,17	158,05
AlK	9,00	12,80	175,14
ZrL	51,87	21,83	482,67
NiK	9,14	5,97	30,81
CuK	7,00	4,23	17,53

Gambar 4.5 Pengujian EDS Paduan Amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ Sebelum tanpa perlakuan panas

4.2 DSC



Gambar 4.6 DSC Heating Curve Of As – Cast $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ Amorphous Alloy at 20 K/min Rate



Gambar 4.7 Kurva Eksotermis Selama Kristalisasi Isotermal Pada Suhu Kristalisasi 730, 735, 740, 745, 750 K

Gambar di atas menunjukkan plot fluks panas DSC versus suhu untuk $Zr_{55}Cu_{30}$ dalam $5Al_{10}$ yang diperoleh selama kristalisasi isothermal pada suhu anil 730, 735, 740, 745 dan 750 K. Hanya satu panas yang ditunjukkan pada gambar. Terlihat dari gambar bahwa semakin tinggi T yang dipilih, semakin dalam kedalaman reaksi eksoterm, semakin pendek waktu kristalisasi lengkap, semakin pendek waktu kristalisasi awal, dan semakin kecil lebar daerah eksoterm. Hal ini disebabkan oleh kristalisasi dan transformasi fasa yang diaktifkan secara termal.

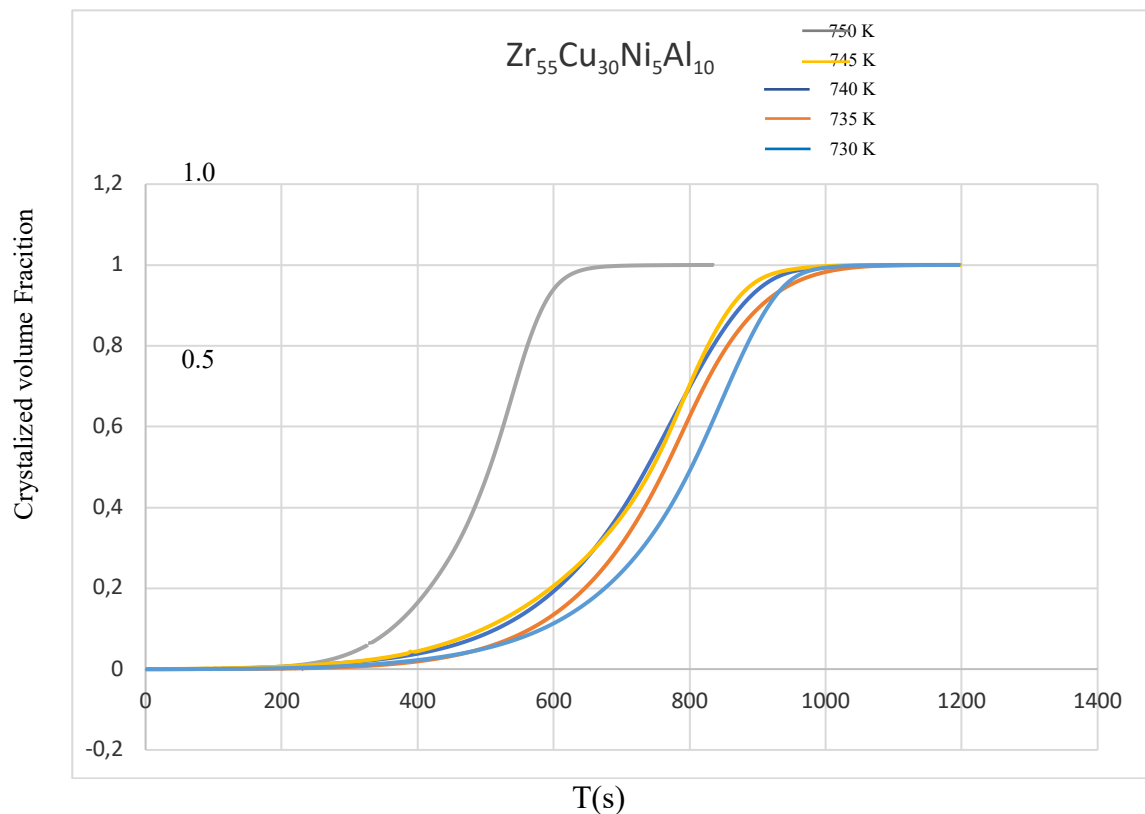
Dengan asumsi bahwa luas eksoterm sebanding dengan fraksi volume zat yang dikristalisasi, fraksi volume zat yang dikristalisasi dapat ditentukan untuk isoterm tunggal.

Jadi, pada saat kristalisasi awal, nilai fraksinya adalah 0, dan pada saat kristalisasi akhir, fraksinya adalah 1. pada gambar. Gambar 3 menunjukkan kurva fraksi volume terkristalisasi yang terbentuk selama kristalisasi isothermal Zr_{55} dan Cu_{30} dalam $5Al_{10}$. Grafik tersebut berbentuk sigmoidal dimana laju kristalisasi maksimum terjadi pada titik belok. Sebagai hasil kristalisasi, dua fase berturut-turut dibedakan. Langkah pertama adalah pembentukan inti dan langkah kedua adalah pertumbuhan inti.

Jika Anda memiliki cara untuk memisahkan kerangka waktu kedua proses secara signifikan, Anda dapat mengamati dan membatakannya. Secara umum, plot nukleasi dan laju pertumbuhan kristal sebagai fungsi suhu diamati memiliki bentuk puncak yang berbeda pada suhu yang berbeda, dengan tumpang tindih sebagian wilayah antara kedua proses.

Selama kristalisasi, nukleasi dan pertumbuhan terjadi dalam volume lelehan cairan yang sama. Selama kristalisasi, volume cairan yang tersedia untuk nukleasi berkurang. Pengurangan nukleasi ini sangat mempengaruhi kinetika proses kristalisasi.

Penurunan harga berkaitan dengan interaksi antar atom. Untuk cairan logam cair, interaksi antar atom memiliki simetri bola. Ini berbeda dari peleburan molekuler karena interaksinya berbentuk bola tetapi interaksinya adalah gaya van der Waals. Interaksi antara atom-atom ini mendasari formalisme nukleasi dan pertumbuhan kristal selama pencairan cairan.



Gambar 4.8 Kurva Fraksi Volume Mengkristal Selama Kristalisasi Isotermal Pada Suhu Kristalisasi 730, 735, 740, 745, 750 K,

Dalam proses kristalisasi, nukleasi dan pertumbuhan terjadi dalam volume lelehan cairan yang sama. Selama proses kristalisasi, volume lelehan cairan yang tersedia untuk nukleasi berkurang. Penurunan nukleasi ini sangat mempengaruhi kinetika proses kristalisasi. Penurunan entalpi terkait dengan interaksi antar atom. Untuk cairan cair logam, interaksi antara atom adalah simetri bola. Ini berbeda dari lelehan molekuler yang meskipun interaksinya berbentuk bola, interaksinya adalah gaya Van der Waals. Interaksi antara atom-atom ini merupakan dasar formalisme nukleasi dan pertumbuhan kristal dalam lelehan cair.

Untuk kinetika kristalisasi, persamaan KJMA yang digunakan adalah sebagai berikut, [14-15].

$$x(t) = 1 - \exp(-k t^n) \dots \dots \dots (1)$$

Persamaan (1) dipasang pada plot fraksi volume terkristalisasi terhadap waktu pada Gambar. 3. Kurva pas dan eksperimental fraksi volume terkristalisasi untuk suhu kristalisasi 750 K ditunjukkan pada Gambar dari fitting, nilai n dan k diperoleh pada lima suhu kristalisasi. Nilai-nilai ini ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai k

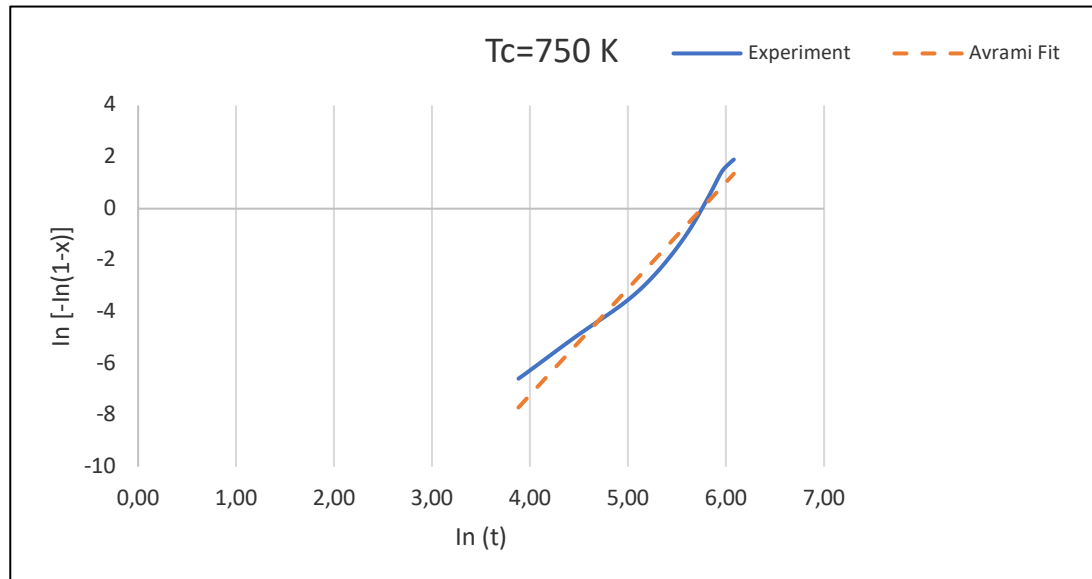
digunakan untuk menentukan konstanta laju (k_0) dan energi aktivasi (E) dari persamaan,

$$k = k_0 \exp \left(- \frac{E}{RT} \right) \quad (2)$$

Nilai E adalah 265 kJ/mol. Nilai n yang diperoleh lebih tinggi dari 4 menunjukkan pertumbuhan kristal Zr_{55} Dengan Cu_{30} Di dalam $5Al_{10}$ selama proses kristalisasi adalah antarmuka yang dikendalikan dengan meningkatnya laju nukleasi [16,17-18]. Nilai energi aktivasi yang diperoleh dari fitting mirip dengan energi aktivasi untuk aliran viskos. Nilai yang sama ini menunjukkan bahwa laju kristalisasi dikendalikan oleh viskositas. Menurut Turnbull dan Bagley [19], kristalisasi dalam keadaan amorf dapat terjadi dengan mekanisme tanpa difusi, sehingga energi aktivasinya rendah sehingga laju kristalisasinya lambat. Namun, diakui bahwa proses kristalisasi dan relaksasi struktural dalam paduan amorf dikendalikan secara difusi.

Tabel 4.1 Eksponen Avrami Dan Energi Aktivasi Untuk Kinetika Kristalisasi Isothermal

T_c (K)	$k(s)^{-n}$	n	E (kJ/mol)
730	1.09×10^{-14}	4.3 ± 0.1	265 ± 3
735	5.14×10^{-13}	4.2 ± 0.1	
740	3.33×10^{-13}	4.5 ± 0.1	
745	5.88×10^{-12}	4.2 ± 0.1	
750	5.09×10^{-11}	4.1 ± 0.1	



Gambar 4.9 Persamaan KJMA Cocok Untuk Kristalisasi Isotermal Zr_{55} Dengan Cu_{30} di dalam $5Al_{10}$ untuk T_c dari 750 K.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Uji SEM/EDS menunjukkan bahwa struktur sampel paduan logam bersifat amorf. Pada proses peleburan, faktor kemurnian dan tekanan gas Ar mempengaruhi pembentukan struktur amorf. Pada sampel amorf, sampel 3, kemurnian gas argon 99,9% dan tekanan gas 4 bar. Sebagai hasil dari DSC, suhu transisi gelas (T_g) adalah 410 °C dan suhu kristalisasi (T_x) adalah 485 °C.

Lebar daerah suhu cairan superdingin menunjukkan stabilitas termal yang tinggi dari paduan amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$. Berdasarkan analisis kinetika kristalisasi menggunakan KJMA (Kolmogorov-Johnson-Mehl-Avrami), mekanisme kristalisasi isothermal Zr_{55} dan Cu_{30} dalam paduan amorf Al_{10} ditentukan oleh laju nukleasi. Kristalisasi Zr_{55} dengan Cu_{30} dalam paduan amorf Al_{10} diikuti dengan kinetika klasik nukleasi dan pertumbuhan. Energi aktivasi serupa untuk kristalisasi dan aliran kental menunjukkan bahwa tingkat kristalisasi dikendalikan oleh viskositas.

5.2 Saran

Berikut ini merupakan tahapan kegiatan berikutnya :

1. Dilakukan studi structural relaxation dan kinetika kristalisasi untuk mengetahui lebih dalam thermal stability logam amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$.
2. Dilakukan studi uji mekanik pada spesimen logam amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Guo Lin., Amorphous Nanomaterials Preparation, Characterization and Applications. 2021
- [2] A.M Glezer and N.A. Shurygina, ‘Amorphous-Nanocrystalline Alloys’ CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2018
- [3] A. Inoue, T. Nakamura, N. Nishiyama, T. Masumoto. “Mg-Cu-Y Bulk Amorphous Alloys with High Tensile Strength.” Materials Transactions 33, hlm. 937-945, 1992.
- [4] H.B. Lou, X.D. Wang, F. Xu, S.Q. Ding, Q.P. Cao, K. Hono dan J.Z. Jiang. “73 mm- diameter bulk metallic glass rod by copper mould casting.” Appl. Phys. Lett. 99, hlm. 051910, 2011.
- [5] A. Inoue, N. Nishiyama, H.M. Kimura. Mater Trans JIM 38, hlm. 179, 1997.
- [6] W.H. Wang, C. Dong, C.H. Shek. “Bulk Metallic Glasses.” Materials Sc. and Eng. R 44, hlm. 45-89, 2004.
- [7] A. Inoue, “Bulk Metallic Alloys: Historical Development and Current Research.” Engineering 1(2), hlm. 185-191, 2015.
- [8] E. Donth. The Glass Transition: Relaxation Dynamics in Liquids and Disordered Materials. Berlin: Springer, 2001
- [9] Chairunnisa, P. S., & Wardhana, Y. W. (2016). Karakterisasi Kristal Bahan Padat Aktif Farmasi. *Farmaka*, 14(1), 17-32.
- [10] Tamura, T., & Li, M. (2020). Influencing factors on the amorphous phase formation in Fe–7.7 at% Sm alloys solidified by high-speed melt spinning. *Journal of Alloys and Compounds*, 826, 154010.
- [11] Kurniawan, A., Widyanto, S. A., & Umardhani, Y. (2013). Pengaruh Temperatur Cetakan Pada Cacat Visual Produk Piston Dengan Metode Die Casting. *JURNAL TEKNIK MESIN*, 1(3), 1-10.
- [12] Maqsood, M., & Seide, G. (2018). Statistical modeling of thermal properties of biobased compostable gloves developed from sustainable polymer. *Fibers and Polymers*, 19, 1094-1101.
- [13] H.S. Chen. “Thermodynamic considerations on the formation and stability of metallic glasses.” Acta Metall. 22, hlm. 1505–1511, 1974.

- [14] A. N. Kolmogorov, *Izvestiya Akad. Nauk USSR, Ser. Math.* 1, 355 (1937).
- [15] M. Avrami, *J. Chem. Phys.* 7, 177 (1939).
- [16] J. W. Christian, *The Theory of Transformations in Metals and Alloys*, 2nd ed. (Pergamon Press, Oxford, 1975).
- [17] N. Hua, W. Chen, X. Liu, and T. Zhang, *J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci.* Edit. 31, 191-196 (2016).
- [18]. D. P. B. Aji and G. P. Johari, *Thermochimica Acta* 615, 72-80 (2015).
- [19] D. Turnbull and B. G. Bagley, in *Treatise on Solid State Chemistry*, Vol. 5 (New York, 1975), p. 513.